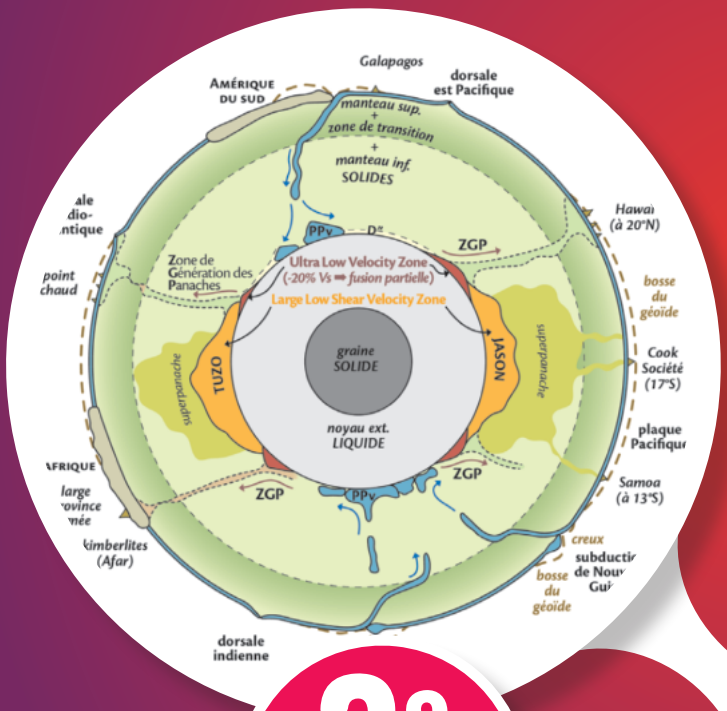
LICENCE
PRÉPAS
CAPES
AGREG

LA GÉOLOGIE EN 1200 VISUELS



2e édition

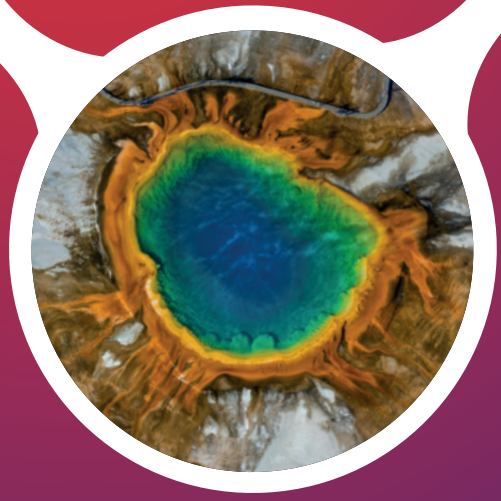
Sous la direction scientifique de
Pierre Thomas

Valérie Boutin
Laurent Geray

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

Illustrations de
Laurent Geray





TOUT LE COURS EN SCHÉMAS, PHOTOS ET CARTES

deboeck SUPÉRIEUR

brgmédition

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

2ème édition

TOUT LE COURS, EN SCHÉMAS, PHOTOS ET CARTES

deboeck SUPÉRIEUR

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

www.deboecksuperieur.com

L'accès aux ressources numériques associées à cet ouvrage est personnel et incessible. Il est soumis aux conditions d'utilisation en vigueur accessible sur le site De Boeck Supérieur et peut être interrompu à tout moment, sans garantie de maintien ou de compensation.

© De Boeck Supérieur s.a., 2025
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 : août 2025
Bibliothèque royale de Belgique, Bruxelles : 2025/13647/077 ISBN 978-2-8073-7171-2

SOMMAIRE

PARTIE I - La Terre dans l'Univers

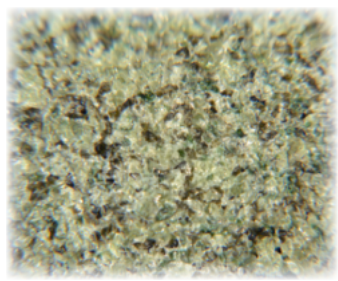
01 L'univers observable
02 Les étoiles et la nucléosynthèse
03 Les planètes et autres petits corps célestes de l'Univers
04 Les planètes du système solaire et leurs satellites
05 Géologie de Mars
06 La Terre : une des deux planètes bleues
07 Géologie de la Lune
08 Les possibilités de vie dans le système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



PARTIE II - La structure des enveloppes terrestres

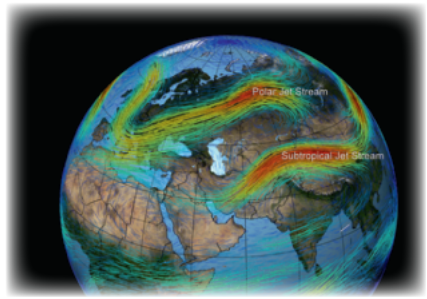
09 Structure et composition de l'atmosphère
10 Structure et composition de l'océan
11 Le modèle PREM
12 Apport des météorites à la connaissance de la structure interne de la Terre
13 Les silicates
14 Pétrologie des enveloppes solides : les roches magmatiques
15 Pétrologie des enveloppes solides : les 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 lithosphère

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



SOMMAIRE

PARTIE V - Le métamorphisme

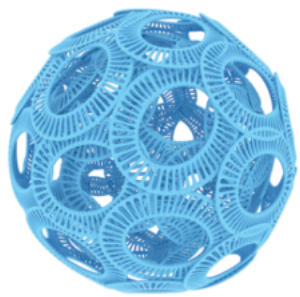
47 Les différents types de métamorphisme
48 Le métamorphisme de contact
49 Les transformations minéralogiques : les principes
50 Les transformations minéralogiques : les représentations graphiques
51 Les transformations minéralogiques : les séquences
52 Les faciès métamorphiques
53 Établissement des 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

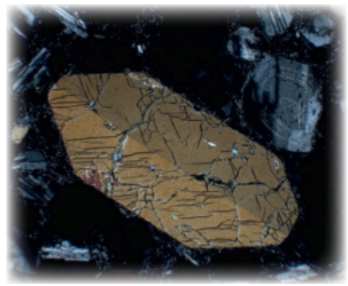




PARTIE VII - Le magmatisme

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 La 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 La série tholéiitique
84 La série calcoalcaline
85 La série alcaline et hyperalcaline
86 La diversité des granites
87 Magmatisme de l'archéen et la formation de la lithosphère continentale
88 Relations tectonique des plaques - magmatisme

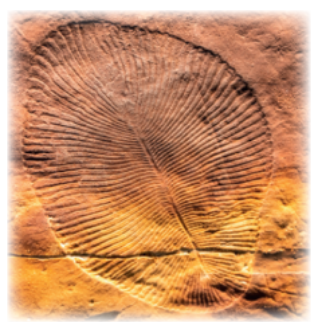




PARTIE VIII - La géologie, une science historique

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 Les grandes lignes de l'évolution du vivant
96 Les crises biologiques Phanérozoïque
97 Les grandes lignes de l'évolution de l'atmosphère
98 L'orogenèse 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

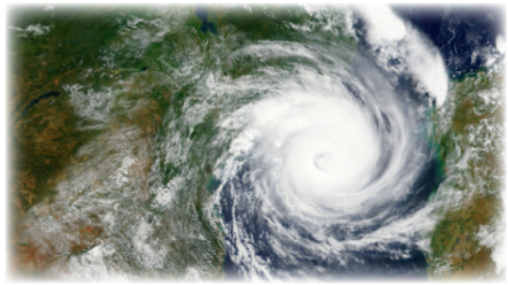




SOMMAIRE

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 et 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



01

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

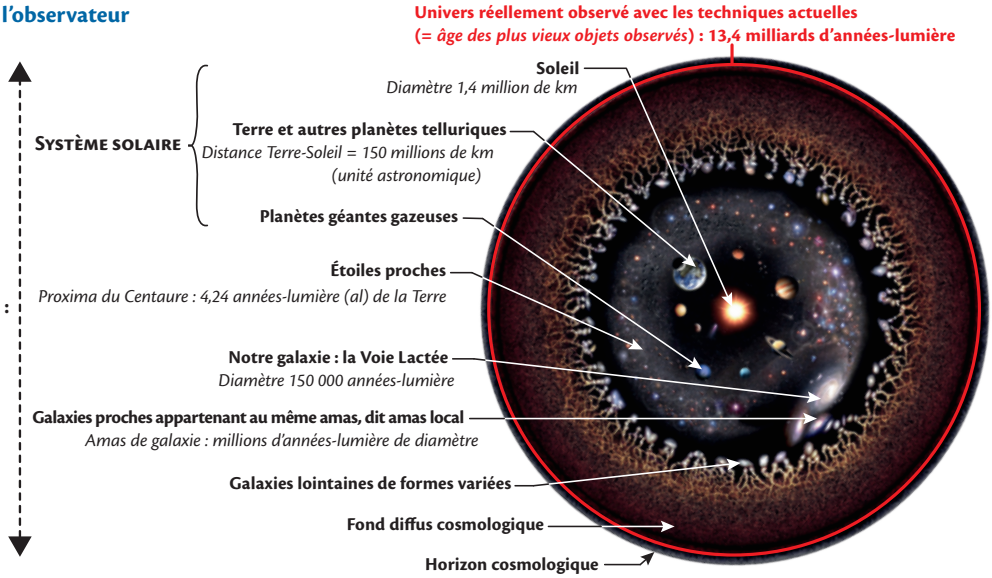
L'Univers observable dépend de la position de l'observateur

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.

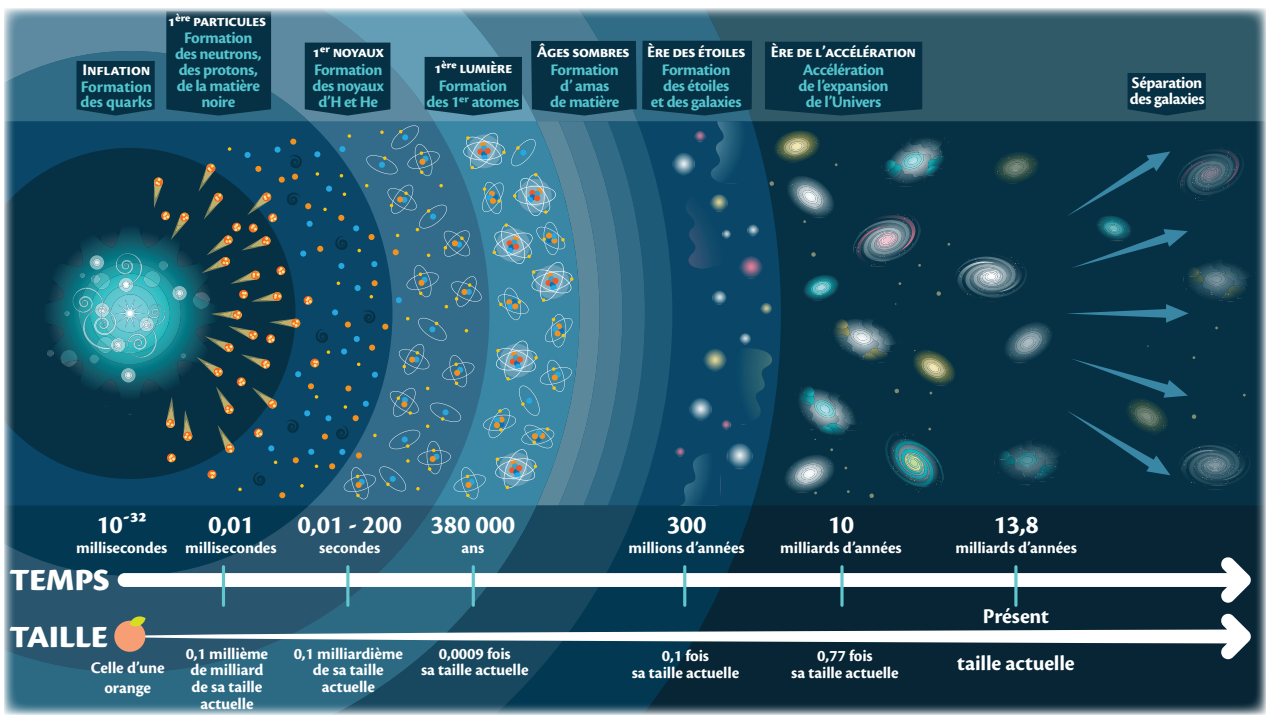


Une représentation de l'Univers observable centré sur le Soleil, avec une échelle logarithmique

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 Lemaitre 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

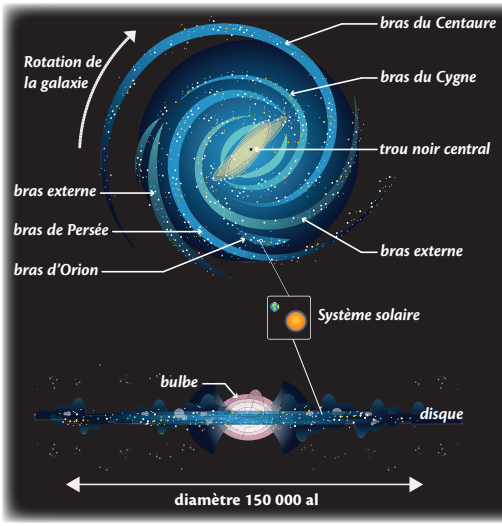
On ne peut observer les objets qu'à distance, en utilisant une gamme particulière du spectre électromagnétique. 02

PEU ÉNERGÉTIQUE ← → TRÈS ÉNERGÉTIQUE

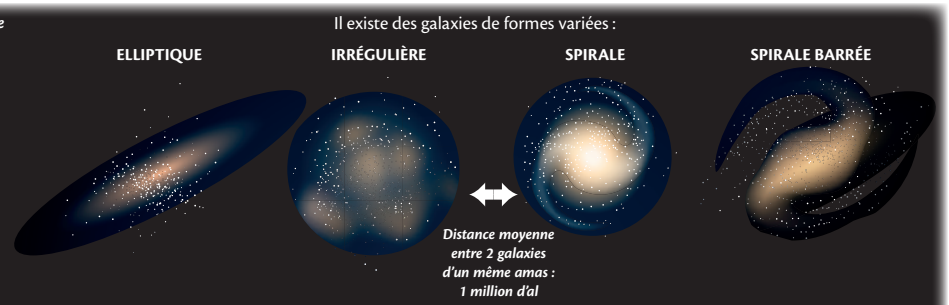
Longueur d'onde (m)	10^{3}	10^{-2}	10^{-5}	$5{\cdot}10^{-7}$	10^{-8}	10^{-10} 10^{-12}
Type d'onde	**Ondes radio** = observation d'objets froids	**Micro-ondes et infra-rouge** = observation d'objets chauds		**Rayonnement visible**	**Ultraviolet**	**X** **Gamma**
Ce qu'elle permet d'observer	Fond diffus cosmologique, nuages de gaz, pulsar (= *étoile à neutrons*)…	Étoiles en formation, disques planétaires…		Étoiles (*luminosité, vitesse, composition*), galaxies…	Supernovas, chute de matière dans un objet compact (*trou noir ou étoile à neutron*)	
Exemple de satellite ou télescope	**COBE, WMAP, Planck** **Projets : Square Kilometer Array** (*radiotélescopes d'1 km² en Australie et Afrique du sud*)	**Very Large Telescope** (*Atacama, Chili*) **James Webb Telescope** (*lancé en 2021*)			**Hubble** **Projet : WSO-UV** (*prévu vers 2025*)	

✪ 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



Quelques dizaines de galaxies = **amas de galaxies**
L'amas contenant la Voie Lactée est dit Amas Local. Il contient aussi les nuages de Magellan et la galaxie d'Andromède.

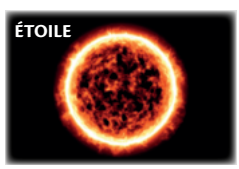
Les amas sont regroupés en **superamas de galaxies**. Le superamas auquel appartient l'Amas Local est appelé Laniakea.

On estime qu'il existe plus de 100 milliards de galaxies dans l'Univers.
Globalement, elles semblent organisées le long de **grands filaments**.
Les amas de galaxies s'éloignent les uns des autres, de plus en plus vite.

*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. 02



Émission de photons et de neutrinos

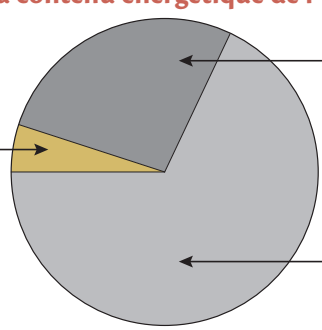
Les **ondes gravitationnelles**, détectées depuis 2015, sont liées à une déformation de l'espace-temps. Elles permettent de détecter des fusions de trous noirs ou d'étoiles à neutrons.



Émission d'ondes gravitationnelles

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



5% Matière ordinaire : la quasi-totalité est composée d'hydrogène et d'hélium.

27% Matière noire : la seule force gravitationnelle liée à la matière visible ne permet pas d'expliquer les profils de vitesse des galaxies ni la vitesse de formation des galaxies et des amas de galaxies. La matière noire est de la matière « qui pèse », c'est-à-dire sensible à la gravitation, mais qui ne semble émettre ni absorber aucun rayonnement électromagnétique et qui est totalement « transparente ».

68% Énergie sombre : l'accélération de l'expansion de l'Univers ne peut être expliquée que par cette force qui se comporte comme une force répulsive.

Propriétés connues, mais nature inconnue

02

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.*

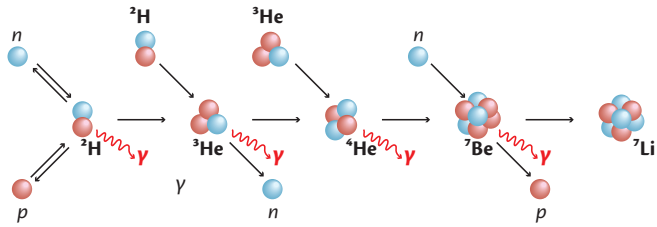
Comment les étoiles apparaissent-elles, évoluent-elles et meurent-elles ?

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 et de béryllium.

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 :

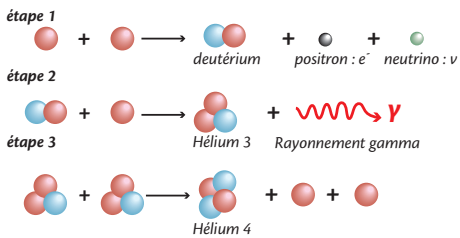
- ***Catégorie*** = naine jaune
- ***Diamètre solaire*** (*sera noté D par la suite*) ≈ 100 fois le diamètre terrestre
- ***Masse*** = 2.10^{30} kg (*99,8% de la masse du système solaire*) ; masse volumique : 1 500 kg/m³
- ***Composition*** : plasma (= *sous l'effet de la chaleur, les noyaux atomiques 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

❶ Noyau = cœur
Rayon = 210 000 km
T= $15{\cdot}10^6$ K
➡ ***Siège des réactions thermonucléaires***

❷ Zone de radiation
Rayon = 490 000 km
T= $2{\cdot}10^6$ K
➡ ***Transfert d'énergie par rayonnement***

❸ 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***



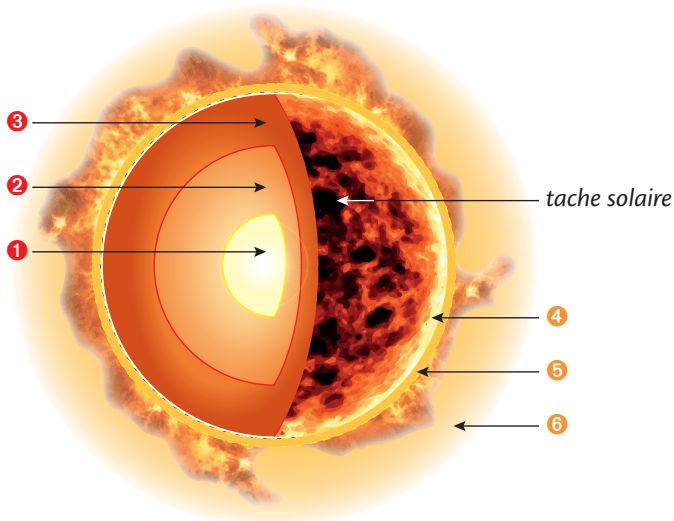
Le Soleil, siège de réactions thermonucléaires, est organisé en couches concentriques.

Les enveloppes externes du Soleil

❹ 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

❺ Chromosphère
T= 20 000 K
Épaisseur = 3 000 km

❻ 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***.

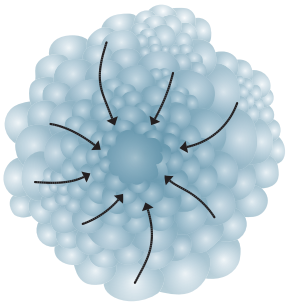




La base de la couronne solaire est visible à l'occasion d'une éclipse.

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



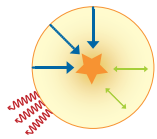
Des nuages formés essentiellement d'hydrogène et datant du Big Bang peuplent l'Univers. Leur répartition est inhomogène : la gravitation renforce les zones de surdensité et l'effondrement peut survenir.

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.*

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

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.*

Le vieillissement d'une étoile

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

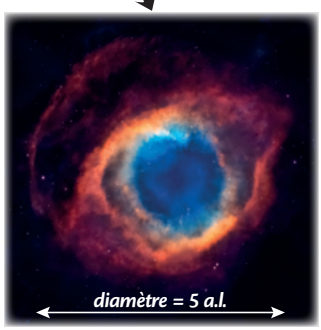
Géante rouge
Diamètre = 100 D
(*mais densité divisée par 10^6*)

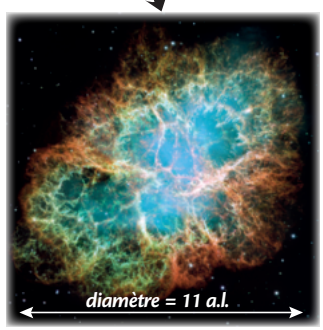
La fusion produit des noyaux de plus en plus lourds, jusqu'à l'**atome de fer** qui est très stable.

Supergéante rouge

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**.





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*).

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*).

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 $10^{13} g/cm^3$*)

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

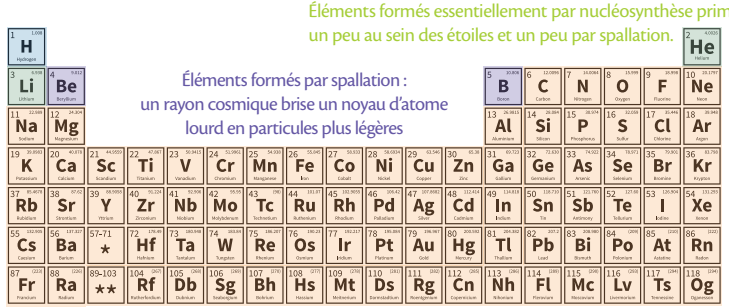
L'origine des noyaux des atomes de la classification périodique

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

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



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

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).

03

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.*

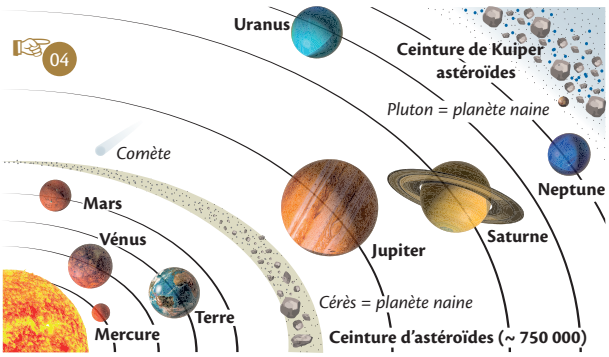
Quels sont les petits objets massifs que l'on détecte dans l'Univers ?

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

L'organisation du système solaire

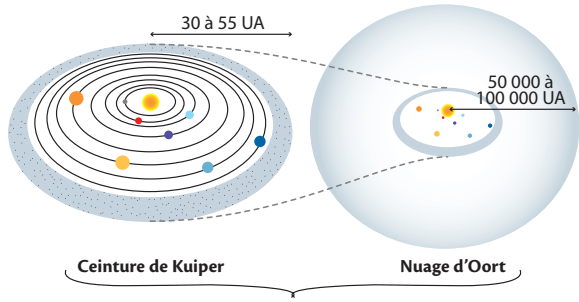
Tous les objets ci-dessous sont dans un même plan, à quelques degrés près : l'**écliptique**.

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.



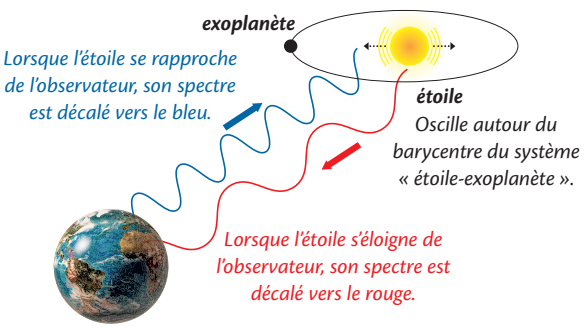
= composés de **petits corps glacés** qui, s'ils sont expulsés, peuvent donner des **comètes** ; contiennent aussi quelques **astéroïdes**.

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.

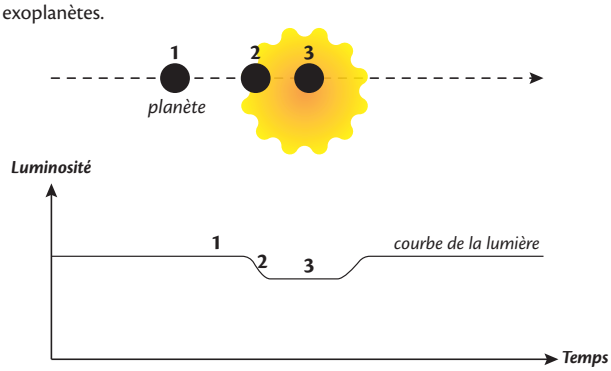
Les méthodes de détection des exoplanètes

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 coronographie, sont actuellement à l'œuvre.

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.



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.



III - Les comètes et les astéroïdes du système solaire

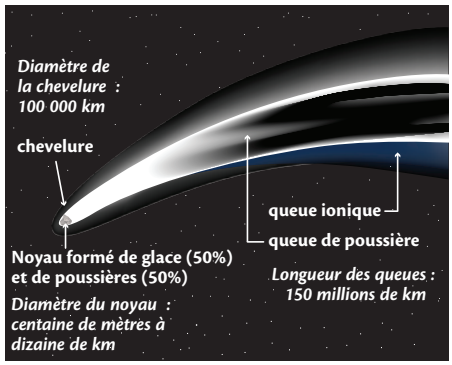
✪ Les comètes, des « boules de glaces sales »

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*)

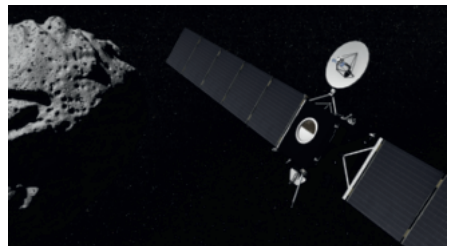


Un schéma de comète



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

Il s'agit de la 1e mission où un atterrisseur se pose sur le noyau de la comète « Tchouri » (67P/Tchouriou-mov-Guérassimenko) 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



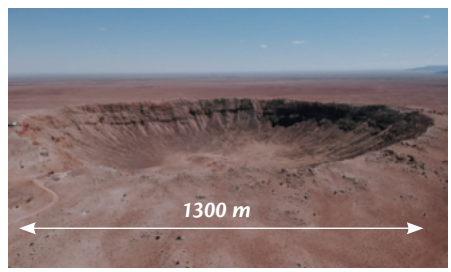
Une météorite de type chondrite

La plupart des météorites, comme celle-ci, sont des fragments d'astéroïdes impliqués dans la formation du système solaire. 12



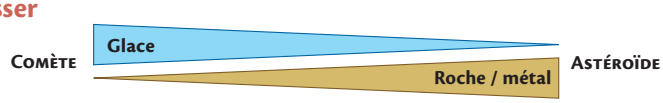
Meteor Crater, en Arizona

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



Il existe des corps de composition intermédiaire.

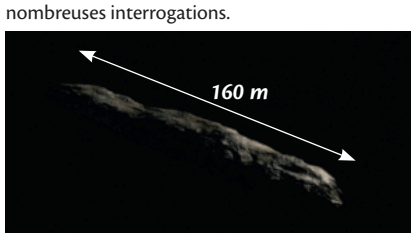
IV - Les comètes et les astéroïdes extrasolaires

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

1I/'Oumuamua

En 2017, l'astéroïde « 1I/'Oumuamua » est le premier objet interstellaire détecté en train de traverser notre système solaire.

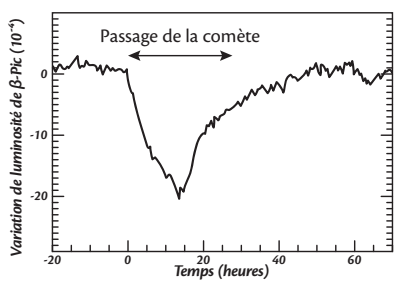
En 2019, une comète interstellaire, 2I/Borissov, a été identifiée. La vitesse de ces deux objets était très élevée et leur forme inhabituelle a suscité de nombreuses interrogations.



Représentation artistique de 1I/'Oumuamua

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

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



Modifié d'après A. Lecavelier des Etangs et al. / Astronomy & Astrophysics 1999.

04

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
Distance moyenne au Soleil (*en millions de km et en unités astronomiques*)	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
Période de révolution sidérale (*en années terrestres*)	0,240	0,615	1,000	1,881	11,862	29,457	84,7	164,81
Période de rotation sidérale	58,646 j	243,01 j (*révolution rétrograde*)	23 h 56 min	24 h 37 min	9 h 50 min	10 h 40 min	17 h 14 min	16 h 3 min
Diamètre équatorial (*en km*)	4 878	12 104	12 796	6 794	142 894	120 536	51 118	50 538
Masse (*en masse terrestre*)	0,99	0,82	1	0,11	318	94	15	17
Densité	5,43	5,24	5,52	3,94	1,33	0,69	1,30	1,76
Présence de satellites naturels confirmés	0	0	1 (*Lune*)	2 (*Phobos et Deimos*)	79 (*dont Io, Europe, Ganymède et Callisto*)	77 (*dont Titan, Encelade et Hypérion*)	27 (*dont Ariel, Titania et Oberon*)	14 (*dont Triton*)
Présence d'anneaux	non	non	non	non	oui	oui	oui	oui
BILAN	**PLANÈTES TELLURIQUES, INTÉRIEURES**				**PLANÈTES GÉANTES, EXTÉRIEURES**			
	➙ Composition de roches silicatées et de métaux, de densité relativement élevée. ➙ Croûte solide en surface. ➙ Pas d'anneaux et pratiquement pas de satellites.				➙ Composition en H et He, proche de celle du Soleil, de faible densité. ➙ Présence d'un noyau rocheux au centre. ➙ Pas de surface solide. ➙ Entourées d'anneaux, nombreux satellites.			

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



Représentation artistique des cinq planètes naines

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

II - Les satellites naturels des planètes

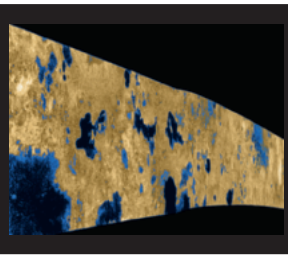
La très grande diversité des satellites naturels



La Lune, satellite de la Terre

➙ Dépourvue d'atmosphère.

➙ Nombreux cratères d'impact.



Titan, satellite de Saturne

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 glice (*cryo-volcanisme*).

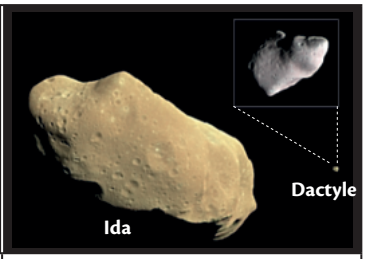


Hyperion, satellite de Saturne

➙ Très cratérisé.

➙ Animé d'un mouvement de rotation chaotique.

➙ Diamètre : environ 250 km.



L'astéroïde Ida (*56×24×21 km*) et **son petit satellite Dactyle** (*1,6×1,4×1,2 km*)

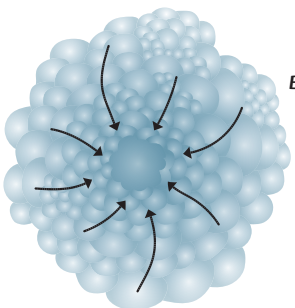
➙ Les **gros satellites** (> *200 km de diamètre*) sont relativement bien connus avec leur forme globalement sphérique, leur composition rocheuse avec des glaces diverses.
➙ Les **petits satellites** ont une forme plutôt irrégulière.

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

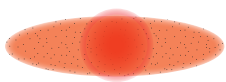
III - La formation des planètes et des satellites

Modèle de la formation des planètes

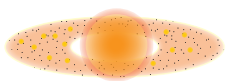


- 4,6 milliards d'années

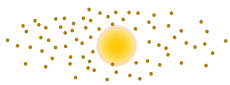
Effondrement d'un nuage suite à une instabilité gravitationnelle



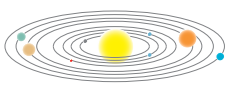
Nuage de gaz et de poussières en rotation avec le futur Soleil au centre



Formation du Soleil

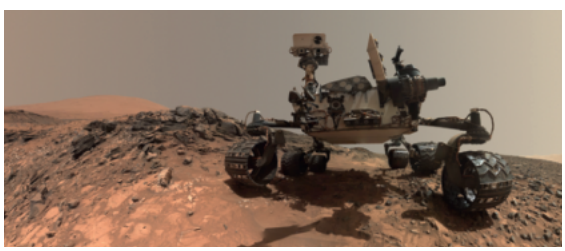


Accrétion des blocs pour former des planétésimaux puis des protoplanètes



Fin de la formation du système solaire

- 4,5 milliards d'années



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).

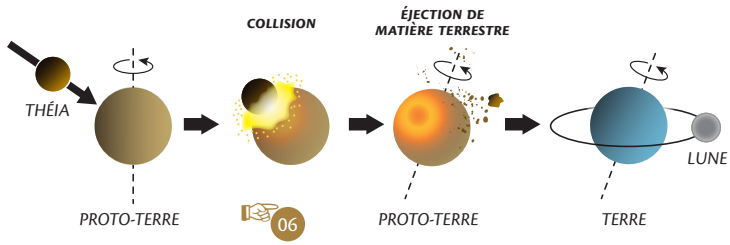
La formation des satellites

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.

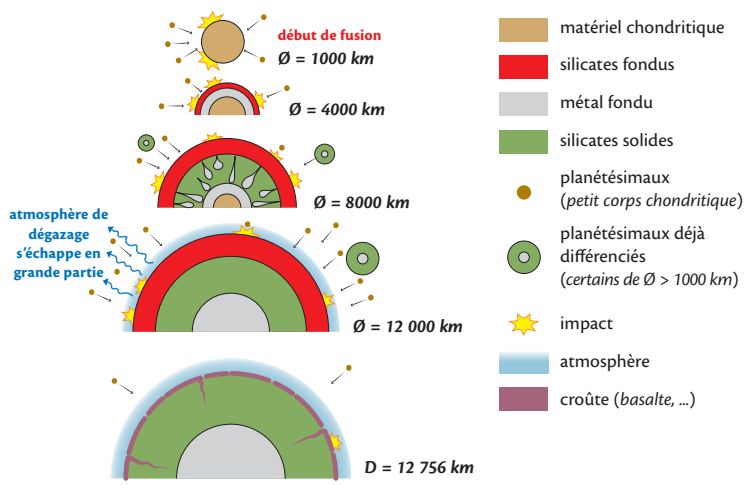
➙ La **collision** : le plus rare, à l'origine de la Lune ou de Charon, un astéroïde de grande taille vient percuter une planète. La matière éjectée par le choc s'agglomère et reste en orbite.



06

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 fait 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.



05

Géologie de Mars

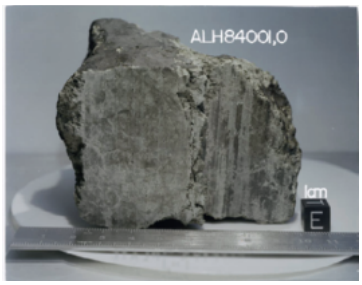
Mars = *quatrième planète du système solaire en partant du Soleil, visible à l'œil nu depuis la Terre.* 04

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

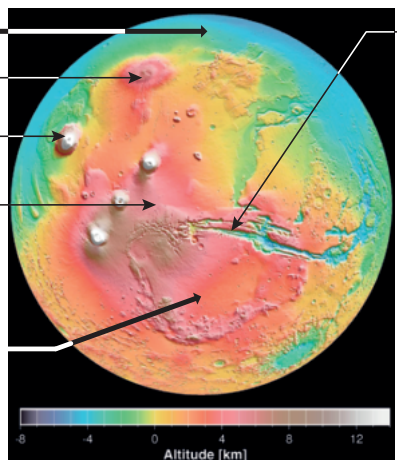
Plaines basses au Nord peu cratérisées

Alba Patera

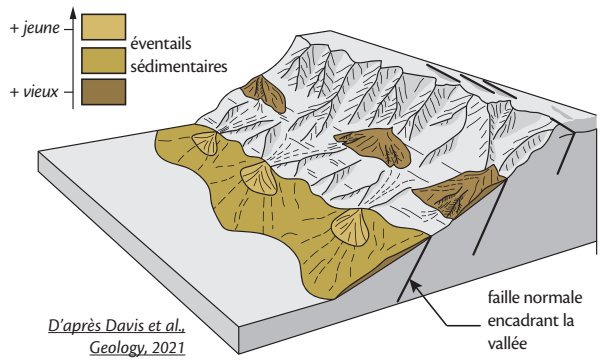
Olympus Mons

***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*



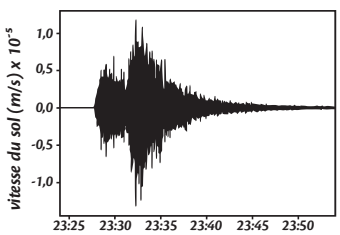
D'après Davis et al., Geology, 2021

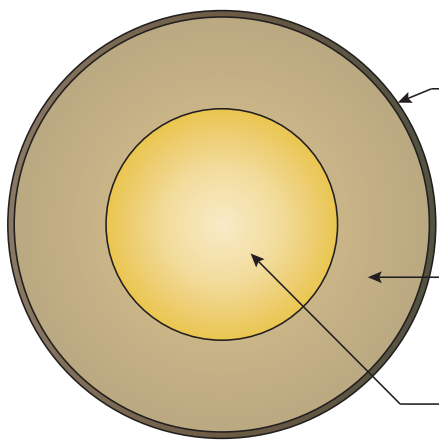
La topographie de Mars est connue depuis 1999 grâce à l'altimètre laser MOLA de la sonde Mars Global Surveyor. La précision verticale est de moins de 5 mètres.

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**.





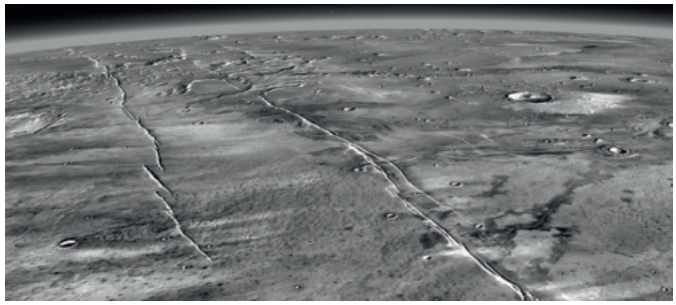
CROÛTE
- **Épaisseur** : entre 24 et 72 km
- **Constitution** : silicates
- **Organisation** : stratifiée en quatre couches depuis la surface
  - le *duricrust*, couche indurée de quelques centimètres,
  - la *mégarégolithe*, strate superficielle d'environ 10 km formée de matériaux concassés par les 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

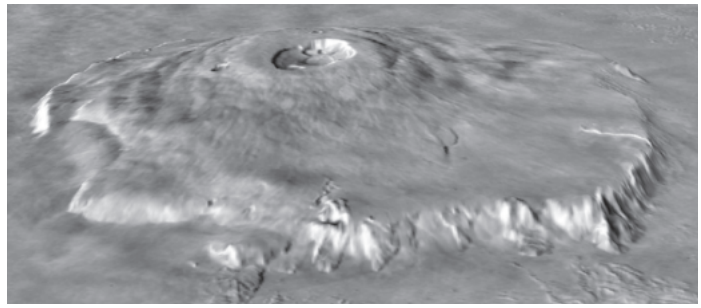
III - La géodynamique interne de Mars

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 anciennes** (*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.

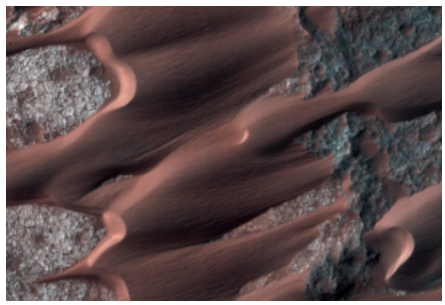
L'**épisode volcanique majeur** se situerait aux alentours de 3,5 Ga, mais des **épisodes volcaniques récents** (*moins de 100 Ma*) ont été identifiés.

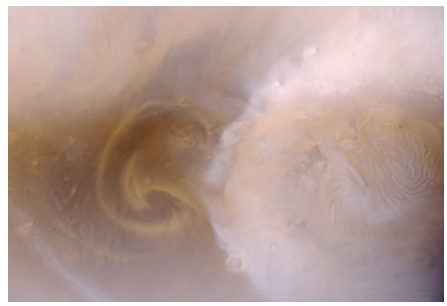
IV - La géodynamique externe de Mars

Une atmosphère ténue avec de violentes tempêtes



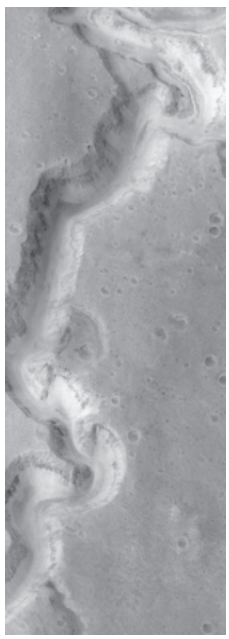
L'atmosphère martienne est composée à **95% de CO_2**. Elle contient également **un peu de vapeur d'eau**, formant des nuages et **beaucoup de poussières en suspension**, responsables de sa **couleur rouge**.





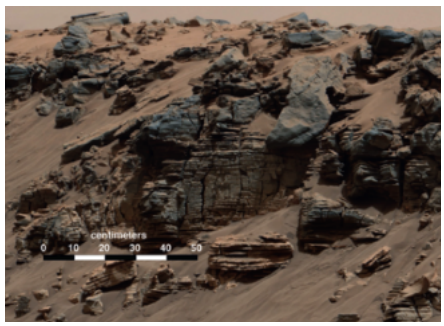
Mars subit des **vents violents** qui modèlent des **champs de dunes** (*ci-dessus, au milieu*) similaires à ceux que l'on peut observer dans les déserts terrestres.
Elle est également le siège de **tempêtes gigantesques** (*ci-dessus à droite, photo prise le 29 août 2000, Cette tempête forme un vortex 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.

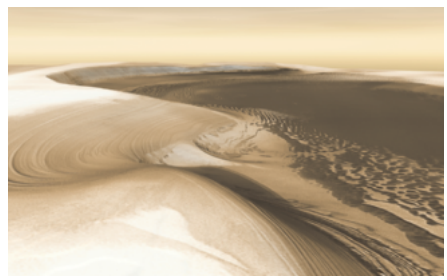
L'image recouvre une région de 9,8 x 18,5 km. La résolution spatiale est de 12 m.



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 hématite 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**.

06

La Terre : une des deux planètes bleues

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

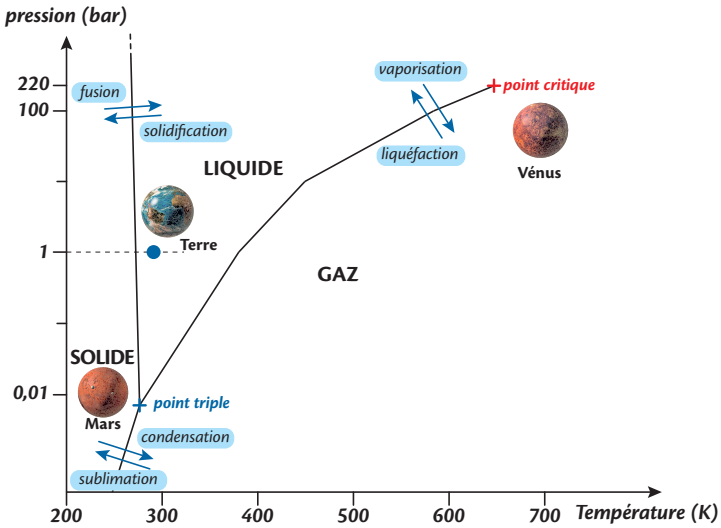
Quels sont les réservoirs de l'eau sur Terre ? Quelles sont les origines de l'eau terrestre ?

L'autre planète bleue du système solaire est Neptune.

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.

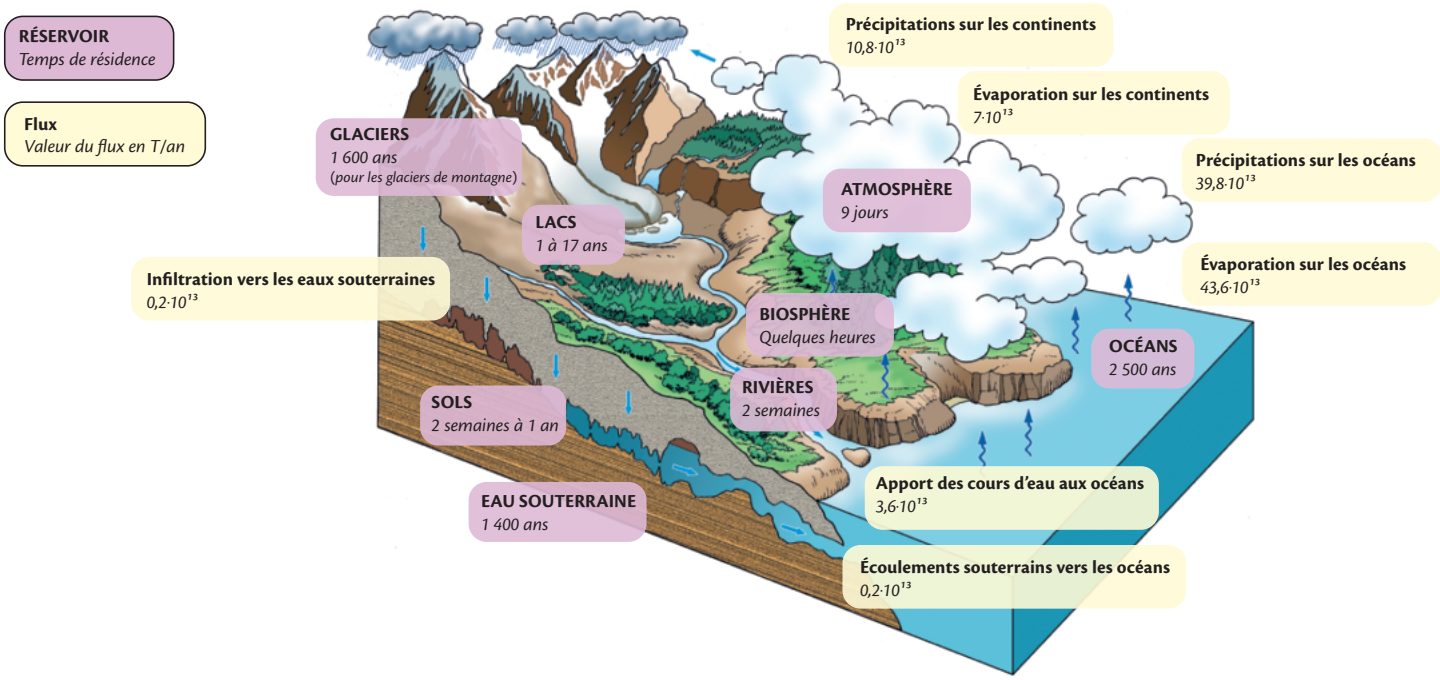


II - Les réservoirs d'eau sur Terre

✪ Un réservoir d'eau superficiel très dynamique

Le cycle externe de l'eau

L'eau superficielle représente environ $1{,}4 \cdot 10^{21}$ kg, soit 0,025 % de la masse de la Terre. 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.

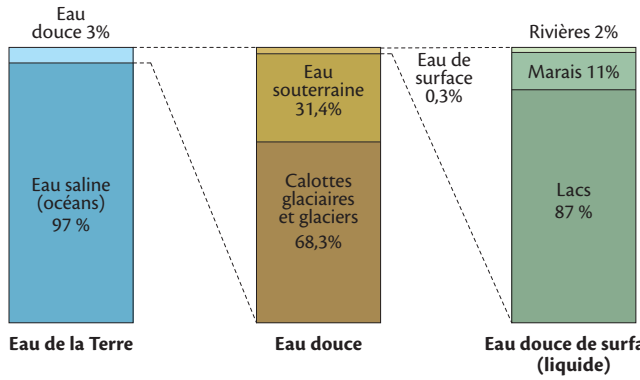


Une ressource fragile

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**.

De plus, elle est 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. Andrault 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**.

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

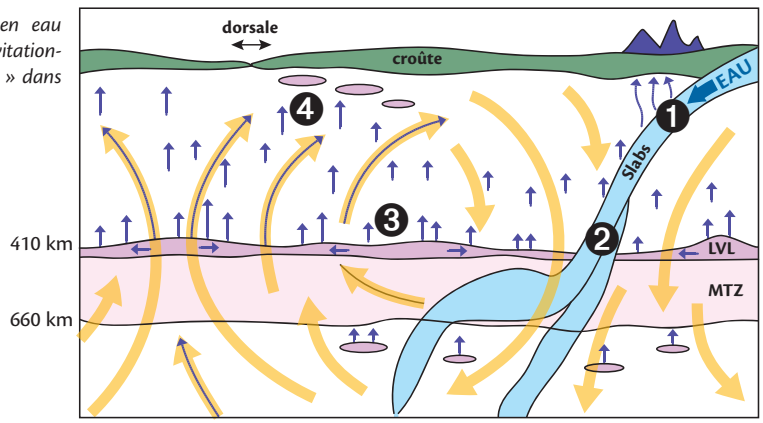
21

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

MTZ : Mantle Transition Zone

LVZ = Low Velocity Zone

LVL ≠ LVZ



❶ *Eau injectée dans le manteau au niveau des zones de subduction*

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

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

mouvement de convection du manteau

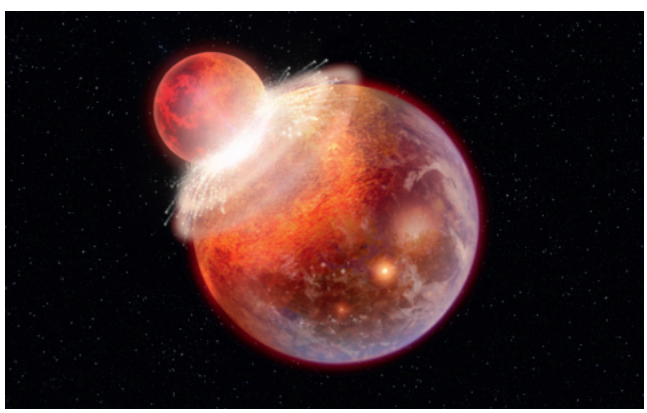
anti-pluie

III - Les origines de l'eau sur Terre

Une origine interne, réalimentée et/ou éliminée 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.

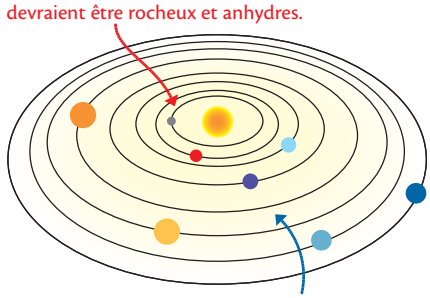


Une origine externe plus tardive du système solaire externe

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**.

07

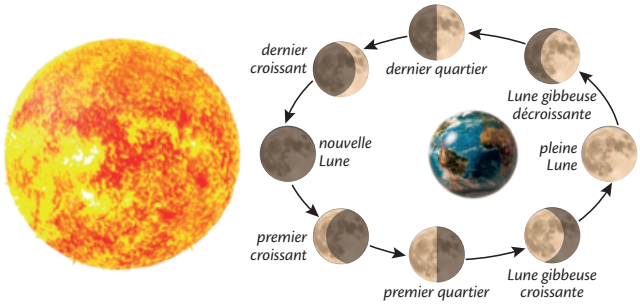
Géologie de la Lune

Lune = *unique satellite naturel permanent de la Terre, 5ème 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 : $3{,}3 \cdot 10^3$ kg/m^3
Gravité de surface : 1,6 m/s^2
Température diurne : +120°C, **nocturne** : -150°C
Pression atmosphérique : 10^{-10} Pa (*très faible !*)

Aspect historique de l'étude de la Lune

- Début XVIIe 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…

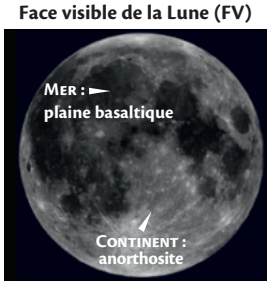


Nombreux cratères météoritiques permettant une datation des différents terrains :
- plus un terrain est cratérisé, plus il est ancien,
- les cratères peuvent se recouper,
- la datation absolue est possible par radiochronologie sur des échantillons.

II - La surface de la Lune

Composition de la croûte lunaire : deux faces très différentes

Face visible de la Lune (FV)

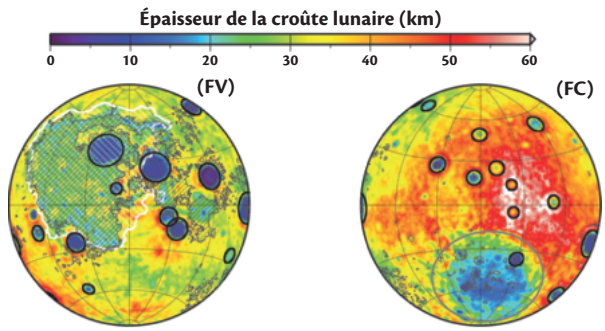


Face cachée de la Lune (FC)



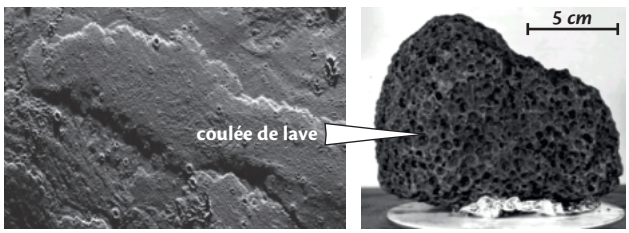
Sur la face cachée de la Lune, la croûte très épaisse s'oppose à la remontée du magma basaltique plus dense, ce qui explique qu'on y trouve bien moins de mers lunaires que sur la face visible.

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).

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.

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)



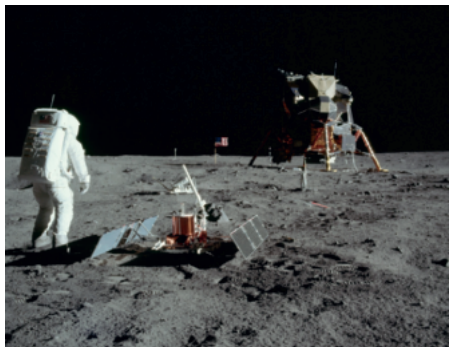
rares petits pyroxènes (jaunes)

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

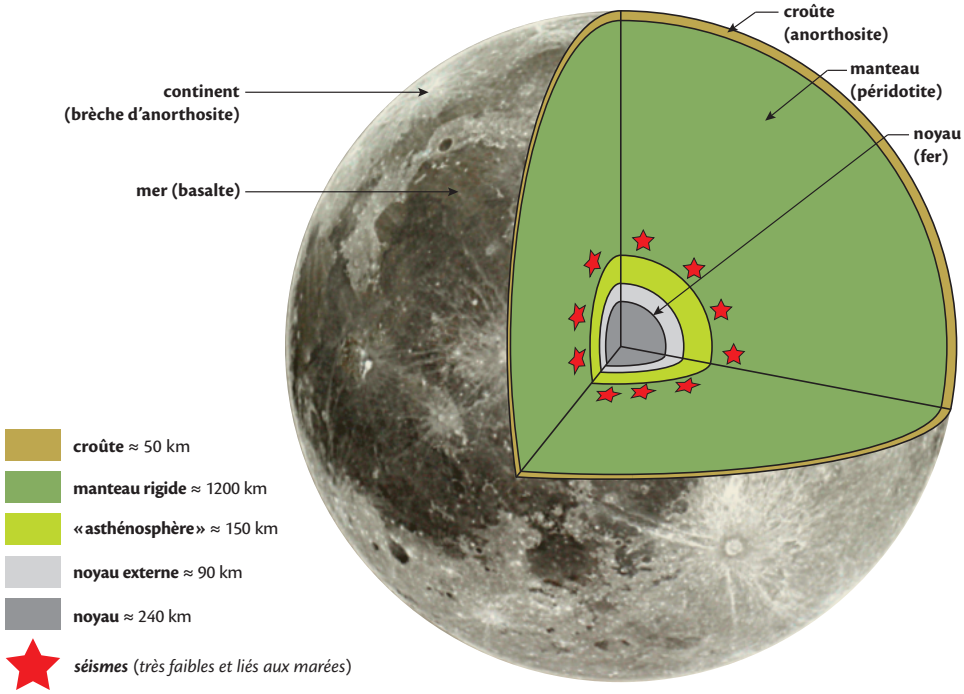
Mise en place de sismomètre par Buzz Aldrin (*Apollo 11*)



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

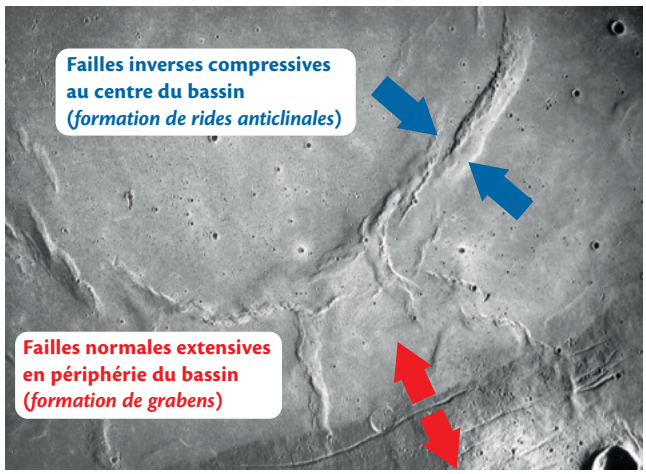
L'intérieur de la Lune 04

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.



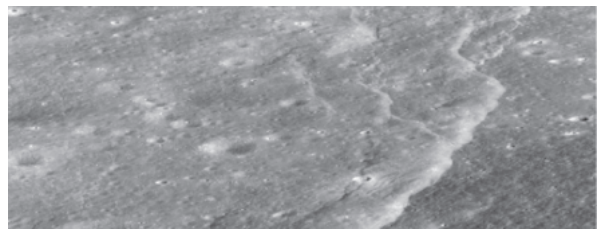
IV - La tectonique lunaire

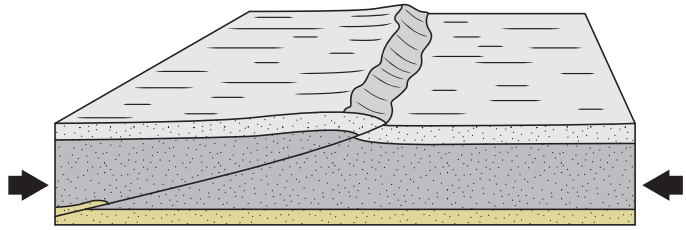
Des failles au niveau du bassin Serenitatis



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.

Des failles chevauchantes récentes un peu partout sur la Lune

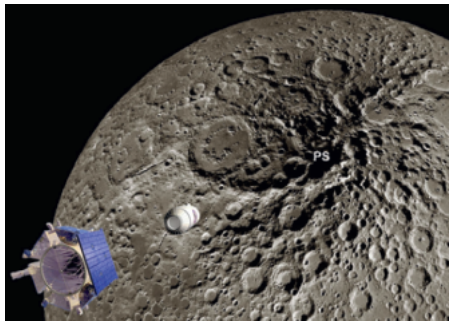




Cette **faille chevauchante** est liée à un raccourcissement
➡ La Lune « *rétrécit* », elle se contracte en se refroidissant.

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.

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

08

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.*

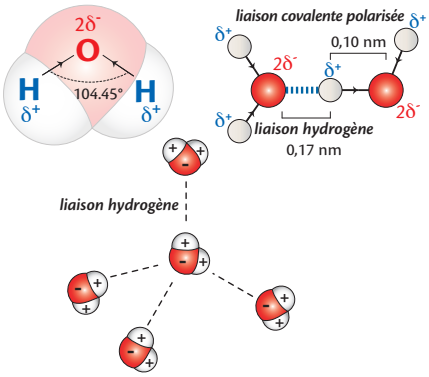
Quelles sont les conditions d'habitabilité d'une (exo)planète ou d'un (exo)satellite ?

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.

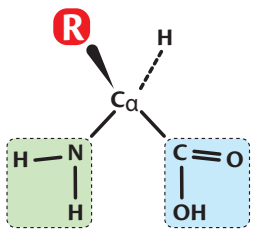
✪ Les briques de base du vivant

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

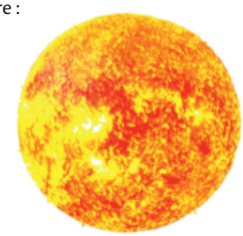


Ci-contre, un acide aminé : certains ont été détectés dans le milieu interstellaire et sur des météorites ainsi que sur la comète Tchouri ! 03

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 **chimiolithotrophie**. Exemple :

$$4\,H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O + \textit{énergie}$$

Or, il y a synthèse d'H_2 si de l'eau est au contact de silicates contenant du Fe^{2+}.

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

✪ Une zone à délimiter autour d'une étoile 04

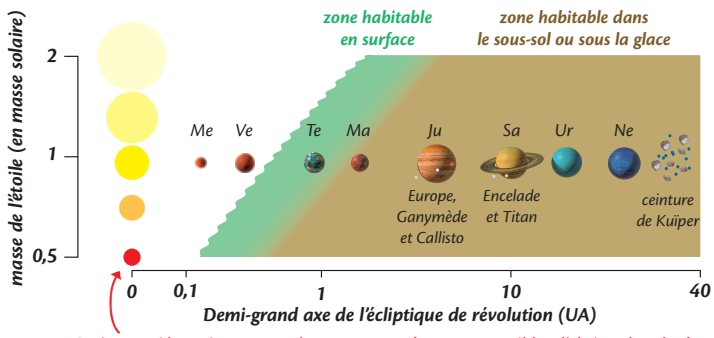
Les zones d'habitabilité superficielle autour d'une étoile

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 chimiolithotrophe. 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'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*).



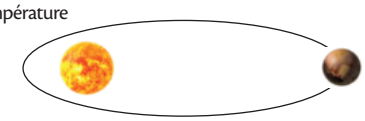
On ignore si les naines rouges (*masse < 0,4 MS*) sont susceptibles d'abriter des planètes ou satellites habitables. C'est une question importante, étant donné que 80% des étoiles de notre galaxie sont de ce type.

Des exemples d'autres paramètres à prendre en compte

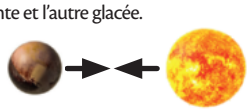
Les paramètres orbitaux de la planète

Deux exemples de situations peu favorables :

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

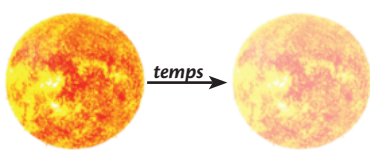


→ **rotation synchrone** : c'est toujours la même face de la planète qui regarde l'étoile, cette face est brûlante et l'autre glacée.



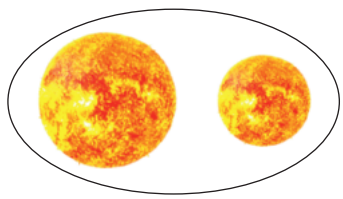
Les variations de luminosité de l'étoile

Elles ne doivent pas être trop importantes.



L'existence de nombreux systèmes doubles

Leur zone habitable superficielle est difficile à décrire.

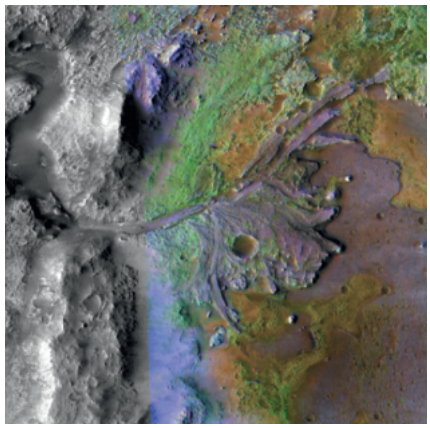


Comme les étoiles se modifient au cours de leur vie, la zone habitable en surface autour d'une étoile se déplace au fil du temps, tendant à s'éloigner de l'étoile.

II - Les possibilités de vie dans le système solaire

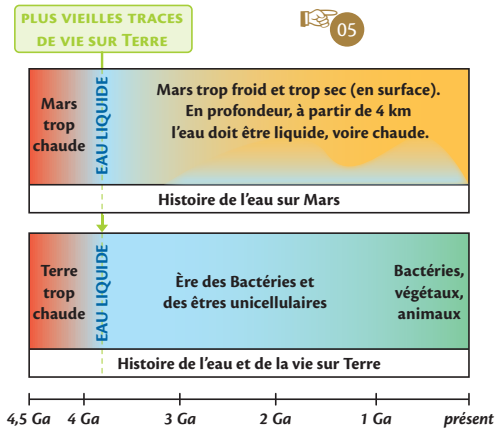
✪ La vie sur Mars

De l'eau liquide sur Mars dans le passé



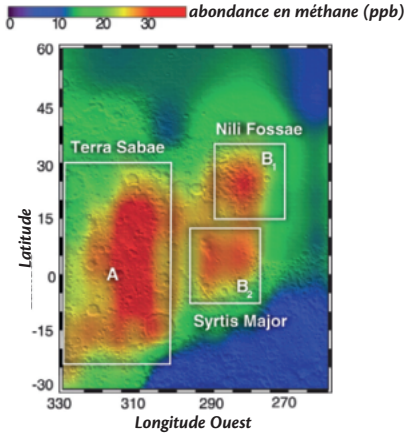
Ancienne vallée martienne terminée par un delta. La couleur verte sur-ajoutée à la photo indique la présence d'argile. Or, pour faire de l'argile, il faut une interaction de longue durée entre de l'eau liquide et des silicates.

Histoire comparée de la Terre et de Mars



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

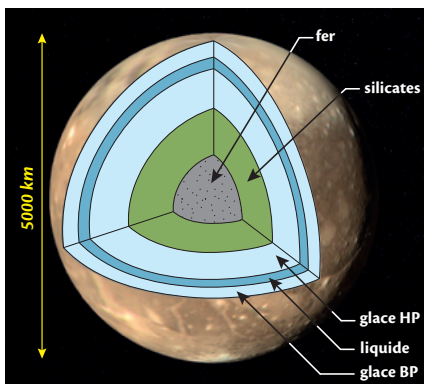
Un exemple d'indice à l'étude



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.

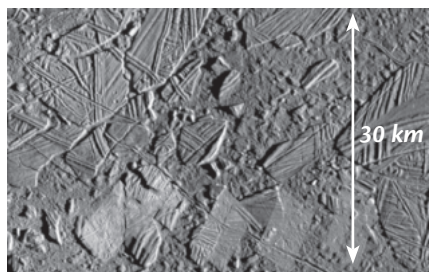
✪ La vie sur divers satellites

Ganymède et Callisto



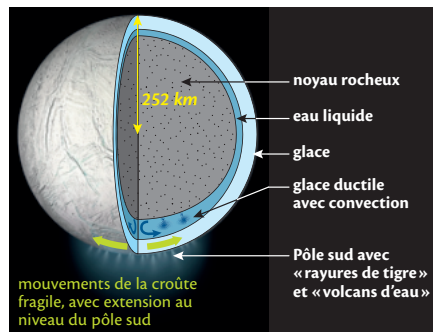
Ganymède et **Callisto** sont des **satellites de Jupiter**. Ils sont constitués d'environ 50% de fer + silicates et de 50% d'eau, cette eau contenant de l'ammoniac et du méthane. Ici, modèle de Ganymède.

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.

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.

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

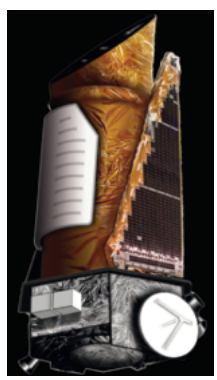
Présence d'une couche d'eau liquide en profondeur, en contact avec des silicates

Titan, satellite de Saturne, possède à sa surface des lacs de méthane liquide à -180°C. On pourrait y envisager des formes de vie totalement différentes, avec le méthane remplaçant l'eau comme solvant…

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



09

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

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

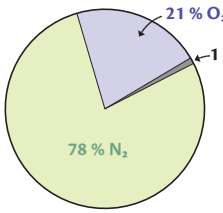
➡ **Thermosphère** :
- Couche caractérisée par une augmentation de la température avec l'altitude due à l'énergie libérée des chocs entre les molécules.
- Réflexion des ondes radios.

➡ **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.

➡ **Stratosphère** :
- 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.



+ H_2O : teneur variable renouvelée en moins de 10 jours (*cycle de l'eau entre atmosphère et hydrosphère*)

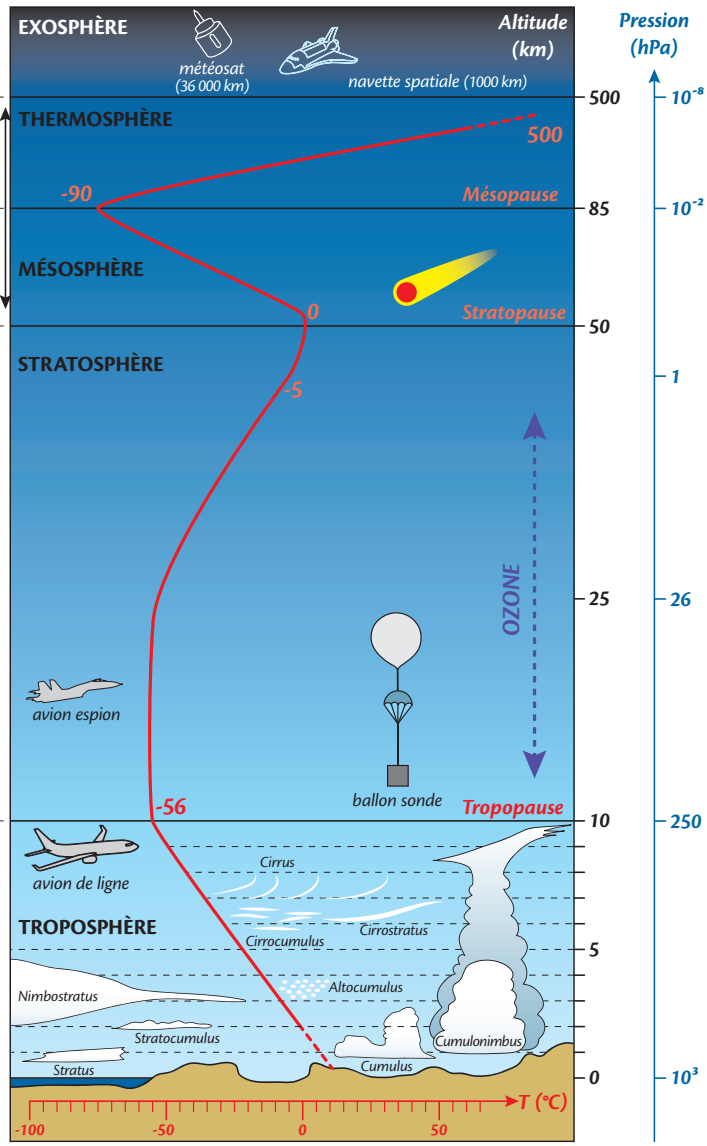
$$RH = \frac{P_{H_2O}}{P_{vapsaturante}}$$

(*dépend de la température*)

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

➡ **Troposphère** :
- 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.

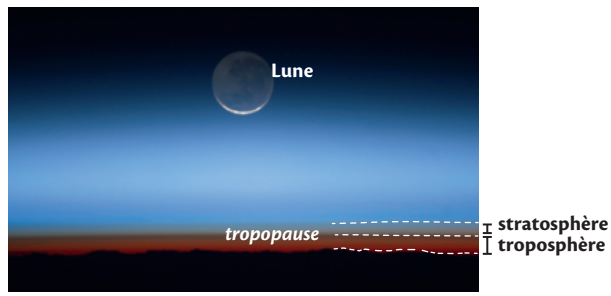
➡ ***Couche-limite atmosphérique*** :
- Sous l'influence directe du sol, siège d'**isothermies** ou d'**inversions de température**.



Observation de la tropopause

➡ **Image prise depuis l'ISS le 31 juillet 2011** :
Les différentes couches (*la troposphère en orangé, la tropopause en marron, 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 !

La géologie est une **science moderne et riche** ! C'est la raison d'être de ce livre ! Il présente les grands concepts de la géologie en **145 fiches illustrées**.

Très peu de texte, plus de **1200 photographies**, **de superbes schémas** et des **extraits de cartes** pointent les éléments importants et les notions essentielles.

En complément de cours classiques, cette 2e édition, entièrement revue, permet d'enrichir vos connaissances à l'aide d'exemples pris dans le **monde entier** – voire dans tout le système solaire !

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

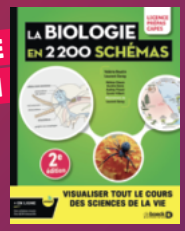
> Étudiants de licence de SV-STU
> Étudiants en classes préparatoires BCPST
> Candidats aux concours de l'enseignement (CAPES, Agrégation)

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 : 978-2-8073-7171-2
9 782807 371712

De Boeck Supérieur s'engage durablement pour l'environnement

www.deboecksuperieur.com

Conception graphique : Primo&Primo®
Photo : istockphoto.com