

Sous la direction de Julien Cattiaux, Francis Codron et Isabelle Dadou

Gaël Alory • François Bouttier • Guylaine Canut-Rocafort • Frédéric Ferry •

Nicholas Hall • Serena Ilig • Catherine Jeandel • Quentin Libois • Roland Séférian •

Pieter van Beek • Benoît Vié • Aurore Voltaire

Sciences de l'océan, de l'atmosphère et du climat

DUNOD

© Dunod, 2026
11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-089152-8

Table des matières

Avant-propos	X
--------------	---

Les contributeurs	XI
-------------------	----

Partie 1

Généralités

Chapitre 1 Introduction au système climatique	1
---	---

(J. Cattiaux, I. Dadou, F. Ferry, S. Illig)

1. Généralités sur le climat	1
1.1 Une définition du climat	1
1.2 Normales, état moyen	2
1.3 Les climats actuels	3
1.4 La notion de variabilité climatique	5
2. Le système climatique et ses composantes	6
2.1 Définition du système climatique	6
2.2 L'atmosphère	6
2.3 L'océan	14
2.4 Les surfaces continentales	20
2.5 La cryosphère	22
3. Bilan radiatif au sommet de l'atmosphère	24
3.1 Rayonnement solaire incident	24
3.2 Rayonnement infra-rouge sortant et effet de serre	25
3.3 Répartition saisonnière et géographique du bilan radiatif	26

Chapitre 2 Fondamentaux de dynamique et thermodynamique	28
---	----

(N. Hall, G. Alory, F. Codron, S. Illig)

1. Thermodynamique de l'atmosphère et de l'océan, structure verticale	28
1.1 Fonctions d'état et équilibre hydrostatique	29
1.2 Équations thermodynamiques, transformations adiabatiques	32

1.3 Stabilité et stratification	34
1.4 Vapeur d'eau et air saturé	37
2. Dynamique et équilibres fondamentaux	42
2.1 Équations de Navier-Stokes	43
2.2 Grands équilibres et approximations	49
3. Ondes, vorticité et divergence	54
3.1 Vorticité et circulation	54
3.2 Ondes dans les fluides géophysiques	58
3.3 Derniers mots	63

Partie 2

L'atmosphère et l'océan

Chapitre 3 Circulation et dynamique de l'atmosphère 64

(F. Ferry, J. Cattiaux, F. Codron)

1. Climatologie de la circulation atmosphérique	64
1.1 La circulation en moyenne temporelle et zonale	64
1.2 Vision horizontale de la circulation	69
2. La dynamique des moyennes latitudes	71
2.1 Perturbations et ondes de Rossby	71
2.2 Ondes stationnaires et téléconnexions	73
2.3 Perturbations transitoires baroclines et tempêtes	76
3. La dynamique des latitudes tropicales	83
3.1 Circulation et précipitations en zone tropicale	83
3.2 Les ondes équatoriales	85
3.3 Les cyclones tropicaux	89

Chapitre 4 Physique dans l'atmosphère 92

(Q. Libois, G. Canut-Rocafort, J. Cattiaux, F. Codron, B. Vié)

1. Rayonnement et transfert radiatif	92
1.1 Généralités sur le rayonnement	93
1.2 Transfert radiatif	98
1.3 Flux solaire et IR au sommet de l'atmosphère et à la surface	102
2. Couche limite atmosphérique	104
2.1 Généralités	104

2.2 La turbulence de la CLA	105
2.3 Échanges à l'interface surface-atmosphère	107
2.4 Cycle diurne et phénomènes de la CLA	111
3. Nuages	113
3.1 Qu'est-ce qu'un nuage ?	113
3.2 Formation des nuages	114
3.3 Formation des hydrométéores et rôle des aérosols	116
3.4 Processus microphysiques et formation des précipitations	117
3.5 Interactions des nuages avec leur environnement	118
 Chapitre 5 Dynamique et physique de l'océan	 121
<i>(G. Alory, I. Dadou, N. Hall, S. Illig)</i>	
1. Courants forcés par le vent	121
1.1 Tension de vent	121
1.2 Courant inertiel	122
1.3 Courants d'Ekman	123
1.4 Transport d'Ekman et upwelling	124
2. Courants géostrophiques	128
2.1 Géostrophie en surface	128
2.2 Géostrophie en profondeur	130
2.3 Hauteur stérique	131
2.4 Mesures en mer de courants géostrophiques	132
3. Circulation générale	133
3.1 Circulation équatoriale	133
3.2 Théorie de Sverdrup	134
3.3 Théorie de Stommel	137
4. Chaleur et sel dans l'océan – Flux d'eau et de chaleur à l'interface air-mer	138
4.1 Échanges d'eau douce à l'interface océan-atmosphère	139
4.2 Flux de chaleur à l'interface océan-atmosphère	140
5. Couche de mélange et thermocline	141
5.1 Couche de mélange	141
5.2 Subduction et ventilation de la thermocline permanente	145
6. Convection profonde	148

Chapitre 6 Biogéochimie et traceurs isotopiques dans l'océan 153

(I. Dadou, S. Illig, C. Jeandel, P. van Beek)

1. Biogéochimie marine	153
1.1 Notions de base	154
1.2 Estimations de flux d'éléments chimiques dans l'océan	159
1.3 Échanges de gaz à l'interface océan-atmosphère	160
1.4 Exemple du cycle de l'azote dans l'océan	163
1.5 Exemple du cycle du carbone dans l'océan	167
2. Les traceurs géochimiques pour étudier l'océan	169
2.1 Les traceurs géochimiques	169
2.2 Le carbone 14	171
2.3 Les isotopes du radium	175
2.4 Les Terres Rares et isotopes du Néodyme	180

Partie 3

Le système climatique

Chapitre 7 Cycles du système climatique : eau, énergie, carbone 186

(F. Codron, J. Cattiaux, R. Sférian)

1. Généralités	186
1.1 Cycles, réservoirs, flux	186
1.2 Temps d'équilibrage	188
2. Cycle de l'eau	190
2.1 Le contenu en eau de l'atmosphère	190
2.2 Bilan en surface, hydrologie continentale	192
2.3 Bilan d'eau régional	193
2.4 Mécanismes de transport	195
2.5 Sensibilité au réchauffement	196
3. Cycle de l'énergie	196
3.1 Bilan au sommet de l'atmosphère	196
3.2 Bilan d'énergie en surface	199
3.3 Transport d'énergie	202
4. Cycle du carbone	207
4.1 Les réservoirs de carbone	207

4.2 Les flux de carbone aux échelles « rapides »	209
4.3 Le cycle du carbone géologique	211

Chapitre 8 Variabilité interne, forçages externes et rétroactions 213

(J. Cattiaux)

1. Variabilité interne du système climatique	213
1.1 Variabilité intra-saisonnière	214
1.2 Variabilité inter-annuelle	216
1.3 Variabilité multi-décennale	220
2. Forçages externes	221
2.1 Formalisme et généralités	221
2.2 Forçage solaire	223
2.3 Forçage par effet de serre additionnel	224
2.4 Forçage radiatif des aérosols	227
2.5 Modifications des propriétés de surface	228
3. Rétroactions	229
3.1 Rétroactions radiatives	229
3.2 Exemples d'autres rétroactions du système climatique	233

Chapitre 9 Climats passés et changement climatique actuel 236

(J. Cattiaux)

1. Brève histoire des climats passés	236
1.1 Précambrien (4,55 Ga – 542 Ma)	237
1.2 Phanérozoïque (542 Ma – 0 Ma)	240
1.3 Dernier million d'années : cycles glaciaires – interglaciaires	243
1.4 Zoom sur le dernier millénaire	245
2. Changement climatique observé, détection et attribution	246
2.1 Contexte scientifique	246
2.2 Forçages radiatifs depuis le pré-industriel	247
2.3 Réchauffement observé	249
2.4 Détection et attribution	251
3. Projections futures et incertitudes	252
3.1 Scénarios socio-économiques pour l'évolution des forçages	252
3.2 Projections climatiques globales et incertitudes	253

3.3 À quoi ressemble un climat plus chaud ?	256
3.4 Échelle régionale : exemple de la France métropolitaine	259
4. Événements extrêmes	260
4.1 Extrêmes de température	261
4.2 Extrêmes hydrologiques, cyclones et tempêtes	262

Partie 4

Les méthodes

Chapitre 10 Moyens d'observation du système climatique 264

(Q. Libois, G. Alory, G. Canut-Rocafort, P. van Beek)

1. Généralités	264
2. Mesures <i>in situ</i>	266
2.1 Interfaces surface/atmosphère	266
2.2 Océan	270
2.3 Atmosphère	273
2.4 Carottes sédimentaires et carottes de glace	276
3. Mesures par télédétection	278
3.1 Principes physiques généraux	279
3.2 Caractérisation des surfaces océaniques et continentales	281
3.3 Caractérisation de l'atmosphère	283

Chapitre 11 Modèles de climat 285

(A. Voldoire, J. Cattiaux, R. Sférian)

1. Introduction à la modélisation	285
1.1 Pourquoi modéliser le système climatique ?	285
1.2 Une diversité des modèles	286
1.3 Principes généraux	288
2. Les modèles de circulation générale (GCM) pour l'atmosphère et l'océan	289
2.1 Mise en équations	289
2.2 Méthodes de résolution numérique	292
2.3 Le couplage des composantes	295

3. Vers les modèles de système Terre (ESM)	296
3.1 Modélisation des surfaces continentales	296
3.2 Modélisation de la glace de mer et des calottes	298
3.3 Cycles biogéochimiques, aérosols et chimie atmosphérique	299
4. Évaluation et utilisation des GCM/ESM	302
4.1 Simulation climatique versus prévision météorologique	302
4.2 Démarche d'évaluation	303
4.3 Ensembles	306
5. Autres types de modèles	308
5.1 Des GCM « zoomés » : les modèles régionaux	308
5.2 Des GCM simplifiés	309
5.3 Des GCM hybrides : l'apport de l'IA	310
 Chapitre 12 Analyse et assimilation de données	311
<i>(F. Bouttier)</i>	
1. Généralités	311
1.1 Un équilibre entre information et incertitudes	311
1.2 Terminologie	313
2. Analyse	314
2.1 Problématique	314
2.2 Observations pour l'analyse	314
2.3 Techniques d'analyse par interpolation	317
2.4 Limites de l'analyse : sur- et sous-apprentissage	322
3. Assimilation	322
3.1 Principe de l'assimilation séquentielle	322
3.2 Théorème d'analyse BLUE	323
3.3 Techniques numériques d'analyse	325
3.4 Méthodes ensemblistes	327
3.5 Applications, limites et perspectives	330
 Bibliographie	332
 Index	335
 Crédits iconographiques	340

Avant-propos

Ce livre présente les principes physiques fondamentaux nécessaires à la compréhension du système climatique, en particulier de l'atmosphère et de l'océan, et à l'étude du climat et de ses variations. À travers une approche à la fois théorique et appliquée, il offre les clés pour appréhender la dynamique atmosphérique et océanique, les moyens d'observation et de la modélisation du système Terre, ainsi que les bases physiques du changement climatique actuel.

Destiné en priorité aux étudiant-es de Master en sciences de l'océan, de l'atmosphère et du climat, sciences de l'environnement ou sciences et vie de la Terre, cet ouvrage s'appuie sur un formalisme mathématique et des notions théoriques de niveau quatrième année post-bac. Il s'adresse cependant à un public plus large : étudiant-es de Licence (physique, mathématique, science des données), doctorant-es, jeunes chercheur-es, enseignant-es du secondaire ou universitaires, ou plus généralement toute personne souhaitant approfondir ses connaissances sur ces thématiques.

Le livre est organisé en quatre grandes parties. La première regroupe une introduction générale au système climatique (Chapitre 1) et les notions fondamentales de thermodynamique et de dynamique des fluides géophysiques utiles à son étude (Chapitre 2).

La seconde (Chapitres 3 à 6) traite des deux composantes majeures du système climatique : l'atmosphère et l'océan. Elle détaille les grands principes de dynamique (circulation générale, ondes), de physique (rayonnement, convection, turbulence), de thermodynamique et de biogéochimie.

La troisième (Chapitres 7 à 9) s'intéresse à l'étude du système climatique dans son ensemble, avec un focus sur les grands cycles (eau, énergie, carbone), la variabilité climatique interne et forcée, les climats passés et le changement climatique anthropique.

Enfin la quatrième partie, plus méthodologique, présente les moyens d'observations du système climatique (Chapitre 10), les modèles utilisés pour la prévision du temps et l'étude du climat (Chapitre 11), ainsi que les techniques d'analyse et assimilation de données (Chapitre 12).

L'intégralité des droits d'auteurs est reversée à *Office for Climate Education*.

Remerciements

Cet ouvrage s'inspire de nos enseignements en sciences de l'atmosphère et de l'océan, en climatologie, en météorologie, etc. dispensés dans différents établissements d'enseignement supérieur depuis de nombreuses années. Nous tenons à remercier chaleureusement nos étudiant-es, dont la curiosité et l'esprit critique nourrissent chaque jour notre réflexion et notre pédagogie. Leurs retours, toujours bienvenus, ont notamment permis d'enrichir nos supports de cours et de poser les bases de ce livre.

Nous remercions également nos collègues enseignant-es, chercheur-es ou ingénieur-es pour l'aide apportée durant la préparation ou la rédaction de ce livre (expertise, relecture, suggestions de matériel de cours ou d'illustrations, etc.) : Blanka Balogh, Christophe Cassou, Hélène Chepfer, Lola Corre, Fleur Couvreur, Valérie Masson-Delmotte, Hervé Giordani, Mariana Rocha, David Saint-Martin, Pierre Sepulchre, Jérôme Servonnat, Aurélien Ribes, Yoann Robin.

Un merci particulier aux étudiant-es, représentant-es du public visé par ce livre, pour leurs relectures critiques des versions intermédiaires de l'ouvrage, leurs nombreuses suggestions, et leur aide précieuse sur certaines illustrations : Enora Cariou, Onaïa Savary, Delphine Techer.

Enfin, nous remercions Vanessa Beunèche et Laetitia Jammet (éditions Dunod) pour leur suivi attentif, leurs conseils et... leur patience.

Les contributeurs

Julien Cattiaux (Chapitres 1, 3, 4, 7, 8, 9, 11) est chargé de recherche CNRS au Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), spécialiste du changement climatique actuel. Il enseigne à l'École de la Météorologie (ENM) et dans le Master SOAC (Sciences de l'Océan, de l'Atmosphère et du Climat) de l'Université de Toulouse.

Francis Codron (Chapitres 2, 3, 4, 7) est professeur à Sorbonne Université, au Laboratoire d'Océanographie et du Climat (LOCEAN), spécialiste de dynamique de l'atmosphère et de l'océan, et de variabilité du climat. Il enseigne dans le Master SOAC de Sorbonne Université, dont il est responsable.

Isabelle Dadou (Chapitres 1, 5, 6) est professeure à l'Université de Toulouse, au Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales (LEGOS), spécialiste en physique et biogéochimie de l'océan. Elle enseigne dans le Master SOAC de l'Université de Toulouse, dont elle est responsable pour le parcours Océanographie et Applications.

Gaël Alory (Chapitres 2, 5, 10) est enseignant-chercheur CNAP au LEGOS, spécialiste de dynamique océanique tropicale. Il enseigne dans le Master SOAC de l'Université de Toulouse et dans plusieurs universités africaines.

François Bouttier (Chapitre 12) est chercheur Météo-France au CNRM, spécialiste en prévision des pluies et assimilation de données. Il enseigne dans le Master SOAC de l'Université de Toulouse et à l'ISAE-Supaero.

Guylaine Canut-Rocafort (Chapitres 4, 10) est chargée de recherche du développement durable au CNRM, spécialiste des échanges surface-atmosphère et processus de couche limite atmosphérique. Elle enseigne à l'ENM.

Frédéric Ferry (Chapitres 1, 3) est ingénieur Météo-France et enseignant à l'ENM, spécialiste de physique et dynamique de l'atmosphère.

Nicholas Hall (Chapitres 2, 5) est professeur à l'Université de Toulouse, au LEGOS, spécialiste en dynamique de grande échelle et prévision saisonnière. Il enseigne dans le Master SOAC de l'Université de Toulouse.

Serena Illig (Chapitres 1, 2, 5, 6) est chercheuse IRD au LEGOS, spécialiste en modélisation et dynamique océan-atmosphère. Elle enseigne dans le Master SOAC de l'Université de Toulouse et dans plusieurs universités africaines.

Catherine Jeandel (Chapitre 6) est directrice de recherche CNRS au LEGOS, spécialiste en géochimie marine.

Quentin Libois (Chapitres 4, 10) est chercheur Météo-France au CNRM, responsable du département de Météorologie Expérimentale et Instrumentale, spécialiste en transfert radiatif atmosphérique et télédétection.

Roland Séférian (Chapitres 7, 11) est chercheur Météo-France au CNRM, spécialiste du cycle du carbone. Il enseigne dans le Master SOAC de l'Université de Toulouse.

Pieter van Beek (Chapitres 6, 10) est professeur à l'Université de Toulouse, au LEGOS, spécialiste en géochimie marine. Il enseigne dans le Master SOAC de l'Université de Toulouse.

Benoît Vié (Chapitre 4) est chercheur Météo-France au CNRM, spécialiste en physique des nuages. Il enseigne à l'ENM et dans le Master SOAC de l'Université de Toulouse.

Aurore Voldoire (Chapitre 11) est chercheuse Météo-France au CNRM, spécialiste en modélisation climatique et variabilité climatique tropicale.

Introduction au système climatique

Introduction

Ce premier chapitre a pour objectif d'introduire les notions de base utiles à l'étude et la compréhension du système climatique. On présente dans un premier temps les fondements de la climatologie, en insistant sur les approches statistiques, les notions d'état moyen et de variabilité du climat (Section 1). On décrit ensuite les propriétés des différentes composantes du système climatique, dont l'atmosphère et l'océan (Section 2). On s'intéresse enfin au bilan radiatif global, qui détermine le climat planétaire, en montrant l'importance de l'effet de serre atmosphérique (Section 3).

Objectifs

- Définir** le climat et le système climatique.
- Décrire** les différentes composantes.
- Introduire** le bilan radiatif du système.

Plan

- 1 Généralités sur le climat
- 2 Le système climatique et ses composantes
- 3 Bilan radiatif au sommet de l'atmosphère

1 Généralités sur le climat

1.1 Une définition du climat

Le **climat** désigne généralement les conditions météorologiques typiquement « attendues » en un lieu et un instant donnés. Par exemple, on « s'attend » à avoir des températures plus élevées en été qu'en hiver, on « s'attend » à avoir plus de pluie au cœur des tropiques qu'au milieu du Sahara, etc. « *Climate is what you expect, weather is what you get* », selon la formule anglaise. Le climat est souvent estimé sur la base de données « météo » recueillies sur une longue période, permettant d'établir des **statistiques** sur un échantillon représentatif : moyenne, variance, records, etc., i.e. l'ensemble de la **distribution** (Fig. 1.1a).

DÉFINITION

Le **climat** peut être défini comme la **distribution de probabilité** des variables **météorologiques** telles que la température, la pression, le vent ou l'humidité en un lieu et un instant donnés.

Comme toute distribution statistique, le climat peut être caractérisé au premier ordre par sa moyenne : on parle d'**état moyen** du climat, ou de **normales climatologiques** (cf. Section 1.2). La connaissance des normales en tout point du globe permet de distinguer plusieurs climats à la surface du globe, et de définir des classes de climat (cf. Section 1.3). Les fluctuations autour des normales, ainsi que les variations de l'état moyen du climat dans le temps, constituent ce que l'on appelle la **variabilité climatique** (cf. Section 1.4).

1.2 Normales, état moyen

Les **normales climatologiques**, climatiques, ou de saison, caractérisent l'état moyen du climat en un lieu et un instant. Elles sont une estimation de l'espérance mathématique (*expectance* en anglais, cf. « *climate is what you expect* ») des variables météorologiques considérées.

On les calcule généralement sur la base de **données historiques**. Typiquement, pour obtenir la normale de température du 1^{er} janvier, on moyenne les températures observées sur les 1^{er} janvier d'une période de référence — et ainsi de suite pour les autres jours. On applique ensuite un lissage temporel pour éliminer le bruit résiduel et obtenir le **cycle annuel** correspondant aux normales (Fig. 1.1b).

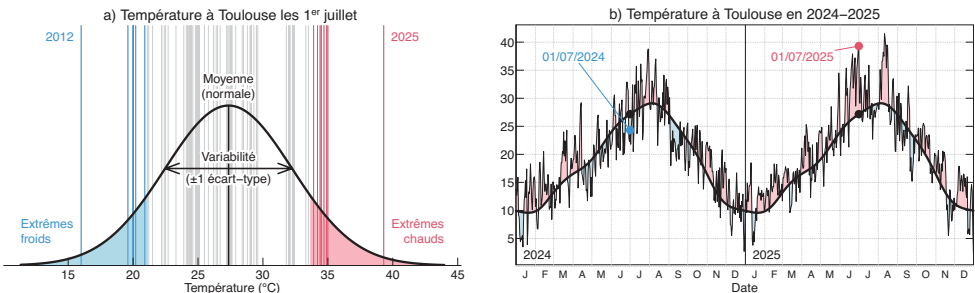


Figure 1.1 – (a) Températures observées à Toulouse le 1^{er} juillet de 1947 à 2025, avec distribution calculée sur 1991-2020 en noir, et les valeurs les plus basses (hautes) en bleu (rouge). (b) Température quotidienne à Toulouse sur 2024-25 (trait fin), avec normale en trait épais. Les 1^{er} juillet 2024 et 2025 sont pointés. Données Météo-France.

Le choix de la **période de référence** est important, surtout dans un climat qui change. L'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) préconise d'utiliser une fenêtre de 30 ans, une durée jugée suffisamment longue pour bien échantillonner la distribution, et suffisamment courte pour être représentative du climat actuel, à condition d'actualiser régulièrement la fenêtre. Par exemple, Météo-France utilise la période 1991-2020 depuis 2021 (actualisation tous les dix ans), ce qui fournit grosso modo une normale représentative de 2005 (milieu de la période).

Remarque Dans un climat qui se réchauffe, il est donc paradoxalement *normal* qu'il fasse plus souvent plus chaud que la « normale » ainsi estimée sur le passé.

1.3 Les climats actuels

Le calcul des normales de différentes variables en tout point du globe a été rendu possible — et de plus en plus précis — par le développement progressif des **moyens d'observation** (cf. Chapitre 10).

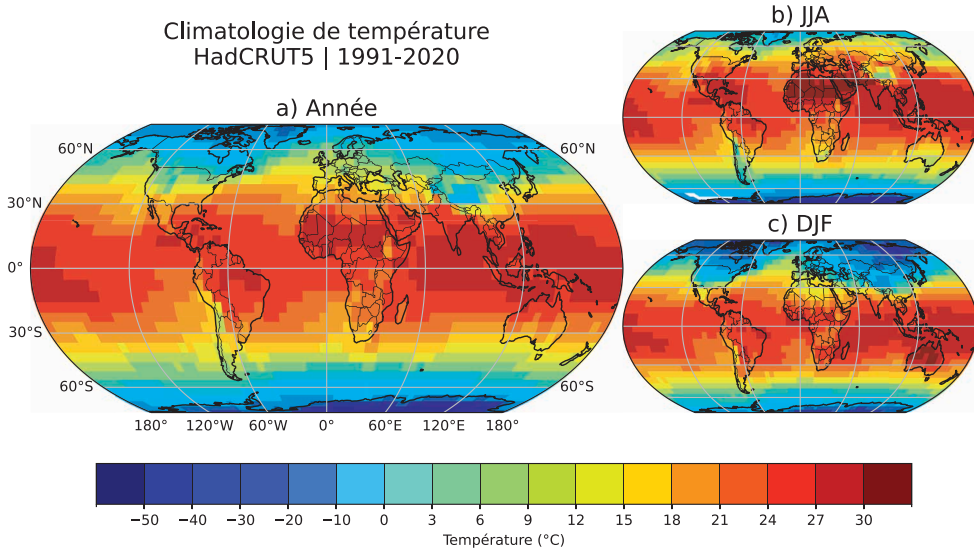


Figure 1.2 – Climatologie 1991-2020 de température à 2 m en moyenne (a) annuelle, (b) JJA et (c) DJF. Données HadCRUT5.

En moyenne annuelle, la **température** de l'air à la surface de la Terre — mesurée par convention à 2 m, cf. Chapitre 10 — s'échelonne d'environ -40°C en Antarctique à 30°C au cœur des tropiques (**Fig. 1.2a**). Actuellement, la moyenne globale est d'environ 15°C . La température varie d'abord avec la latitude : il fait plus chaud à l'équateur qu'aux pôles. Au second ordre, on distingue des variations en longitude : à l'équateur, il fait plus chaud à l'ouest des bassins océaniques qu'à l'est — à 45°N , il fait plus chaud en Europe de l'Ouest que sur la côte est des États-Unis. Ces variations s'expliquent par la répartition de l'énergie nette reçue sur le globe (cf. Section 3), la géographie des continents (cf. Section 2.4) et la circulation moyenne de l'atmosphère et de l'océan (cf. Sections 2.2 et 2.3).

DÉFINITION

On distingue traditionnellement plusieurs grandes zones climatiques de la planète, correspondant à des bandes de latitude : les **tropiques** (de l'équateur à environ 30° de latitude), les **subtropiques** (de 30° à 40°), les **moyennes latitudes** ou zones tempérées (de 40° à 60°), et les **hautes latitudes** ou régions polaires (de 60° aux pôles).

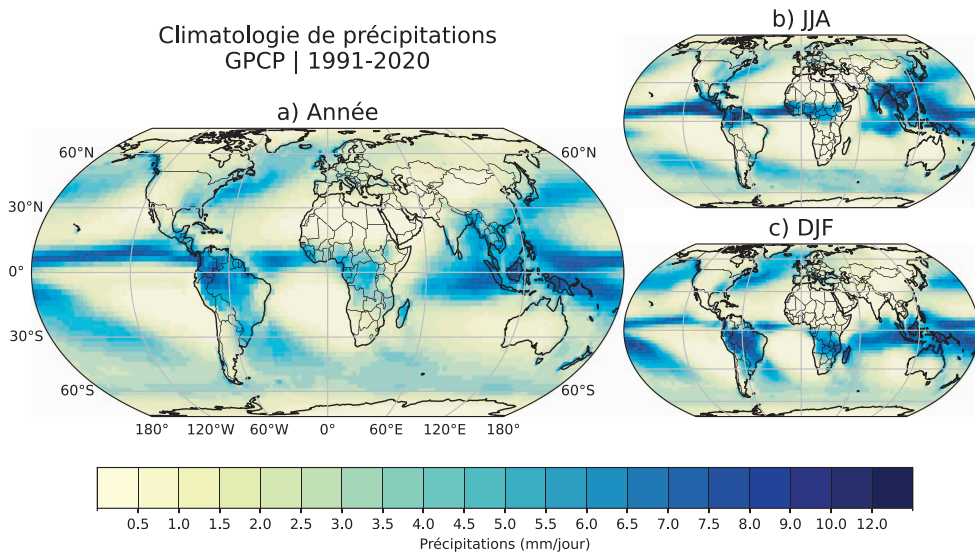


Figure 1.3 – Climatologie 1991-2020 de précipitations en moyenne (a) annuelle, (b) JJA et (c) DJF. Données GPCP.

La climatologie annuelle des **précipitations** est également contrastée géographiquement (**Fig. 1.3a**). Le cœur des tropiques, où il pleut le plus (3 à 4 m par an), correspond à la **Zone de Convergence Inter-Tropicale (ZCIT)** ; elle n'est pas exactement centrée sur l'équateur en raison de la géographie actuelle des continents. Aux moyennes latitudes, les régions de plus forts cumuls annuels correspondent aux zones où circulent les **tempêtes** hivernales, appelées **rails de dépressions**. Par ailleurs, il pleut davantage sur les reliefs qu'en plaine, du fait des mouvements ascendants qu'ils génèrent (cf. Chapitres 2 et 4).

Ces moyennes annuelles masquent une caractéristique majeure du climat : l'existence de **saisons**. Celles-ci sont dues à l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de son orbite (cf. Section 3.3).

DÉFINITION

La définition des **saisons météorologiques** ne correspond pas tout à fait à l'astronomie. On utilise par convention des regroupements de trois mois, en centrant l'hiver (l'été) sur le minimum (maximum) des cycles annuels typiques de température. Ainsi, dans l'hémisphère Nord l'hiver correspond à **Décembre – Janvier – Février (DJF)**, l'été à **Juin – Juillet – Août (JJA)**, et le printemps et l'automne aux mois intermédiaires (MAM et SON).

L'amplitude du **cycle saisonnier** des températures est plus forte (i) aux hautes latitudes et (ii) sur les continents ; elle va de quelques degrés dans les tropiques à plusieurs dizaines de degrés au cœur de la Sibérie (**Fig. 1.2b, c**). Concernant les précipitations

(Fig. 1.3b, c), les tropiques sont caractérisés par une migration de la ZCIT vers l'hémisphère d'été. Cela explique la présence d'une saison humide (été) et d'une saison sèche (hiver) dans les régions situées de part et d'autre de l'équateur, ainsi que les phénomènes de **moussons**. En DJF, dans le sud-ouest de l'océan Pacifique tropical, on observe une région de fortes précipitations qu'il faut distinguer de la ZCIT : la **zone de convergence du Pacifique sud (ZCPS)**. Elle est liée à la présence d'eaux très chaudes dans la région (*warm pool* en anglais). Aux moyennes latitudes, les précipitations sont en général plus fortes l'hiver, en lien avec des dépressions et tempêtes plus intenses (cf. Chapitre 3).

Une **classification des climats** basée sur les cycles annuels de température et de précipitations a été proposée par Wladimir Köppen dès la fin du XIX^e siècle. Elle utilise une nomenclature à trois lettres, la première séparant cinq grandes classes sur la base des valeurs annuelles (A : tropical, B : sec, C : tempéré, D : continental et E : polaire), puis les deux autres distinguant des sous-classes selon (i) la répartition des précipitations dans l'année et (ii) l'amplitude des variations de température pendant l'année (Fig. 1.4). La France est classée en Cfb, un climat tempéré sans saison sèche et avec un été relativement chaud — on parle aussi de climat « océanique ».

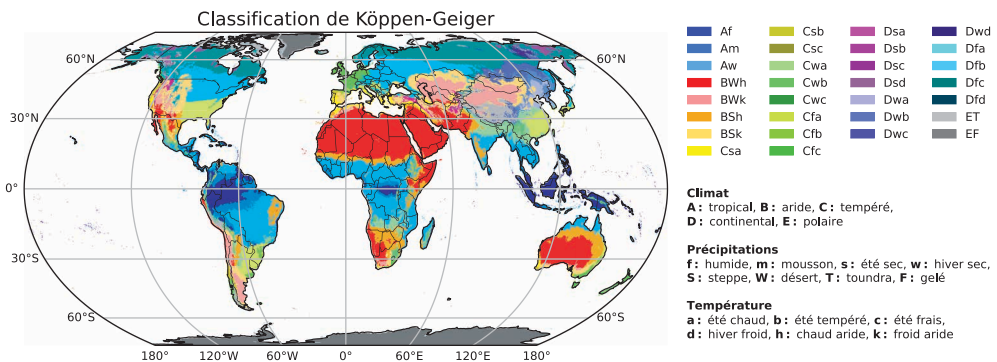


Figure 1.4 – Classification des climats de Köppen-Geiger à partir des climatologies de température et précipitations 1991-2020. Données Beck et al. (2018).

1.4 La notion de variabilité climatique

Le terme « **variabilité climatique** » regroupe deux choses de nature différente. D'une part, les valeurs de température, précipitations, etc. fluctuent sans cesse autour de leur normale. Cette part de variabilité est dite **interne**, car inhérente à la définition du climat : quand on réalise un tirage aléatoire dans une distribution, la probabilité d'être proche de l'espérance est petite. D'autre part, la distribution elle-même n'est pas stationnaire dans le temps : le climat de la Terre a varié par le passé, et il varie actuellement — cette part de variabilité est dite « **forcée** » (cf. Chapitre 8).