

Voyage au centre de la Terre et aux confins de l'atmosphère

La **Terre** est une boule solide en rotation, d'un diamètre moyen de 12 750 km, entourée d'une enveloppe gazeuse, l'**atmosphère**. Environ 71 % de sa surface sont recouverts d'eau, le reste consistant en continents et îles de relief varié, très inégalement répartis.

La structure interne de la Terre

Formée il y a environ 4,57 milliards d'années par accréation de météorites, la Terre est constituée d'enveloppes successives d'épaisseurs et de compositions variées, dont les principales sont, en allant de la surface vers le centre, la **lithosphère**, le **manteau** et le **noyau** (figure 1). Ces couches ont été repérées par l'étude de la propagation des **ondes sismiques** qui parcourent le globe terrestre dans toutes les directions, cette détermination étant fondée sur le fait que la vitesse d'une onde sismique se modifie brutalement et de façon importante lors d'un changement de milieu. Cette méthode a permis de déterminer l'état de la matière à des profondeurs que l'homme ne peut atteindre.

La **lithosphère** (0 à 100 km), partie superficielle du globe, est divisée en plusieurs segments rigides, ou **plaques tectoniques**, qui se déplacent sur la matière **visqueuse** de la zone supérieure du manteau supérieur ou **asthénosphère** et sont constamment en mouvement. Constituée de la **croûte** et d'une partie du **manteau supérieur**, sa profondeur varie de 100 km sous les océans à 300 km sous les continents. La **croûte continentale** solide, majoritairement granitique⁽¹⁾ et surmontée par endroits de roches sédimentaires⁽²⁾, est d'une épaisseur égale en moyenne à 30 km sous les continents et qui peut atteindre 100 km sous les massifs montagneux. La **croûte océanique** solide, essentiellement

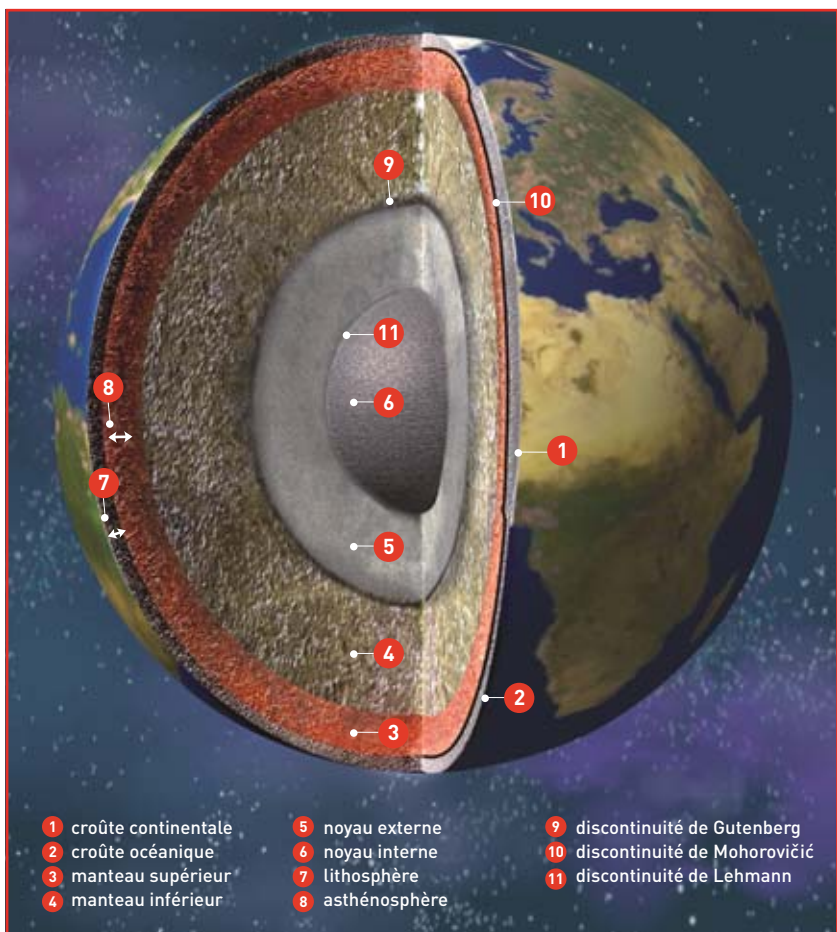
Suite page 22

(1) Granite: roche dense magmatique formée de cristaux visibles à l'œil nu, principalement du quartz (SiO₂ ou silice), des micas (minéraux formés essentiellement de silicate d'aluminium et de potassium), des feldspaths potassiques (KAlSi₃O₈) et des plagioclases sodiques (NaAlSi₃O₈).

(2) Roches sédimentaires: roches résultant de l'accumulation et du compactage de débris d'origine minérale (dégradation d'autres roches), organique (restes de végétaux ou d'animaux, fossiles), ou de précipitation chimique.



La Terre est recouverte d'eau sur environ 71 % de sa surface.



- | | | |
|-----------------------|-----------------|---------------------------------|
| 1 croûte continentale | 5 noyau externe | 9 discontinuité de Gutenberg |
| 2 croûte océanique | 6 noyau interne | 10 discontinuité de Mohorovičić |
| 3 manteau supérieur | 7 lithosphère | 11 discontinuité de Lehmann |
| 4 manteau inférieur | 8 asthénosphère | |

Figure 1. Structure interne de la Terre.

MÉMO A



Coulée de lave à Hawaï. Le magma remonte des entrailles de la Terre et jaillit sous forme de lave.

Suite de la page 21

composée de roches **basaltiques**, est relativement fine (d'une épaisseur de l'ordre de 6 à 8 km). La croûte ou écorce représente environ 1,5 % du volume terrestre. La **partie supérieure** et solide du **manteau**, formée de **péridotites**⁽³⁾, possède également une épaisseur variable selon qu'elle se trouve sous un océan ou un continent. La zone de transition entre la croûte et le manteau, découverte en 1909 par le géophysicien et sismologue croate Andrija Mohorovičić est appelée **discontinuité de Mohorovičić** ou **Moho**.

Le **manteau supérieur** (100 à 670 km), composé principalement de péridotites, est plus visqueux que le **manteau inférieur** (670 à 2900 km), formé essentiellement de pérovskites⁽⁴⁾, car les contraintes physiques qui y règnent le rendent liquide en partie. Le manteau inférieur n'est pas

liquide, comme pourraient le laisser supposer les coulées de **lave** de certaines **éruptions volcaniques**, mais il est moins "dur" que les autres couches. Il présente les propriétés d'un solide élastique. Le manteau, dont la température est supérieure à 1200 °C, représente environ 84 % du volume terrestre. La zone de transition entre le manteau et le noyau a été localisée à 2900 km de profondeur en 1912 par le sismologue allemand Beno Gutenberg, d'où le nom de **discontinuité de Gutenberg**.

Le **noyau externe** (2900 à 5100 km) liquide est essentiellement composé de fer (environ 80 %), de nickel et de quelques **éléments** plus légers. Ce noyau métallique, dont la fluidité a été établie en 1926 par le géophysicien et astronome britannique Harold Jeffreys, présente une viscosité proche de celle de l'eau, une température moyenne de 4000 °C et une densité de 10. Les mouvements de **convection** de cette énorme quantité de métal en fusion, liés à la rotation de la Terre, sont à l'origine du champ magnétique terrestre.

Le **noyau interne** – ou **graine** – (5100 à 6378 km) a été découvert en 1936 par la sismologue danoise Inge Lehmann. Essentiellement métallique, il est formé

par **crystallisation** progressive du noyau externe. La pression le maintient dans un état solide et à une densité d'environ 13, malgré une température supérieure à 5000 °C. La zone de transition entre le noyau externe et le noyau interne est appelée **discontinuité de Lehmann**. Le noyau représente environ 15 % du volume terrestre.

Au cœur de la planète, des éléments **radioactifs** (potassium, **uranium**, **thorium**) se **désintègrent**, ce qui génère une chaleur importante. Celle-ci fournit aux différentes couches l'énergie nécessaire à leurs déplacements et permet à la roche en fusion (**magma**) de remonter de l'intérieur de la Terre. Une partie du magma se solidifie au contact plus froid de la croûte terrestre, alors qu'une partie jaillit à la surface sous forme de lave.

L'atmosphère terrestre

Enveloppe gazeuse entourant la Terre et maintenue près de la surface grâce à la force gravitationnelle, l'atmosphère est indispensable à la vie. Elle contient l'air que nous respirons, protège toutes les formes de vie contre les radiations dangereuses du Soleil grâce à sa couche d'**ozone**, est un élément majeur dans le

(3) Péridotite: roche issue d'un refroidissement lent du magma et formée de grains visibles à l'œil nu. Elle est principalement composée d'olivine, de pyroxène et d'amphibole (minéral hydraté caractérisé par l'**anion** $[\text{Si}_4\text{O}_{11}(\text{OH})]^{7-}$).

(4) Pérovskite: du nom du minéralogiste russe L. A. Perowski, structure **crystalline** commune à de nombreux oxydes de formule générale ABO_3 . Les pérovskites présentent des propriétés électriques et magnétiques variées en fonction de la nature de A et de B.

cycle de l'eau et contribue à adoucir de manière notable la température moyenne à la surface du globe grâce à l'**effet de serre** qu'elle génère (Mémo C, *Gaz à effet de serre et aérosols au cœur du débat sur le changement climatique*, p. 66). En effet, en l'absence d'atmosphère, la température avoisinerait -18 °C au lieu des 15 °C observés. L'air atmosphérique se compose d'un mélange de gaz (tableau) contenant des particules liquides (gouttelettes d'eau...) et solides (cristaux de glace, poussières, cristaux salins...) en suspension, la plus grande part de sa masse étant proche de la surface. Au niveau de la mer, la pression atmosphérique est de 1013,25 hPa. Les **molécules** de gaz se raréfient en altitude et la pression diminue. L'atmosphère est donc de moins en moins dense quand l'altitude augmente, jusqu'à ce qu'elle se "mélange" avec l'espace lointain. L'atmosphère est constituée de plusieurs couches au sein desquelles la température évolue différemment en fonction de l'altitude : la **troposphère**, la **stratosphère**, la **mésosphère** et la **thermosphère** (figure 2). Dans la **troposphère** (de la surface du globe à 8 km aux pôles et 15 km à l'équateur), la température décroît rapidement avec l'altitude, de l'ordre de 6,4 °C par km. Elle évolue en moyenne entre 20 °C au sol et -60 °C au niveau de la limite supérieure de la zone. Cette couche contenant de 80 à 90 % de la masse totale de l'air et la quasi-totalité de la vapeur d'eau, la pression et la densité y sont maximales. C'est là que se produisent la plupart des phénomènes météorologiques (formation des nuages, pluies...) et les mouvements atmosphériques horizontaux et verticaux (convection thermique, vents). Dans la couche supérieure de la troposphère, appelée **tropopause**, la température se renverse et commence à augmenter. Sa hauteur varie des pôles jusqu'à l'équateur, mais aussi selon les saisons. Dans la **stratosphère** (de 8-15 km à 50 km), la température, constante dans les premiers kilomètres, croît ensuite lentement puis beaucoup plus rapidement avec l'altitude jusqu'à 0 °C. Cette région abrite vers 25 km d'altitude une bonne partie de la **couche d'ozone**. L'ozone est fabriqué par l'action du rayonnement solaire sur les molécules d'oxygène. La couche d'ozone sert de bouclier protecteur en absorbant le **rayonnement ultraviolet** en provenance du Soleil, ce qui entraîne un réchauffement. C'est dans la stratosphère que se produit la diffraction

Suite page 24

gaz	volume (ppmv)	
azote (N ₂)	780 840	(78,084 %)
oxygène (O ₂)	209 460	(20,946 %)
argon (Ar)	9 340	(0,934 %)
dioxyde de carbone (CO₂)	382	(0,038 2 %)
néon (Ne)	18,18	
hélium (He)	5,24	
méthane (CH₄)	1,745	
krypton (Kr)	1,14	
hydrogène (H ₂)	0,55	
oxyde nitreux (N₂O)	0,30	
ozone (O₃)	0,04	
vapeur d'eau (H₂O)	de 1 % (dans les régions polaires) à 4 % (dans les régions équatoriales) (très variable)	

Tableau. Composition de l'atmosphère au voisinage de la surface de la Terre. Du point de vue thermodynamique, l'air atmosphérique est considéré comme un mélange de deux gaz : l'air sec et la vapeur d'eau. Les **gaz à effet de serre** apparaissent en violet. Les concentrations en CO₂ s'élevaient à 280 ppmv en 1800 et à 345 ppmv en 1998.

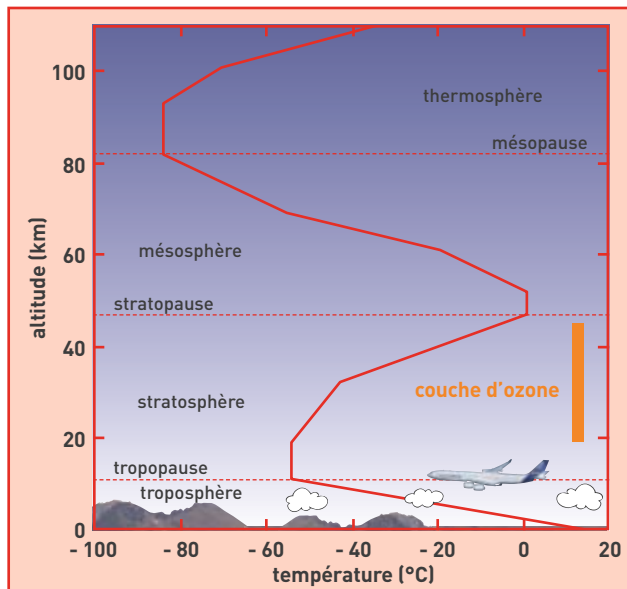
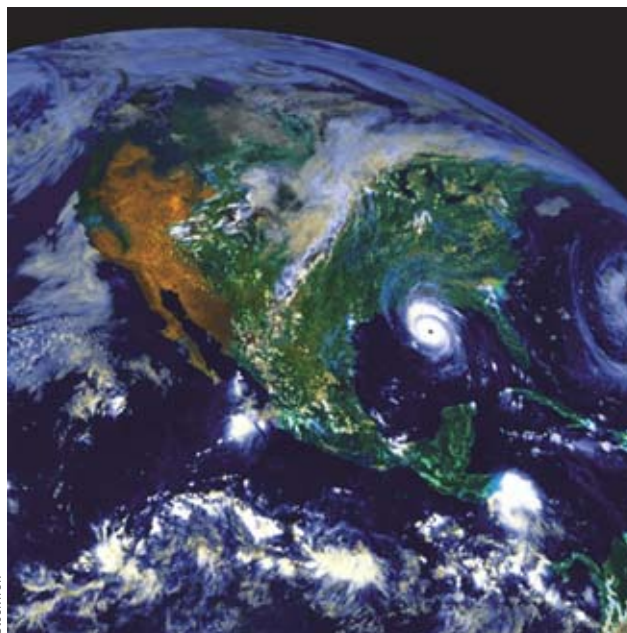


Figure 2. Les couches de l'atmosphère. Leurs limites ont été fixées selon les discontinuités dans les variations de la température, en fonction de l'altitude.



L'essentiel des phénomènes météorologiques ont lieu dans la troposphère, zone où la pression et la densité sont maximales.

MÉMO A



StockTrek



C. Morel/Our Polar Heritage

Les aurores polaires, ici une boréale, résultent de l'interaction entre les particules du vent solaire et la haute atmosphère. Elles se produisent dans l'ionosphère, région caractérisée par une concentration importante de particules chargées électriquement.

La stratosphère abrite une bonne partie de la couche d'ozone qui sert de bouclier protecteur contre les rayons nocifs du Soleil.

Suite de la page 23

des rayons lumineux de courtes longueurs d'ondes par les molécules d'air – d'où la couleur bleue du ciel diurne – et que sont observés des vents violents atteignant des vitesses de 200 à 300 km/h. Dans la couche supérieure de la stratosphère, appelée **stratopause**, la température commence à redescendre.

Dans la **mésosphère** (de 50 km à 80 km), la température chute rapidement avec l'altitude jusqu'à - 80 °C. Couche la plus froide de l'atmosphère, c'est généralement dans cette zone que les météorites se consomment lorsqu'elles entrent dans l'atmosphère. Dans la couche supérieure de la mésosphère, appelée **mésopause**, la température recommence à augmenter.

Dans la **thermosphère** (de 80 km à 350-800 km), la température croît de nouveau avec l'altitude, bien au-delà de 1 000 °C. Ce réchauffement résulte de la forte absorption par l'oxygène du rayonnement ultraviolet en provenance du Soleil. Dans cette zone, les températures sont élevées mais la densité est extrêmement faible et il y règne une pression très faible. Les molécules d'oxygène se divisent en deux **atomes** d'oxygène. La limite supérieure de cette couche est nommée **thermopause**.

Outre la température, d'autres critères peuvent être utilisés pour définir différentes couches dans l'atmosphère.

L'**ionosphère**, qui occupe la même région que la thermosphère, est caractérisée par une concentration importante de particules chargées électriquement. Dans cette zone, l'énergie solaire est si forte qu'elle "casse" les molécules d'air, donnant des **ions** et des **électrons libres**. Cette couche présente la propriété de réfléchir les **ondes radio**. Une partie de l'énergie émise par un émetteur radio est absorbée par l'air ionisé et l'autre est réfléchi vers le bas, permettant ainsi l'établissement de communications entre différents points du globe parfois très éloignés les uns des autres. C'est dans l'ionosphère que les **aurores** se produisent. Située vers 60-70 km d'altitude, la **neutropause** sépare l'ionosphère de la **neutrosphère**, région inférieure de l'atmosphère où la concentration des électrons est insignifiante.

Dans l'**exosphère** (de 350-800 km à 50 000 km), région au-delà de l'ionosphère, les lois de la physique des gaz ne s'appliquent plus. Les molécules se dispersent et se raréfient avec l'altitude. Les plus légères et les plus agitées d'entre elles peuvent alors échapper à l'attraction terrestre et disparaître à jamais dans l'espace interstellaire. C'est dans cette couche que la plupart des satellites sont placés en orbite.

Vers 2 000 km d'altitude, les ions constituent la majorité des particules présentes. Ils sont dans la **magnétosphère** où le magnétisme terrestre supplante la gravitation. Cette région, composée principalement de **protons**, est également appelée **protosphère**. La magnétosphère agit comme un écran et protège la surface terrestre des effets nocifs du vent solaire.

De même, en prenant pour critère les changements de composition de l'air suivant la verticale, l'atmosphère peut être divisée en deux zones : l'**homosphère** (de la surface du globe à 80 km d'altitude), où la composition de l'air sec varie très peu, et l'**hétérosphère** située au-dessus. Le niveau à partir duquel la composition de l'air change de manière significative est appelé **homopause**.

➤ Nous remercions Yannick Donnadiou du LSCE pour sa relecture attentive de ce texte.