

FLUORESCIENCES

Géologie

Géol

Sous la direction de
Anne-Sophie Krémeur

Aude Vincent

Nicolas Coltice

DUNOD

Conception graphique de la couverture : Hokus Pokus Créations
Création graphique de la maquette intérieure : Marse
Les illustrations de cet ouvrage ont été mises en forme par Bernadette Coléno.

© Dunod, 2019

11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-080109-1

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Table des matières

Mode d'emploi	VI
Les selfies des auteurs	VIII
Remerciements	IX
Avant-propos	1

PARTIE 1

LES ENVELOPPES FLUIDES EXTERNES ACTUELLES

CHAPITRE 1	L'ATMOSPHÈRE ET L'OcéAN	6
1	L'atmosphère	8
2	L'océan	18
3	Les interactions entre atmosphère et océan	27
CHAPITRE 2	L'HYDROSPHÈRE CONTINENTALE ET LA CRYOSPHÈRE	36
1	Le cycle de l'eau	38
2	L'hydrosphère continentale	40
3	La cryosphère	46
CHAPITRE 3	ENTRE ROCHES ET FLUIDES : LES SÉDIMENTS	54
1	L'interface entre enveloppes fluides et solides	56
2	La nature des sédiments et des roches sédimentaires	59
3	Du sédiment au dépôt	64
4	Le devenir des sédiments après leur dépôt	73

PARTIE 2

LA TERRE INTERNE ACTUELLE

CHAPITRE 4	LA FORME DE LA TERRE	80
1	Les variations d'élévation et leurs origines	82
2	La forme de la Terre modelée par les forces de gravité	89
CHAPITRE 5	SISMOLOGIE ET STRUCTURE DU GLOBE	96
1	Comment accéder à la structure interne de la Terre	98
2	Éléments de sismologie	100
3	La Terre formée de couches hétérogènes	109
CHAPITRE 6	LA COMPOSITION DE LA TERRE : OBSERVATIONS ET PÉTROLOGIE EXPÉRIMENTALE	118
1	Analyser les roches observées à la surface de la Terre	120
2	Modéliser la composition chimique des enveloppes internes	132
3	La composition minéralogique du manteau et du noyau	139
CHAPITRE 7	LA DYNAMIQUE INTERNE	148
1	Le champ magnétique de la Terre	150
2	La convection du manteau terrestre	161

LES GRANDS ENSEMBLES GÉOLOGIQUES

CHAPITRE

8

LA TECTONIQUE DES PLAQUES 176

1 De la dérive des continents à l'expansion des fonds océaniques 178

2 La tectonique des plaques : théorie et applications 186

3 Plaque et lithosphère 194

4 Un cadre global pour les aléas et les risques 198

CHAPITRE

9

LES RIFTS CONTINENTAUX ET LES DORSALES 206

1 Les rifts continentaux 208

2 Dorsales et lithosphère océanique 215

3 La synthèse géodynamique 225

CHAPITRE

10

LES CHAÎNES DE MONTAGNES 232

1 Les chaînes de subduction 234

2 Les chaînes de collision 241

3 La synthèse géodynamique 249

HISTOIRE DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

CHAPITRE

11

LA FORMATION DU SYSTÈME SOLAIRE 258

1 La formation des éléments chimiques 260

2 La formation des planètes 267

CHAPITRE

12

LA DIFFÉRENCIATION DE LA TERRE ET DES PLANÈTES
TELLURIQUES 276

1 Séparer les matériaux pour former des couches 278

2 Former le manteau et le noyau 282

3 La formation de la croûte 283

4 La formation des enveloppes externes 286

CHAPITRE

13

LES VARIATIONS DU CLIMAT 292

1 Évolution de la température au cours du temps et problématique 294

2 Variations du climat à l'échelle des temps géologiques 296

3 Variations du climat à l'échelle plurimillénaire 304

4 Variations du climat à l'échelle humaine 309

CHAPITRE

14

LA PLANÈTE TERRE ET LE VIVANT 318

1 L'étude de l'évolution du vivant 320

2 Des archives parcellaires : modes de fossilisation 325

3 Les différents profils fossilifères au cours des temps géologiques 331

4 Les crises biologiques 347

RESSOURCES NATURELLES ET IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

CHAPITRE

15

L'EAU COMME RESSOURCE	356
1 L'exploitation des eaux souterraines	358
2 La protection des eaux souterraines	359
3 La consommation des eaux de surface	362
4 La pollution des cours d'eau et des lacs	363
5 L'utilisation des eaux de surface pour produire de l'énergie électrique	365
6 L'exploitation de l'énergie géothermique	367

CHAPITRE

16

LES RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES CARBONÉES FOSSILES	372
1 Les charbons	374
2 Le pétrole	381
3 Le gaz naturel	385
4 Les gaz et huiles de schiste	387

CHAPITRE

17

LES ROCHES, DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION	392
1 Les roches peu ou pas transformées	394
2 Les roches remodelées	398
3 Les ressources minérales	403
4 Le patrimoine géologique français	407
Corrigés	413
Bibliographie	423
Index	425
Crédits iconographiques	435

Les selfies des auteurs

Anne-Sophie Krémeur



Je suis professeure agrégée à l'université de Bordeaux et docteure en océanographie. Formée à l'université de Tours puis à l'École Normale Supérieure de Paris, j'enseigne aujourd'hui les sciences de la Terre en licence et en master. J'ai également eu l'opportunité d'enseigner en licence 1 au sein de Sorbonne Université (Paris) et de l'université Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines. Responsable de la préparation à l'agrégation, je prépare les étudiants aux concours de l'enseignement. Dans le cadre de ma recherche, j'ai développé un modèle numérique de l'océan Atlantique nord couplant physique et biogéochimie et, j'ai également eu le plaisir de partir étudier l'océan Atlantique et l'océan Indien lors de campagnes océanographiques.

Aude Vincent



Je suis enseignante-chercheuse en hydrogéologie, actuellement en poste à l'ENSEGID, Bordeaux-INP. J'ai obtenu mon doctorat en sciences de l'eau à Sorbonne Université (Paris), pour un travail mené en collaboration avec une ONG indienne. J'ai enseigné la géologie, notamment l'hydrogéologie et la paléontologie à l'université d'Avignon. Je m'intéresse aux impacts anthropiques sur les ressources en eau, plus particulièrement à l'exploitation des aquifères côtiers et aux eaux souterraines liées aux glaciers. Mes travaux de recherche allient données de terrain, modélisation numérique et collaboration avec des acteurs sociaux. Je suis également éditrice associée à *Hydrogeology Journal*.

Nicolas Coltice



Je suis professeur des universités à l'École Normale Supérieure de Paris, et directeur des études du département Géosciences. Mes recherches portent sur la dynamique interne de la Terre et ses liens avec la surface (tectonique, cycles géochimiques, environnement). Pendant quinze années, j'ai enseigné en licence 1 à l'université de Lyon 1, construisant au fil des ans des amphithéâtres actifs et inversés. J'ai été coresponsable de la licence 1 Sciences de la Terre et, j'ai également contribué au projet pédagogique geosciences3d.univ-lyon1.fr à la frontière lycée-université. Enfin, j'ai dirigé le service Innovation Conception et Accompagnement pour la Pédagogie de l'université de Lyon 1, dont l'objectif est la modernisation et l'amélioration de la qualité des enseignements.

Remerciements

Cet ouvrage a bénéficié d'échanges riches et structurants sur la géologie comme sur la pédagogie. Nous souhaitons remercier sincèrement toutes les personnes qui nous ont aidés collectivement et individuellement à construire cet ouvrage.

Pour la validation de la table des matières et la relecture attentive et constructive des chapitres, nous remercions chaleureusement Christophe Guégo, Cyril Langlois, Sophie Violette, Guillaume Lehir, Nicolas Olivier, François Maricourt, Brendan Alligand, Matthieu Roy-Barman, Antoine Marache, Olga Otero et Mathieu Rodriguez.

Nous souhaitons également remercier les auteurs de l'ouvrage « *Éléments de géologie* », Maurice Renard, Yves Lagabrielle, Erwan Martin et Marc de Rafélis, pour avoir accepté que nous utilisions certaines de leurs figures.

Nous remercions également et, plus personnellement : (*Anne-Sophie Krémeur*) les collègues avec lesquels j'ai échangé ; Isabelle Dordan, Hervé Martin, Michel Faure, Laurent Remusat et Jean-Michel Dupin pour nos échanges très enrichissants, pour une vision en hauteur des sciences de la Terre et votre grande humanité ; (*Aude Vincent*) l'équipe TICE de l'université d'Avignon pour les ateliers et discussions pédagogiques ; (*Nicolas Coltice*) les collègues qui ont enseigné avec moi en L1 et avec qui j'ai construit mes cours, notamment Nicolas Olivier et Vincent Perrier ; Agnès Rivière, Frédéric Urien, Tom Rivière, Françoise Morel-Delville, Thierry Lhuillier et Nora van Reeth de Géosciences 3D ; et Patrice Thiriet et Edward Garnero, qui m'ont beaucoup inspiré à travers leurs approches pédagogiques.

Pour avoir expérimenté les contenus de nos enseignements et nos pratiques, nous souhaiterions remercier les étudiant.e.s de licence et des préparations aux concours de l'enseignement de l'université de Bordeaux, les étudiant.e.s de L1 et L2 sciences de la vie et de la terre et L3 sciences de la Terre et de l'eau de l'université d'Avignon de 2015 à 2017 et, les étudiant.e.s de l'université de Lyon 1, avec lesquels nous avons interagi.

Enfin, nous souhaitons remercier nos proches, qui ont fait preuve de patience et d'un soutien *sans faille* (oui, on ne peut pas s'en empêcher !) tout au long de la réalisation du projet.

Avant-propos

Pourquoi la géologie ?

La géologie est-elle la science des *cailloux* ? C'est sans nul doute ce que l'on nous répond quand on dit qu'on enseigne la géologie. Étymologiquement, la géologie est la contraction du grec ancien *gê*, la Terre, et *logos*, le discours. Elle a vocation à décrire la planète Terre et à expliquer les processus qui l'animent. La géologie est avant tout une **science**, c'est-à-dire qu'elle se base sur des observations et des calculs pour élaborer des modèles ou des théories. Elle s'appuie sur des **principes** qui lui sont propres ainsi que sur les **lois de la physique et de la chimie**. La géologie est une **science interprétative** dont l'objectif est de reconstituer l'état initial de l'objet étudié et son histoire, à partir de l'étude de l'état final observé. La géologie cherche à comprendre les processus actuels, à reconstituer l'histoire passée de la Terre à partir de l'étude des roches et d'autres archives ou marqueurs géologiques, et à prévoir le futur grâce à des modèles. Elle s'inscrit donc dans tout le spectre temporel, de la formation de l'Univers aux siècles à venir. D'un point de vue spatial, la géologie s'intéresse aux échelles de l'atome, de la roche, de l'affleurement, de la région jusqu'à l'échelle de la planète.

Qu'est-ce qu'une planète ? Qu'est-ce qu'une étoile ? Quand la Terre et l'Univers se sont-ils formés ? Pourquoi existe-t-il des reliefs sur Terre ? Pourquoi existe-t-il une telle diversité de paysages ? De quoi est constituée la planète Terre ? Que révèle cette roche ? D'où provient le champ magnétique terrestre ? À quoi sont dus les séismes ? Quelle est l'origine de la dynamique terrestre ? Comment varie le climat ?

Toutes ces questions relèvent du **champ scientifique de la géologie**. Si les penseurs de l'Antiquité s'interrogeaient déjà sur la planète Terre et l'Univers, les plus anciennes disciplines de la géologie dans son sens moderne – pétrologie, stratigraphie, paléontologie – datent du ^{xvii}e et du ^{xviii}e siècles. D'autres sont bien plus récentes et se sont développées aux ^{xix}e et ^{xx}e siècles – sismologie, géochimie, géophysique, géosciences marines, océanographie, climatologie, hydrologie.

En outre, connaître le fonctionnement de la planète Terre est sans aucun doute un moyen de mieux comprendre le monde contemporain et ses **enjeux sociétaux, environnementaux et géopolitiques** : survenue des séismes, volcanismes, cyclones et risques associés, accès à l'eau, changement climatique, besoin en ressources naturelles, matériaux de construction, pollutions, etc. C'est également un moyen de guider les citoyens à préparer une société éduquée et responsable. Face au développement des *mass media*, des *fake news*, du scepticisme généralisé, du complotisme, le citoyen doit pouvoir faire le tri entre ce qui relève du scientifique ou du chimérique.

Les objectifs de l'ouvrage

L'objectif premier de l'ouvrage est d'offrir une **synthèse scientifique et méthodologique** de la géologie, en se basant sur les connaissances et les compétences acquises en Terminale.

Le deuxième objectif est d'assimiler la **démarche scientifique**, qui passe par une argumentation cartésienne. Pour ce faire, nous avons eu à cœur de présenter les **moyens d'études** et les **données** acquises sur le terrain, en laboratoire ou encore grâce à la modélisation. Explorer les fonds marins, comprendre la dynamique interne de la Terre ou encore prédire le changement climatique futur, sont autant de **défis scientifiques et technologiques** parmi d'autres que nous avons développés. Nous avons également montré les **incertitudes** qui sont inhérentes à toute science. L'enjeu scientifique est essentiel car le scientifique doit pouvoir montrer quels sont les chemins qu'il a suivis dans sa démonstration. C'est ainsi que la **connaissance** scientifique se distingue des **croyances**.

Le troisième objectif est un des objectifs fondamentaux de la licence, qui est d'acquérir le champ lexical propre à chaque discipline scientifique. La géologie a développé son propre **vocabulaire** pour *contraindre* (définir, déterminer) les objets et processus géologiques, tout en s'appuyant sur le vocabulaire de la physique et la chimie. C'est pourquoi nous avons cherché à employer ce vocabulaire, les expressions courantes et à le rendre accessible. Si le volume de nouveaux mots à apprendre en première année universitaire peut *au premier ordre* (au premier abord, de manière générale) amener une certaine réticence, il est *au deuxième ordre* un élément essentiel de notre communication et également une grande source de plaisanteries. *J'ai décroché ! Je subside. Mes cours se stratifient sur mon bureau. Cela ne fait pas un pli !*

Enfin, le dernier objectif, et pas des moindres, est celui de développer votre **curiosité** et de vous transmettre notre **passion** commune de l'étude de la planète Terre. La passion de la matière, la passion de l'enseigner et de la transmettre.

Quels publics visés ?

Cet ouvrage est à destination des **étudiants en première année universitaire**, en L1 et en I.U.T. Les **candidats aux concours du CAPES et de l'agrégation** de sciences de la vie, de la Terre et de l'Univers y verront également un moyen d'apprendre et d'asseoir leurs bases en géologie. Les rapports du jury rappellent, depuis plusieurs décennies, que la maîtrise des connaissances de base fait souvent défaut aux candidats.

Nous vous encourageons à travailler régulièrement la matière, en vous détachant autant que possible du rythme imposé par les examens de fin de semestre. Les sciences cognitives ont en effet montré que les connaissances apprises au dernier moment ne permettent pas d'intégrer la mémoire à long terme. La meilleure stratégie est sans nul doute de lire six à sept fois un chapitre ou son cours, de manière espacée sur le semestre pour investir sur l'avenir.

Comment s'articule l'ouvrage ?

La table des matières a été construite pour répondre à une double exigence. Premièrement, celle de balayer l'ensemble des **programmes des universités** de France de la première année universitaire. Pour cela, nous avons récolté et synthétisé les programmes d'un grand nombre d'universités françaises. Deuxièmement, celle de se focaliser sur l'étude des **objets géologiques et de leurs histoires**. Les différentes

disciplines des sciences de la Terre (pétrologie, géochimie, etc.) sont donc abordées transversalement dans l'ouvrage. La première et la deuxième parties introduisent les enveloppes fluides externes et la Terre interne actuelles. La troisième partie développe la théorie de la tectonique des plaques et l'étude des grands ensembles géologiques. La quatrième partie explique l'histoire de la Terre et de l'Univers et le lien avec le vivant. Enfin, la cinquième partie présente les ressources naturelles et leurs impacts environnementaux.

Nous espérons que cet ouvrage sera un bon compagnon d'apprentissage et qu'il vous permettra de réussir votre projet universitaire et professionnel.



Cette image de la planète Terre vue de l'espace révèle toute sa singularité : la présence d'eau sous toutes les formes physiques (liquide, solide et gazeuse). L'eau est un élément constitutif de l'hydrosphère océanique et continentale, de la cryosphère et de l'atmosphère. Ces réservoirs sont les enveloppes fluides externes, éléments clés du système climatique terrestre, dont dépend étroitement le vivant.

Les enveloppes fluides externes actuelles

CHAPITRE

1

L'atmosphère et l'océan _____ 6

CHAPITRE

2

L'hydrosphère continentale et la cryosphère _____ 36

CHAPITRE

3

Entre roches et fluides : les sédiments _____ 54

L'atmosphère et l'océan

Pour bien démarrer

1. La chimie de l'atmosphère est majoritairement représentée par :
 - ☐ a. le diazote
 - ☐ b. le dioxygène
 - ☐ c. le dioxyde de carbone
2. L'atmosphère est une enveloppe fluide externe épaisse de :
 - ☐ a. 3 km
 - ☐ b. 15 km
 - ☐ c. 100 à 700 km
3. Les gaz à effet de serre agissent dans l'atmosphère comme les surfaces vitreuses d'une serre horticole.
 - ☐ a. Vrai
 - ☐ b. Faux
4. La dynamique de l'océan est aussi rapide que celle de l'atmosphère.
 - ☐ a. Vrai
 - ☐ b. Faux
5. Les moteurs de la circulation océanique sont :
 - ☐ a. la force de friction exercée par les vents
 - ☐ b. la force de Coriolis
 - ☐ c. les échanges de chaleur entre l'océan et l'atmosphère
 - ☐ d. la convection du manteau terrestre

Réponses page 413

Objectifs de ce chapitre

- Connaître les caractéristiques physiques et chimiques actuelles de l'atmosphère et de l'océan.
- Identifier les moyens d'étude de l'atmosphère et de l'océan.
- Caractériser les dynamiques de ces deux enveloppes fluides externes.
- Connaître le cycle du carbone à courte échelle de temps.
- Comprendre les interactions entre atmosphère et océan.

CHAPITRE

1



Mission en mer dans l'océan Atlantique.

La première expédition qui a initié l'océanographie moderne a eu lieu à bord du navire Challenger de 1872 à 1876. Depuis les années 1960, soit un peu plus d'un siècle après le début de la période instrumentale (1850), le nombre de missions en mer a augmenté ce qui a permis de mieux comprendre l'océan ainsi que ses interactions avec l'atmosphère. En parallèle, le développement accru de moyens d'étude de l'océan comme de l'atmosphère a conduit à une meilleure compréhension de l'organisation et du fonctionnement de ces enveloppes fluides externes.

1 L'atmosphère



■ L'atmosphère terrestre vue du ciel.

Dans cette première section, nous allons déterminer l'état moyen de l'atmosphère, de ses caractéristiques physiques et chimiques à sa dynamique.

Définitions

L'**atmosphère** est l'enveloppe fluide externe essentiellement gazeuse d'une hauteur d'environ 100 km (allant jusqu'à 700 km) et qui se trouve directement en contact avec la croûte terrestre, l'hydrosphère et la biosphère. L'**état moyen** de l'atmosphère correspond à la moyenne des paramètres météorologiques de l'atmosphère (température, pression, vent, humidité) pour un intervalle de temps donné. L'état moyen dépend de l'échelle de temps considéré : il peut être mensuel, annuel, etc. et, donne les caractéristiques générales du système, en négligeant les variations de courtes durées.

Méthode Comment étudier les enveloppes fluides externes ?

Connaître les paramètres physiques et chimiques qui définissent l'atmosphère terrestre actuelle implique la mise en œuvre de moyens d'étude très divers (figure 1.1) comme l'enregistrement de mesures atmosphériques ou satellitaires et l'établissement de modèles. Dans l'atmosphère, on distingue les mesures eulériennes, à partir d'un point fixe correspondant souvent à la surface (stations météorologiques, LIDAR), des mesures lagrangiennes, à partir d'un instrument en mouvement et pouvant suivre les masses d'air (avion, ballon-sonde). L'approche interdisciplinaire implique qu'un consortium de scientifiques aux compétences diverses travaille ensemble au sein d'un même laboratoire, comme par exemple en France le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement de Gif-sur-Yvette, et au sein d'une fédération de laboratoires, comme l'Institut Pierre-Simon-Laplace.

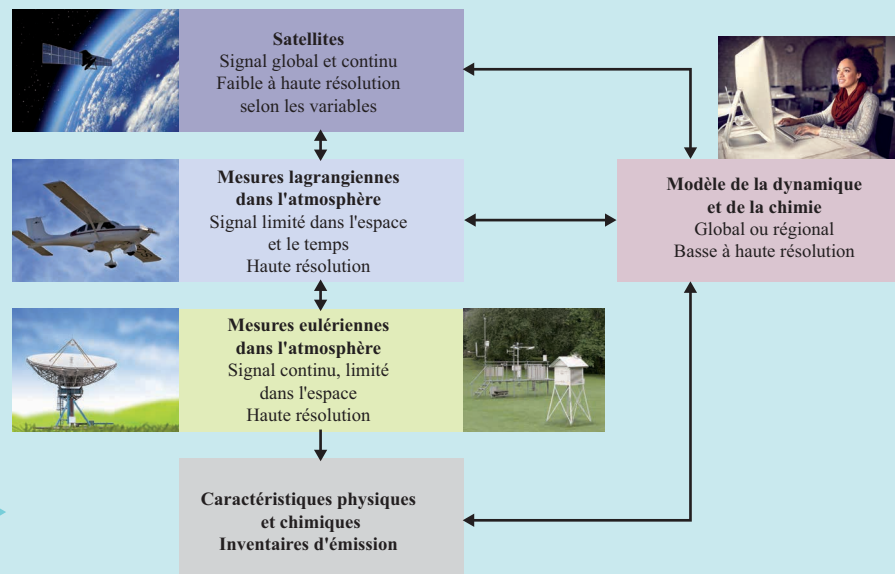


Figure 1.1
Stratégie d'étude de
l'atmosphère.

Définitions

Un **modèle** est une représentation d'un objet ou d'un processus qui permet de substituer un système plus simple au système naturel. Un modèle est donc réduit aux paramètres clés de ce système. La **modélisation** consiste à construire et à utiliser un modèle. Un modèle est un outil à penser qui apporte des réponses à un problème scientifique, souvent né de l'observation. Construction intellectuelle, simplification nécessaire du système naturel, les modèles peuvent avoir plusieurs buts : **représenter, comprendre et prédire**.

On distingue les **mesures eulériennes et lagrangiennes** car le référentiel n'est pas le même. Dans le cas eulérien, le référentiel est fixe par rapport à la Terre, comme pour un mouillage océanographique. Dans le cas lagrangien, le référentiel est mobile, comme pour les bouées qui dérivent dans des masses d'eau, au gré des courants.

1.1 Les caractéristiques physiques

Les mesures effectuées depuis la surface, soit de manière continue (stations météorologiques équipées de thermomètres, RADAR, SODAR, LIDAR, voir focus suivant), soit de manière discontinue (missions dédiées) et grâce aux satellites montrent que l'état moyen de l'atmosphère présente une **stratification verticale** de la température en fonction de l'altitude (figure 1.2). Comme la température est la mesure de l'énergie cinétique des molécules liée à leur agitation dans un corps, les modifications de la température indiquent que les sources et puits d'énergie thermique varient en fonction de l'altitude.

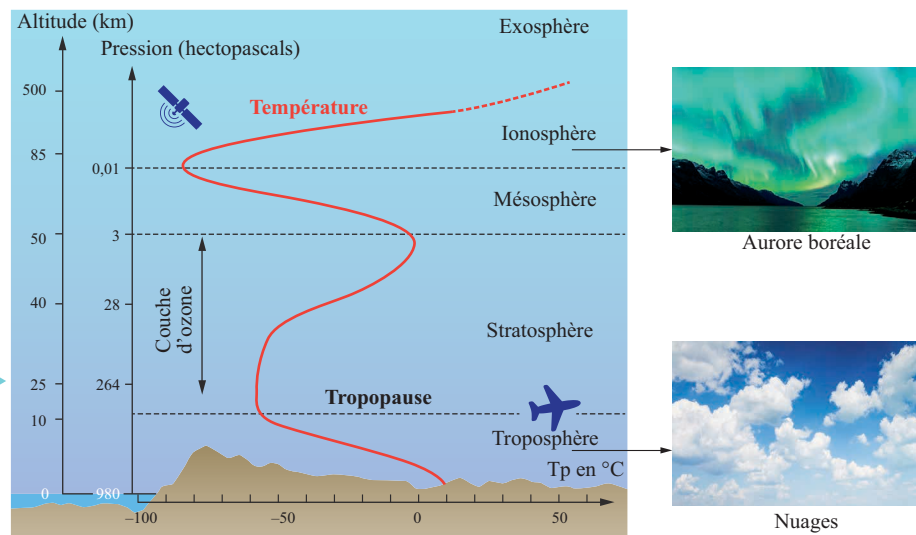


Figure 1.2

Profil vertical de température dans les premiers 700 km au-dessus de la surface terrestre.

La **pression atmosphérique**, mesurée par un baromètre, diminue avec l'altitude en suivant une loi exponentielle décroissante (figure 1.2). Cela signifie que plus on monte en altitude, moins l'air contient de molécules. Ainsi l'ionosphère, appelée aussi thermosphère, (pression < 0,01 hPa) est 100 000 fois plus légère que la base de la troposphère (pression de 1 013 hPa).



Mesurer à distance les paramètres physiques et chimiques de l'atmosphère grâce au LIDAR

Le système LIDAR (*Light Detection And Ranging*) a pour but de sonder à distance les propriétés physico-chimiques de l'atmosphère (température, densité, vent, teneur en gaz), en utilisant les lois de la physique optique. Ce moyen de **téledétection** consiste à envoyer une impulsion **laser** dans l'atmosphère et à analyser l'intensité de la lumière rétrodiffusée par les molécules et les particules présentes sur son trajet. Le LIDAR est complémentaire du RADAR, utilisant la propagation des ondes radio et du SODAR, celle des ondes sonores. La technologie LIDAR est également utilisée pour représenter les reliefs, comme dans le clip vidéo de la chanson *House of Cards* de Radiohead.

■ **Marie-Lise Chanin** (1934), géophysicienne, a consacré sa carrière au sein du CNRS à l'étude de la physique de la moyenne et de la haute atmosphère. Pionnière dans le développement des méthodes de sondage de l'atmosphère avec le laser ou LIDAR et dans l'étude du changement climatique, elle est aujourd'hui membre correspondant de l'Académie des Sciences.

La **température** à la surface terrestre est d'environ 15 °C et décroît en montant en altitude dans la troposphère et dans la mésosphère (figure 1.2). Ceci s'explique par le fait que l'atmosphère est chauffée par le bas par le rayonnement infrarouge émis par la Terre (voir focus sur le bilan radiatif de la Terre).

En revanche, la température augmente avec l'altitude dans la stratosphère et dans l'ionosphère. Ceci semble contre-intuitif étant donné que la source de chaleur de l'atmosphère se situe à sa base. Il est donc nécessaire de chercher à comprendre quels processus apportent de l'énergie thermique dans ces deux couches.

La stratosphère contient de fortes concentrations en ozone (O₃) d'où le terme de **couche d'ozone**. L'O₃ stratosphérique absorbe l'énergie lumineuse des rayons ultraviolets émis par le Soleil et la transforme en énergie thermique.

Quant à l'ionosphère, l'existence de phénomènes naturels spectaculaires peut nous éclairer : les **aurores polaires** (boréales et australes). Les aurores polaires sont provoquées par les importants chocs entre les particules chargées du **vent solaire** et les atomes de l'ionosphère qui deviennent ainsi ionisés ou excités (voir chapitre 7). Or les atomes excités sont instables. Ainsi un réarrangement d'un électron (changement d'orbitale) se produit pour retrouver un état stable, ce qui entraîne la libération d'un photon et la formation des aurores.

Ces phénomènes montrent que l'ionosphère est une couche ionisée (d'où son nom), soumise au vent solaire. Les atomes de l'ionosphère sont donc soumis au rayonnement solaire, qui par réaction chimique transforme l'énergie radiative en énergie cinétique et thermique.

Définitions

La **pression atmosphérique** correspond au poids de la colonne d'air qui s'exerce sur une surface horizontale centrée sur un point donné. Il s'agit d'une force par unité de surface qui s'exprime en pascal (Pa). Elle vaut en moyenne 1 013 hPa à la surface de la mer (1 hPa = 100 Pa).

La **température** est une grandeur physique qui traduit le degré d'agitation moléculaire d'un corps. Une température élevée d'un corps indique une importante agitation des molécules de ce corps. L'unité internationale de la température est le kelvin (K) bien que nous utilisions plus quotidiennement le degré Celsius °C : $T(K) = T(^{\circ}C) + 273$.

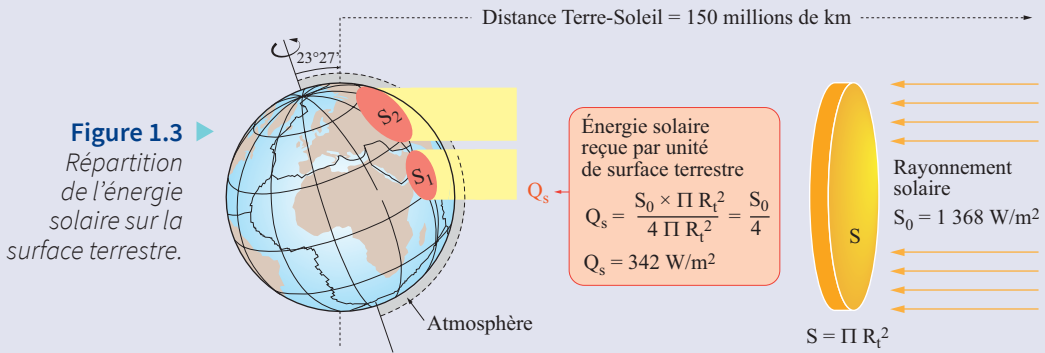
Si la température à la surface est de 15 °C en moyenne, les données météorologiques montrent qu'elle varie beaucoup avec des extrêmes enregistrés de +58 °C en Libye

et de -89°C en Antarctique. Ce fort écart de température est lié à la faible **capacité calorifique** de l'air ($1\,000\text{ J/kg/K}$), à l'origine de la faible capacité de l'atmosphère à retenir l'énergie thermique qu'elle acquiert.

FOCUS

Pourquoi fait-il plus chaud à l'équateur qu'aux pôles ?

Tout d'abord, calculons l'énergie solaire reçue par unité de surface terrestre. Après un trajet de 150 millions de km, le flux provenant du rayonnement solaire qui est disponible pour la Terre est la constante solaire S_0 d'une valeur de $1\,368\text{ W/m}^2$ (figure 1.3). La distance Terre-Soleil étant très grande, le rayonnement solaire peut être approximé à un faisceau de rayons parallèles, qui couvre la surface d'un disque S de même rayon que celui de la Terre R_t . L'énergie solaire incidente est donc égale au produit $S_0 \times S$. Or, du fait de la rotation de la Terre, l'énergie solaire incidente est redistribuée en 1 jour sur l'intégralité de la surface de la Terre S_t . Ainsi, pour calculer l'énergie effectivement reçue par la Terre par unité de surface Q_s , il est nécessaire de diviser l'énergie solaire incidente par la surface terrestre et on obtient 342 W/m^2 .



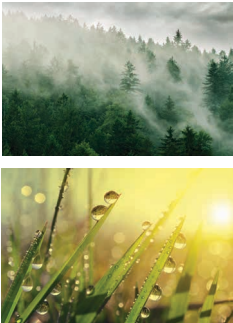
Étant donné que la Terre est une planète sphérique et caractérisée par une inclinaison de son axe de rotation d'environ 23° , le même faisceau de rayons parallèles irradie une surface S_1 à l'équateur plus petite que la surface S_2 aux moyennes et hautes latitudes. Dès lors, il en résulte une inégale répartition de l'énergie solaire à la surface de la Terre : l'énergie solaire reçue par unité de surface à l'équateur est supérieure à l'énergie solaire reçue aux moyennes et hautes latitudes.

1.2 Les caractéristiques chimiques

Le brouillard ou de la rosée du matin offre un bon témoignage de la présence de molécules de H_2O dans l'atmosphère (voir ci-contre). Le brouillard est visible car il correspond à un nuage fait de gouttelettes d'eau liquide (et non de vapeur d'eau qui est inodore et invisible).

Outre cette observation empirique, les scientifiques ont développé des techniques instrumentales pour déterminer la composition chimique de l'atmosphère de la Terre : mesures au sol dans des stations et aéroportées, ballons-sondes stratosphériques, tour instrumentale pouvant atteindre plus de 300 mètres (tour d'observation en Amazonie), satellites (figure 1.1).

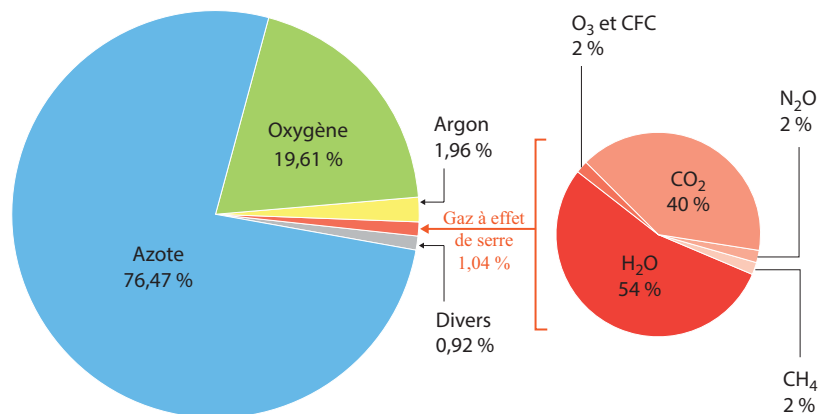
Les mesures montrent que l'atmosphère terrestre est une enveloppe de gaz essentiellement formée de **diazote** (N_2), de **dioxygène** (O_2) et d'**argon** (Ar). Elle contient



■ Brouillard et rosée : mise en évidence de la présence d'eau dans l'atmosphère.

également mais en moindre proportion des **gaz à effet de serre** dont le **dioxyde de carbone** (environ 0,4 % ou 400 ppm, CO_2), la vapeur d'eau (H_2O) et le **méthane** (figure 1.4). La vapeur d'eau atmosphérique est quasi totalement contenue dans la partie troposphérique. Étant donné le temps de résidence de l'eau dans l'atmosphère d'environ 8 jours, l'atmosphère est un **réservoir de transit** essentiel du cycle de l'eau, par opposition à l'océan et aux glaciers qui sont des **réservoirs de stockage** de l'eau (voir chapitre 2).

Figure 1.4
Composition chimique en masse de l'air humide sur les 100 km d'épaisseur de l'atmosphère.



Définitions

Un **ppm** ou **partie par million** correspond soit à une fraction massique soit à une fraction molaire d'un élément valant 10^{-6} . Pour une fraction massique, si on prend au 7 janvier 2019 la valeur de 0,411 % de CO_2 équivalent à 411 ppm, cela signifie que dans 1 kg d'air à cette date, on a $411 \cdot 10^{-6}$ kg de CO_2 soit, 411 mg de CO_2 . Pour une fraction molaire, 1 ppm correspond à 1 molécule de CO_2 pour 1 000 000 molécules d'air.

L'**effet de serre** est un processus mis en évidence par Joseph Fourier au début du XIX^{e} siècle qui s'interrogeait sur les facteurs contrôlant la température de la surface terrestre. L'effet de serre correspond à la production d'énergie thermique par l'interaction entre le rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre et certaines molécules atmosphériques. En effet, la surface terrestre est chauffée par l'énergie solaire. Or tout corps porté à une certaine température émet à son tour des radiations dont la longueur d'onde dépend de la température de la surface émettrice. Dans le cas de la Terre, les radiations sont dans le spectre infrarouge.

Le **temps de résidence** des composés chimiques mesurés dans l'atmosphère dépend de leur niveau d'émission, de leur réactivité chimique et du temps de mélange au sein de l'atmosphère. On distinguera donc différentes catégories en fonction de leur durée de vie de l'atmosphère :

- les espèces chimiques à courtes durées de vie (1 à 100 s) : NO_3 , OH ;
- les espèces chimiques à durées de vie modérées (1 h – 1 an) : O_3 troposphérique, aérosols ;
- les espèces chimiques à longues durées de vie (1 an – 1 siècle) : CH_4 , CO_2 , N_2O , CFC (utilisés comme produits réfrigérants dans l'industrie au XX^{e} siècle).