

Guide des pratiques climatologiques

Édition 2011



Organisation
météorologique
mondiale

OMM-N° 100

Temps • Climat • Eau

Guide des pratiques climatologiques

OMM-N° 100



**Organisation
météorologique
mondiale**
Temps • Climat • Eau

2014

NOTE DE L'ÉDITEUR

La base de données terminologique de l'OMM, METEOTERM, et la liste des abréviations peuvent être consultées aux adresses http://www.wmo.int/pages/prog/lsp/meteoterm_wmo_fr.html et http://www.wmo.int/pages/themes/acronyms/index_fr.html.

OMM-N° 100

© Organisation météorologique mondiale, 2011

L'OMM se réserve le droit de publication en version imprimée ou électronique ou sous toute autre forme et dans n'importe quelle langue. De courts extraits des publications de l'OMM peuvent être reproduits sans autorisation, pour autant que la source complète soit clairement indiquée. La correspondance relative au contenu rédactionnel et les demandes de publication, reproduction ou traduction partielle ou totale de la présente publication doivent être adressées au:

Président du Comité des publications
Organisation météorologique mondiale (OMM)
7 bis, avenue de la Paix
Case postale 2300
CH-1211 Genève 2, Suisse

Tél.: +41 (0) 22 730 84 03
Fax: +41 (0) 22 730 80 40
Courriel: publications@wmo.int

ISBN 978-92-63-20100-3

NOTE

Les appellations employées dans les publications de l'OMM et la présentation des données qui y figurent n'impliquent, de la part de l'Organisation météorologique mondiale, aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

La mention de certaines sociétés ou de certains produits ne signifie pas que l'OMM les cautionne ou les recommande de préférence à d'autres sociétés ou produits de nature similaire dont il n'est pas fait mention ou qui ne font l'objet d'aucune publicité.

TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE	vii
CHAPITRE 1. INTRODUCTION	1
1.1 Objet et contenu du Guide	1
1.2 Climatologie	1
1.2.1 Historique	1
1.2.2 Le système climatique	3
1.2.3 Utilisations de l'information et de la recherche en climatologie	6
1.3 Programmes internationaux relatifs au climat	7
1.4 Activités mondiales et régionales relatives au climat	8
1.5 Activités nationales relatives au climat	10
1.6 Bibliographie	12
1.6.1 Publications de l'OMM	12
1.6.2 Autres lectures	12
CHAPITRE 2. OBSERVATIONS, STATIONS ET RÉSEAUX CLIMATOLOGIQUES	14
2.1 Introduction	14
2.2 Éléments climatiques	15
2.2.1 Éléments de surface et sous la surface	15
2.2.2 Éléments en altitude	17
2.2.3 Éléments mesurés par télédétection	19
2.3 Instruments	20
2.3.1 Équipement de base en surface	21
2.3.2 Instruments de mesure en altitude	23
2.3.3 Télédétection à partir de la surface	23
2.3.4 Télédétection à partir d'aéronefs et de l'espace	24
2.3.5 Étalonnage des instruments	27
2.4 Emplacement des stations climatologiques	28
2.5 Conception des réseaux climatologiques	29
2.6 Fonctionnement des stations et des réseaux	31
2.6.1 Heures des observations	31
2.6.2 Enregistrement et transmission des observations	32
2.6.3 Contrôle de qualité sur site	33
2.6.4 Responsabilités générales des observateurs	33
2.6.5 Formation professionnelle des observateurs	34
2.6.6 Inspection des stations	35
2.6.7 Sauvegarde de l'homogénéité des données	35
2.6.8 Contrôle des messages aux centres de collecte	36
2.6.9 Documentation relative à la station et métadonnées	36
2.7 Bibliographie	37
2.7.1 Publications de l'OMM	37
2.7.2 Autres lectures	39
CHAPITRE 3. GESTION DES DONNÉES CLIMATOLOGIQUES	41
3.1 Introduction	41
3.2 Importance et objet de la gestion des données	42
3.3 Gestion des données climatologiques	43
3.3.1 Conception d'un système de gestion des données climatologiques	43
3.3.2 Acquisition des données d'un SGDC	44
3.3.3 Documentation sur les données d'un SGDC	45
3.3.4 Stockage des données d'un SGDC	46

	<i>Page</i>
3.3.5 Accès aux données et extraction des données d'un SGDC	47
3.3.6 Archives d'un SGDC	48
3.3.7 Sécurité d'un SGDC	48
3.3.8 Gestion d'un SGDC.	49
3.3.9 Normes et directives internationales relatives aux SGDC.	49
3.4 Contrôle de qualité.	50
3.4.1 Procédures du contrôle de qualité	51
3.4.2 Documentation sur le contrôle de qualité	52
3.4.3 Types d'erreur.	52
3.4.4 Tests des formes de présentation	53
3.4.5 Tests de complétude.	53
3.4.6 Tests de cohérence	54
3.4.7 Tests de dispersion	55
3.5 Échange de données climatologiques.	56
3.6 Sauvetage des données	58
3.7 Bibliographie	58
3.7.1 Publications de l'OMM	58
3.7.2 Autres lectures	60
CHAPITRE 4. CARACTÉRISATION DU CLIMAT À L'AIDE DE JEUX DE DONNÉES	61
4.1 Introduction	61
4.2 Évaluation de jeux de données	61
4.3 Visualisation qualitative des données	62
4.4 Descripteurs quantitatifs synthétiques des données	64
4.4.1 Modèles de données mis en évidence par la distribution de fréquence.	65
4.4.2 Paramètres de tendance centrale	69
4.4.3 Paramètres de dispersion	72
4.4.4 Paramètre de symétrie	73
4.4.5 Paramètre d'aplatissement	73
4.4.6 Indices	74
4.5 Corrélation	74
4.5.1 Tableaux de contingence	74
4.5.2 Coefficients de corrélation	75
4.6 Séries chronologiques.	76
4.7 Interprétation des caractéristiques synthétiques du climat	77
4.8 Normales	78
4.8.1 Période utilisée pour les calculs.	79
4.8.2 Stations pour lesquelles les normales et les moyennes sont calculées	81
4.8.3 Homogénéité des données	81
4.8.4 Données manquantes.	81
4.8.5 Température moyenne quotidienne	82
4.8.6 Quintiles des précipitations.	82
4.8.7 Diffusion des normales	83
4.9 Bibliographie	83
4.9.1 Publications de l'OMM	83
4.9.2 Autres lectures	83
CHAPITRE 5. MÉTHODES STATISTIQUES D'ANALYSE DE JEUX DE DONNÉES	85
5.1 Introduction	85
5.2 Homogénéisation	85
5.2.1 Évaluation de données homogénéisées	89
5.3 Ajustement de modèles pour évaluer les distributions de données	90
5.4 Transformation de données	91
5.5 Analyse de séries chronologiques	92
5.6 Analyse à plusieurs variables	94

	<i>Page</i>	
5.7	Analyse comparative	95
5.8	Lissage	96
5.9	Estimation de données	98
5.9.1	Méthodes mathématiques d'estimation	98
5.9.2	Estimation fondée sur des relations physiques.	99
5.9.3	Méthodes d'estimation spatiale	99
5.9.4	Estimation de séries chronologiques	100
5.9.5	Validation	101
5.10	Analyse des valeurs extrêmes	102
5.10.1	Méthode de la période de retour	102
5.10.2	Précipitations maximales probables	103
5.11	Méthodes robustes en statistique	103
5.12	Progiciels de statistique.	104
5.13	Fouille de données	105
5.14	Bibliographie	105
5.14.1	Publications de l'OMM	105
5.14.2	Autres lectures	106
CHAPITRE 6. SERVICES ET PRODUITS		109
6.1	Introduction	109
6.2	Utilisateurs et utilisations de l'information climatologique.	109
6.3	Interaction avec les utilisateurs	111
6.4	Diffusion de l'information	113
6.5	Commercialisation des services et des produits.	115
6.6	Produits	116
6.6.1	Directives générales	116
6.6.2	Périodiques de données climatologiques	117
6.6.3	Publications occasionnelles	118
6.6.4	Produits types.	118
6.6.5	Produits spécialisés	119
6.6.6	Produits de la surveillance du climat	120
6.6.7	Indices	120
6.7	Modèles climatiques et perspectives d'évolution du climat	121
6.7.1	Produits concernant l'évolution probable du climat	121
6.7.2	Prévisions et projections climatiques	122
6.7.3	Scénarios climatiques	123
6.7.4	Modèles climatiques mondiaux	123
6.7.5	Réduction d'échelle: modèles climatiques régionaux	124
6.7.6	Modèles climatiques d'échelle locale.	125
6.8	Produits de réanalyse	125
6.9	Exemples de produits et de représentations graphiques des données.	126
6.10	Bibliographie	134
6.10.1	Publications de l'OMM	134
6.10.2	Autres lectures	134
ANNEXE 1. SIGLES ET ABRÉVIATIONS		136
ANNEXE 2. ACTIVITÉS INTERNATIONALES RELATIVES AU CLIMAT		137
A2.1	Coordination des activités relatives au climat	137
A2.2	Le Programme climatologique mondial	137
A2.3	Le Programme d'action pour le climat	139
A2.4	Programmes internationaux relatifs aux changements climatiques	140
A2.5	Bibliographie	141

PRÉFACE

Depuis 1983, année de publication de la deuxième édition en anglais du *Guide des pratiques climatologiques* (OMM-N° 100), les activités liées au climat ont pris beaucoup d'ampleur dans presque tous les domaines et tout particulièrement dans le domaine scientifique et dans celui de l'action publique. Le *Guide des pratiques climatologiques* est un ouvrage de référence capital, destiné à aider les Membres à produire un flux continu d'informations indispensables au bon fonctionnement quotidien des Services météorologiques nationaux.

Conformément à sa Convention, un des buts de l'Organisation météorologique mondiale consiste à encourager la normalisation des observations météorologiques et connexes, notamment celles qui s'appliquent aux études et aux pratiques climatologiques. C'est pourquoi le Congrès météorologique mondial a adopté, et modifie lorsqu'il y a lieu, le Règlement technique dans lequel sont établies les pratiques et les procédures météorologiques que les pays Membres de l'Organisation s'engagent à suivre. Ce *Règlement technique* est complété par des guides qui indiquent de façon plus détaillée les pratiques, les procédures et les spécifications que les Membres sont invités à suivre ou à appliquer lorsqu'ils prennent leurs dispositions pour se conformer au *Règlement technique*, de même que lorsqu'ils aménagent leurs services météorologiques et climatologiques respectifs. Dans cette série de guides figure le *Guide des pratiques climatologiques* dont l'objectif est de fournir sous une forme utile, à tous ceux qui s'occupent de climatologie, des renseignements sur les pratiques et les procédures à suivre, indispensables pour mener à bien leurs travaux. Il n'entre pas dans le cadre de cet ouvrage de donner une description complète des bases théoriques ou d'énoncer l'éventail complet des applications des méthodes et des techniques climatologiques; certains ouvrages de référence sont signalés à cet effet, lorsqu'il y a lieu.

La première édition du *Guide des pratiques climatologiques* remonte à 1960; elle consistait en des textes élaborés par la Commission de climatologie et préparés, avec l'aide du Secrétariat de l'OMM, par un groupe de travail spécial. La deuxième édition du Guide a pour origine la sixième session de la Commission des applications spéciales de la météorologie et de la climatologie qui a chargé le groupe de travail de préparer un ouvrage révisé en profondeur, compte tenu de l'évolution de la climatologie au cours de la décennie écoulée ainsi que des progrès accomplis dans l'utilisation de l'information sur le climat et des connaissances acquises dans différents domaines de la météorologie et d'autres disciplines. Lors de sa septième session, la Commission a reconduit le groupe de travail pour qu'il achève la deuxième édition, un chapitre après l'autre, et produise la version qui sera finalement publiée en 1983.

Le travail portant sur la troisième édition du Guide débuta en 1990, après que le Groupe de travail consultatif de la Commission de climatologie eut approuvé, au cours d'une réunion tenue à Norrköping (Suède), quel en serait le contenu et qui serait chargé de la rédaction. Un comité de rédaction fut ensuite constitué pour superviser les auteurs principaux et les responsables des différents chapitres. Il fallut cependant attendre 1999 pour que les auteurs principaux reçoivent un projet de résumé à partir duquel ils pourraient élaborer le texte plus avant. Au cours de l'année qui suivit, le comité de rédaction se réunit à Reading (Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord), pour régler des détails et fixer le contenu de chaque chapitre. En 2001, à sa treizième session, la Commission de climatologie décida de créer une équipe d'experts avec un mandat clairement défini pour accélérer le processus. Alors que la première partie de la publication était en grande partie achevée et accessible sur le Web, il restait encore à déployer un effort conséquent pour terminer la deuxième partie ainsi que la présentation de l'information sur les exigences spéciales concernant la fourniture de services climatologiques. À sa quatorzième session, la Commission reconduisit l'Équipe d'experts chargée du Guide et décida que certaines activités déterminantes relèveraient de son Groupe de gestion. Ces activités comprenaient la poursuite de l'élaboration de la deuxième partie du Guide et de plus amples travaux en vue de l'examen et de la désignation de centres climatologiques régionaux. L'Équipe d'experts, réunie à Toulouse (France), en 2005, décida de compiler un projet de texte complet, avec annexes, pour la troisième édition du Guide.

Grâce aux efforts conjugués et aux compétences des nombreux auteurs, éditeurs et réviseurs internes et externes, le texte de la troisième édition du Guide a été finalement approuvé par le président de la Commission de climatologie juste avant la tenue de la quinzième session de cette Commission à Antalya (Turquie), en février 2010.

La présente édition du Guide sera publiée dans les six langues officielles de l'OMM ce qui permettra une diffusion optimale des connaissances. Comme ce fut le cas pour les versions précédentes, les Membres de l'OMM pourront traduire le Guide dans leurs langues nationales.

C'est avec plaisir que j'exprime ici ma gratitude à la Commission de climatologie de l'OMM qui a pris l'initiative de superviser ce long processus. Au nom de l'Organisation météorologique mondiale, je souhaite aussi remercier tous ceux qui ont contribué à la préparation de la publication. Je tiens à remercier tout spécialement M. Pierre Bessemoulin, ancien président de la Commission de climatologie, qui a guidé et supervisé la préparation du texte tout au long de la quatorzième intersession de la Commission. Je souhaite aussi souligner l'importance de la collaboration de M. Kenneth Davidson, directeur adjoint du Centre national des données climatologiques d'Asheville (États-Unis d'Amérique), et de M. Ned Guttman (États-Unis d'Amérique) qui, à la tête de l'Équipe d'experts chargée du Guide, a su tenir avec patience le rôle de consultant pour le Guide et prêter toute l'attention requise pour que l'ensemble du travail fourni se solde par un succès.



M. Jarraud
Secrétaire général

CHAPITRE 1. INTRODUCTION

1.1 OBJET ET CONTENU DU GUIDE

Les Membres de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) trouveront dans la présente publication conseils et assistance pour mettre en place des activités nationales dans le domaine de l'information et des services en climatologie. Deux éditions du Guide ont précédé la présente. La première est parue en 1960 et la deuxième, en 1983 en anglais et en 1990 en français. Bon nombre des notions fondamentales sur lesquelles reposent la science du climat et les pratiques climatologiques sont toujours les mêmes. Cependant, compte tenu de l'évolution des connaissances scientifiques en climatologie et des techniques d'analyse des données, ainsi que des avancées technologiques, s'agissant notamment des capacités de calcul et de l'instrumentation, la deuxième édition du Guide est devenue obsolète.

Cette troisième édition décrit les principes fondamentaux et les pratiques modernes qui sont importants pour la mise en place et le fonctionnement de Services climatologiques; elle fournit aussi les grandes lignes des méthodes jugées optimales en climatologie. On y présente des concepts et des réflexions, et, au lieu de rechercher l'exhaustivité, on fait référence à d'autres sources d'orientations et de renseignements techniques.

Le premier chapitre présente la climatologie et son objet, l'organisation et les fonctions d'un Service climatologique national et les programmes internationaux portant sur le climat. Le reste du Guide se divise en cinq chapitres (observations, stations et réseaux climatologiques; gestion des données climatologiques; caractérisation du climat à l'aide de jeux de données; méthodes statistiques d'analyse de jeux de données; services et produits) et deux annexes (sigles et abréviations, et activités internationales relatives au climat).

Les méthodes présentées dans le Guide découlent, dans la mesure du possible, de décisions prises en matière de normes et de pratiques et procédures recommandées. Les principales décisions ayant trait aux pratiques climatologiques figurent dans le *Règlement technique* et les manuels de l'OMM, ainsi que dans les rapports du Congrès météorologique mondial et du Conseil exécutif de l'OMM; elles sont issues principalement de recommandations formulées par la Commission de climatologie. Pour aider le lecteur à se documenter plus avant, les bibliographies fournissent des listes de publications de l'OMM et d'autres ouvrages, utiles notamment pour ceux qui œuvrent dans le domaine.

1.2 CLIMATOLOGIE

La climatologie est l'étude du climat, de ses variations et de ses extrêmes, mais aussi de ses incidences sur diverses activités comprenant, sans s'y limiter, celles qui se rapportent à la santé, à la sécurité et au bien-être. Au sens strict, le climat peut être défini comme les conditions météorologiques moyennes régnant en un lieu particulier au cours d'une certaine période de temps. Pour décrire le climat, on peut se servir de données statistiques sur les tendances centrales et la variabilité d'éléments tels que la température, les précipitations, la pression atmosphérique, l'humidité et le vent, ou alors d'un ensemble d'éléments tels que des types de temps ou des phénomènes caractéristiques d'un lieu ou d'une région, voire de l'ensemble de la planète, sur une période donnée.

1.2.1 Historique

La poésie de la Grèce antique et l'Ancien Testament faisaient déjà référence aux conditions météorologiques. Il est possible de trouver des allusions au temps encore plus anciennes, dans les Veda, à savoir les plus vieux écrits hindous datant d'environ 1800 avant J.-C. Des textes portant

spécifiquement sur la météorologie et la climatologie se trouvent dans le traité d'Hippocrate intitulé *Des airs, des eaux et des lieux*, qui date d'environ 400 avant J.-C., puis dans celui d'Aristote intitulé *Météorologiques*, d'environ 350 avant J.-C. Pour les philosophes de la Grèce antique, le mot climat signifiait «inclinaison», évoquant la variation du climat en fonction de la latitude en raison de la différence d'incidence des rayons solaires sur la surface terrestre. Concernant le climat, on trouve aussi des déductions probantes, basées sur la logique, dans les travaux des philosophes de l'école d'Alexandrie que sont Ératosthène et Aristarque.

Avec le développement de l'exploration géographique au XV^e siècle, des descriptions des climats de la Terre et des conditions favorisant ces climats ont vu le jour. L'invention d'instruments météorologiques, notamment le thermomètre mis au point par Galilée en 1593 et le baromètre par Torricelli en 1643, va donner un élan aux travaux qui vont permettre d'établir des relations mathématiques et physiques entre les différentes caractéristiques de l'atmosphère. Celles-ci vont se traduire ensuite en des relations grâce auxquelles il sera possible de décrire l'état du climat à différentes périodes et en différents lieux.

C'est George Hadley le premier qui, en 1735, interprète le mouvement caractéristique de la circulation de l'atmosphère entre les zones tropicales et les zones subtropicales, avec les phénomènes des alizés, de la convection tropicale et des déserts tropicaux qui y sont associés. Cette composante de la circulation prendra son nom: cellule de Hadley. Julius von Hann est l'auteur du célèbre Manuel de climatologie dont le premier volume fut publié en 1883; il s'agit d'un ouvrage portant sur la climatologie générale et régionale, qui regroupait des données, mais aussi des descriptions relatées par des témoins oculaires de conditions atmosphériques et climatiques. En 1918, Wladimir Köppen établit la première classification détaillée des climats de la planète, fondée sur la couverture végétale terrestre. La climatologie descriptive connut ensuite différents approfondissements. Le géographe E.E. Fedorov tenta, par exemple, de décrire les climats locaux en se basant sur des observations quotidiennes des conditions atmosphériques.

Au cours des trente premières années du XX^e siècle, des efforts diligents de description de l'atmosphère combinant observations mondiales et théorie mathématique ont conduit à l'identification de phénomènes atmosphériques de grande échelle. Distinguons à ce sujet l'œuvre de Sir Gilbert Walker qui conduisit des études approfondies sur la mousson en Inde, l'oscillation australe, l'oscillation de l'Atlantique Nord et l'oscillation du Pacifique Nord.

Il y lieu de citer aussi parmi les travaux d'envergure menés en climatologie, ceux réalisés par Tor Bergeron (sur la climatologie dynamique en 1928) et Wladimir Köppen et Rudolf Geiger (qui ont publié un manuel de climatologie en 1936). Geiger a commencé à décrire en détail le concept de microclimatologie en 1927, mais il a fallu attendre la Seconde Guerre mondiale pour que des progrès soient réalisés à ce sujet. Au cours de la guerre, il a été jugé nécessaire, à des fins de planification, d'élaborer et de mettre à l'épreuve le concept de risque probable appliqué aux données météorologiques plusieurs mois voire plusieurs années à l'avance. C.W. Thornthwaite a dressé une classification du climat en 1948 en se fondant sur le bilan hydrique et l'évapotranspiration. Dans les décennies qui suivirent, les théories sur la climatologie firent de grands pas en avant.

Créée en 1950 pour succéder à l'Organisation météorologique internationale, en place depuis 1873, l'OMM mit sur pied l'organisation d'un système de collecte de données et ouvrit la voie à une analyse systématique du climat qui allait conduire à des conclusions sur la nature du climat. Au cours des dernières décennies du XX^e siècle, dans le cadre de l'étude des changements climatiques, on a commencé à se concentrer sur la nécessité d'appréhender le climat en tant que composante principale d'un système planétaire de processus en interaction touchant tous les éléments du système terrestre (voir la section 1.2.2). Un changement climatique est une variation statistiquement significative de l'état moyen du climat ou de sa variabilité, persistant pendant une période prolongée (généralement des décennies ou plus). Les changements climatiques peuvent être dus à des processus internes naturels, à des forçages externes ou à des changements anthropiques (résultant des activités humaines ou produits par les êtres humains) persistants, touchant la composition de l'atmosphère ou l'utilisation des sols. Des efforts considérables, déployés à l'échelle nationale et internationale, portent aussi sur d'autres aspects de la

climatologie. Il s'agit notamment d'améliorer la mesure et la surveillance continue du climat, d'approfondir les connaissances sur les causes et sur les schémas de la variabilité naturelle, de mettre au point des méthodes plus fiables de prévision du climat à une échéance allant de la saison à plusieurs années, et de renforcer la compréhension des liens existant entre le climat, d'une part, et les activités d'ordre social et économique et les changements écologiques, d'autre part.

1.2.2 Le système climatique

Le système climatique (figure 1.1) est un système complexe et interactif comprenant l'atmosphère, la surface terrestre, les neiges et les glaces, les océans et autres masses d'eau et les organismes vivants. L'atmosphère est l'enveloppe gazeuse de la Terre. L'atmosphère sèche est composée presque entièrement d'azote et d'oxygène, mais aussi d'argon, d'hélium, de dioxyde de carbone, d'ozone et de méthane en petites quantités, et de plusieurs autres gaz à l'état de traces. L'atmosphère contient aussi de la vapeur d'eau, de l'eau condensée sous forme de gouttelettes dans les nuages et des aérosols. Dans le système climatique terrestre, l'hydrosphère est la composante qui regroupe toutes les eaux de surface et les eaux souterraines à l'état liquide, telles que les océans, les mers, les fleuves, les lacs d'eau douce, les nappes souterraines, etc. On entend par cryosphère, l'ensemble des constituants du système terrestre composés d'eau à l'état solide, qu'il s'agisse de neige ou de glace (glaces de mer, de lac et de cours d'eau, couverture neigeuse, précipitations solides, glaciers, calottes glaciaires, inlandsis et sols gelés de façon permanente ou saisonnière). La lithosphère superficielle est la partie supérieure de la terre solide, à savoir la croûte tant continentale qu'océanique. La biosphère comprend tous les éco-systèmes et organismes vivants dans l'atmosphère, sur la terre (biosphère terrestre) ou dans les océans (biosphère marine), y compris la matière organique morte dérivée, telle que les déchets, la matière organique des sols et les détritiques des océans.

Sous les effets du rayonnement solaire et en fonction des propriétés radiatives de la surface, les interactions entre les composantes du système climatique déterminent le climat que connaît notre planète. Les interactions de l'atmosphère avec les autres composantes jouent un rôle prépondérant dans la formation du climat. L'énergie que recueille l'atmosphère provient directement du rayonnement solaire incident ou indirectement de processus dans lesquels la

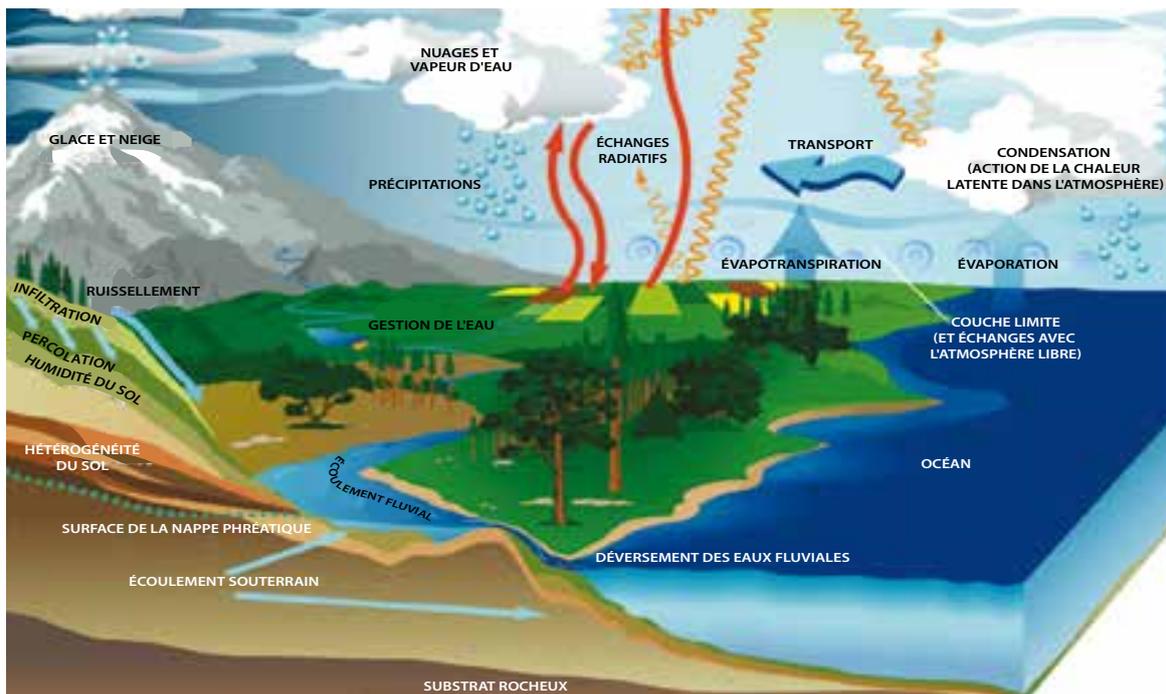


Figure 1.1. Le système climatique

surface terrestre intervient. Le système dans son ensemble recherchant, sans pouvoir les atteindre, stabilité et équilibre, cette énergie est redistribuée en permanence sur le plan vertical et sur le plan horizontal par des processus thermodynamiques ou des mouvements de grande échelle. La vapeur d'eau joue un rôle important dans la redistribution verticale de la chaleur par la condensation et le transport de chaleur latente. Compte tenu de sa capacité thermique énorme, l'océan atténue la vitesse à laquelle les variations de température se produisent dans l'atmosphère et alimente l'atmosphère en vapeur d'eau et en chaleur sensible. La répartition des continents influe sur les courants océaniques, tout comme les massifs montagneux le font sur les mouvements de l'atmosphère. La glace, qu'elle se situe aux pôles, en montagne ou en mer, réfléchit le rayonnement solaire vers l'espace. Dans les hautes latitudes, la glace de mer agit comme un isolant, protégeant ainsi l'océan contre une perte rapide d'énergie en faveur de l'atmosphère bien plus froide. La biosphère, qui comprend les activités humaines, influe sur les éléments de l'atmosphère, notamment la concentration du dioxyde de carbone, ainsi que sur les caractéristiques de la surface terrestre comme l'humidité du sol et l'albédo.

Les interactions entre les composantes se produisent à toutes les échelles spatiales (figures 1.2 et 1.3). À petite échelle, les caractéristiques climatiques portent sur des espaces restreints, à savoir un bâtiment, une plante ou un champ. Une variation microclimatique peut avoir des conséquences importantes quand les caractéristiques physiques d'un espace changent. À titre d'exemple, de nouveaux bâtiments peuvent accentuer les conditions de vent, réduire le renouvellement de l'air, rendre excessif le ruissellement des eaux de pluie ou encore augmenter la pollution et la chaleur. Les variations naturelles d'un microclimat, notamment celles ayant trait au fait qu'un endroit se trouve à l'abri ou exposé, au soleil ou à l'ombre, sont aussi importantes: elles peuvent déterminer, par exemple, quels végétaux prospéreront en un lieu donné ou s'il est nécessaire de prendre des mesures particulières pour vaquer à ses occupations en toute sécurité, qu'il s'agisse d'activités professionnelles ou de loisir. L'échelle moyenne représente le climat d'une région à l'étendue relativement faible, telle que le bassin versant d'un cours d'eau, une vallée, une agglomération ou une forêt. Les variations d'échelle moyenne tiennent une place importante

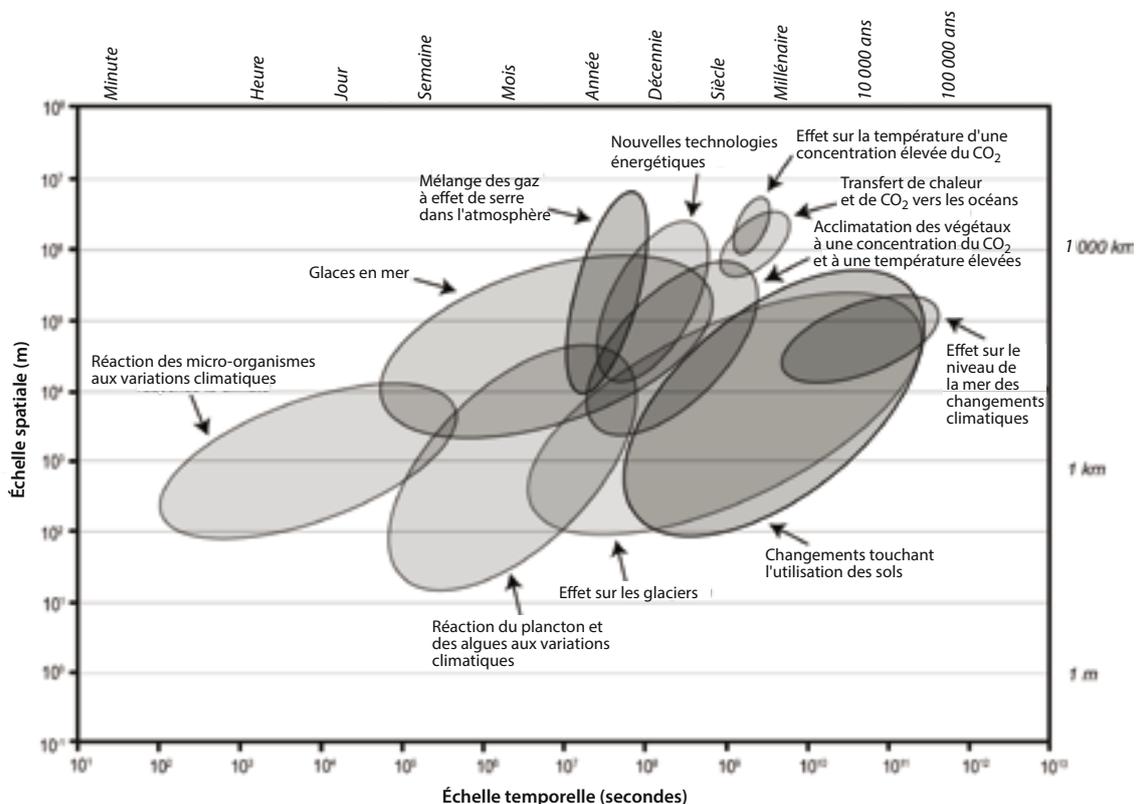


Figure 1.2. Échelles temporelle et spatiale (avec l'aimable autorisation de Todd Albert, États-Unis d'Amérique)

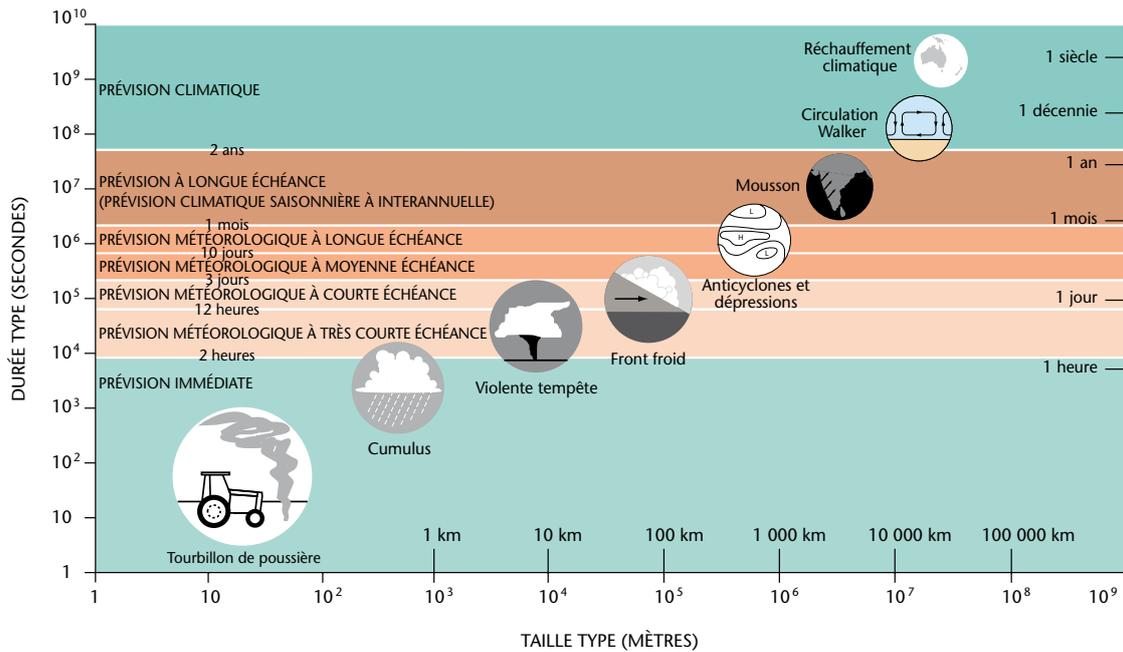


Figure 1.3. Durée de vie des phénomènes atmosphériques (d'après J.W. Zillman, *Bulletin de l'OMM*, Vol. 48(2), 1999)

dans des applications telles que l'utilisation des sols, l'irrigation et les barrages, et le choix de l'emplacement d'installations de mise en valeur d'énergies naturelles ou de celui de centres de villégiature. À macro-échelle, le climat étudié est celui d'une vaste région géographique, d'un continent ou du globe. Il détermine les ressources à l'échelon national et les contraintes pesant sur la production agricole et la gestion de l'eau; il est donc lié à la nature et à la portée de la santé et du bien-être. Il définit et détermine aussi les incidences des grandes composantes de la circulation planétaire, telles que le phénomène El Niño-Oscillation australe (ENSO), les moussons et l'oscillation de l'Atlantique Nord.

En ce qui concerne l'échelle temporelle, elle s'entend en durée d'un intervalle pouvant se mesurer en minutes ou en heures, ou alors en décennies, en siècles voire plus. Il importe de connaître les caractéristiques d'un élément sur une heure, quand il s'agit par exemple d'opérations agricoles, notamment l'épandage de pesticides, ou de la surveillance de l'utilisation faite de l'énergie, pour le chauffage et la climatisation. Les caractéristiques d'un élément sur 24 heures pourront déterminer les activités humaines qu'il est possible de mener en toute sécurité. Sur plusieurs mois ou années, le climat déterminera par exemple le choix des cultures ou la possibilité de s'approvisionner en eau potable et en nourriture. Les études portant sur des périodes relativement longues, de plusieurs décennies à plusieurs siècles, importent, car elles permettent de faire apparaître les variations du climat causées par des phénomènes naturels, notamment les variations de la circulation atmosphérique et océanique, et par les activités humaines.

L'évolution du climat est devenue une préoccupation de premier plan pour la société. Par ses activités, en particulier l'utilisation des combustibles fossiles, l'être humain a entraîné des changements dans la composition de l'atmosphère du globe. L'augmentation marquée de la concentration troposphérique du dioxyde de carbone et du méthane au cours de l'ère industrielle, mais aussi celle des émissions d'aérosols et de particules, ont des conséquences considérables pour le climat de la planète. Les chlorofluorocarbones, largement utilisés par le passé comme propulseurs d'aérosols, liquides de nettoyage et frigorigènes, sont principalement à l'origine de l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique. Un cinquième de la forêt tropicale de la planète a été rasé entre 1960 et 2000, ce qui a probablement modifié les cycles hydrologiques complexes de méso-échelle et d'échelle mondiale. Les canyons artificiels que forment les immeubles dans les villes ainsi que les surfaces goudronnées des routes augmentent la quantité du rayonnement solaire absorbée et provoquent des îlots de chaleur urbains. En accélérant le ruissellement des eaux de pluie, en abattant les arbres et en éliminant la

végétation, on réduit la quantité de vapeur d'eau produite par la transpiration, qui ne peut donc plus atténuer la chaleur. La pollution émanant des véhicules et des bâtiments s'accumule, en particulier en période de calme atmosphérique, ce qui provoque de nombreux problèmes de santé et endommage les structures.

L'OMM est consciente des inquiétudes croissantes que soulèvent, partout dans le monde, les changements irréversibles que subit l'environnement naturel. Aussi assume-t-elle son rôle de chef de file en encourageant les études sur les changements qui touchent le système climatique et sur les effets de ces changements sur l'humanité, sur la production d'énergie et de nourriture, et sur les réserves d'eau, à l'échelle de la planète. L'évolution du climat et ses conséquences éventuelles, y compris les effets qui sont déjà apparus, sont devenues des sujets brûlants qui préoccupent les décideurs depuis quelques années. Dans certains pays, les inquiétudes qu'ils suscitent ne sont surpassées que par les questions économiques et les problèmes de défense nationale. Et même dans ces deux domaines, le climat doit être pris en compte dans la planification stratégique et la prise de décision tactique. De nombreuses conférences internationales se sont tenues pour qu'on puisse réfléchir aux moyens de réduire les incidences des activités humaines sur le climat et pour qu'on élabore des stratégies visant à tirer parti du climat au profit du domaine socio-économique. Il s'agit notamment des conférences mondiales sur le climat qui ont eu lieu à Genève en 1979, 1990 et 2009, de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement, organisée à Rio de Janeiro en 1992, et du Sommet mondial pour le développement durable tenu à Johannesburg en 2002. La création du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et celle du Comité intergouvernemental de négociation de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques constituent aussi des étapes importantes en ce qui concerne l'action entreprise en réaction aux changements du climat qu'on associe aux activités humaines.

1.2.3 **Utilisations de l'information et de la recherche en climatologie**

La climatologie est devenue une discipline scientifique dynamique à usages multiples dans un large champ d'application. De nouvelles techniques sont mises au point et des études entreprises pour savoir comment le climat s'applique à de nombreux domaines, notamment l'agriculture, la sylviculture, les écosystèmes, l'énergie, l'industrie, la production et la distribution des biens de consommation, la construction et l'ingénierie, le bien-être de l'homme, les transports, le tourisme, l'assurance, les ressources en eau et la gestion des catastrophes, la pêche, et l'aménagement côtier. Pour que les climatologues puissent améliorer leur capacité d'informer et de conseiller les utilisateurs, et de répondre à la multitude de questions qui se posent au sujet du climat, ils doivent pouvoir bénéficier en permanence de programmes de recherche durables et utiles sur le système climatique et sur la vaste influence du climat, ainsi que sur les applications des connaissances climatologiques au profit de la société. Par le passé, l'étude du climat fournissait les données fondamentales, l'information et les techniques permettant de définir les climats aux échelles locale, moyenne et mondiale. Il s'agit là d'éléments primordiaux, mais qui servent aussi de matières premières à des analyses plus approfondies et à des services lorsqu'ils sont couplés et analysés avec d'autres données sociales, économiques et physiques. Il est fermement établi à présent, dans diverses conventions, telles que la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, qu'il est indispensable de disposer de données et de prévisions climatologiques pour la planification appliquée à l'atténuation des catastrophes et au développement durable, ainsi que dans le cadre de toutes les actions portant sur les conséquences des changements climatiques.

La climatologie appliquée tire le meilleur parti possible des connaissances et de l'information en météorologie et en climatologie pour apporter des solutions aux problèmes sociaux, économiques et environnementaux d'ordre pratique. Les services climatologiques sont conçus pour divers utilisateurs appartenant au public et aux domaines commercial et industriel. Les évaluations des effets de la variabilité et de l'évolution du climat sur les activités humaines, ainsi que des effets des activités humaines sur le climat sont des facteurs importants du développement économique, de l'action sociale et de la gestion des ressources sur le plan local, national et mondial.

L'intérêt actuel pour les incidences du développement économique et d'autres activités humaines sur le climat et pour la façon dont la variabilité et l'évolution du climat influent sur les sociétés humaines souligne la nécessité de poursuivre les travaux de recherche portant sur les processus physiques et dynamiques qui régissent le système climatique, ainsi que la nécessité de décrire ces processus du point de vue statistique. Pour que nous puissions réagir de plus en plus efficacement aux problèmes socio-économiques, il est fondamental de disposer de connaissances appropriées s'agissant de la variabilité naturelle du climat, de la sensibilité du climat aux activités humaines et de la possibilité de prévoir le temps et le climat pour des périodes allant de plusieurs jours à plusieurs décennies. La climatologie physique regroupe un large éventail d'études qui portent notamment sur les processus interactifs du système climatique. La climatologie dynamique est étroitement liée à la climatologie physique, mais porte essentiellement sur les configurations de la circulation générale de l'atmosphère. Dans les deux disciplines, il est question de décrire et d'étudier les propriétés et le comportement de l'atmosphère.

L'amélioration de la prévision du climat constitue à présent une activité importante à l'échelle mondiale. Les prévisions se fondaient à l'origine sur des techniques empiriques et statistiques, mais elles reposent de plus en plus à présent sur des techniques élargies de prévision numérique du temps. Des modèles de plus en plus complexes sont mis au point; ils simulent les éléments que sont l'atmo-sphère, l'océan, la surface terrestre, les glaces en mer ainsi que les aérosols et les gaz de l'atmosphère, et les relient entre eux. Il est possible d'utiliser des modèles pour simuler les changements climatiques au cours de plusieurs décennies et aussi pour prévoir les variations climatiques saisonnières ou interannuelles. Les bulletins saisonniers sur l'évolution probable du climat se présentent en général sous la forme d'une probabilité que la valeur d'un élément, la température moyenne ou le cumul des pluies sur une période donnée, par exemple, soit supérieure ou inférieure à la normale ou proche de celle-ci. Ces bulletins donnent à l'heure actuelle de bons résultats dans les régions où la température de la mer en surface et les conditions atmosphériques sont étroitement liées, notamment dans beaucoup de régions tropicales. En raison de la nature probabiliste de ce type de prévision, il convient de cibler avec beaucoup d'attention leur diffusion et leur application. Les études portent de plus en plus sur l'intégration de l'information climatologique dans la prise de décision.

Tous les produits et services climatologiques, de l'information produite à partir de données sur les conditions climatiques et météorologiques passées aux estimations du climat futur, devant servir à la recherche, à l'exploitation, au commerce ou au domaine public, s'appuient sur des données découlant de l'observation et de l'enregistrement systématiques et généralisés de plusieurs variables principales qui permettent d'établir les caractéristiques du climat sur des échelles de temps fort diverses. La pertinence d'un service climatologique est fortement tributaire de la densité spatiale et de l'exactitude des observations effectuées ainsi que des processus de gestion des données employés. Sans l'observation systématique du système climatique, il ne peut y avoir de services climatologiques.

Les exigences des utilisateurs allant en se diversifiant, le besoin de disposer d'une information d'une précision accrue et communiquée en temps voulu ne cesse d'augmenter rapidement. Il est dans l'intérêt de tous les pays d'appliquer des pratiques cohérentes en ce qui concerne l'observation du climat, le traitement des relevés climatologiques et le maintien de la qualité et de l'utilité indispensables des services proposés.

1.3 PROGRAMMES INTERNATIONAUX RELATIFS AU CLIMAT

La Commission de climatologie (CCI) relevant de l'OMM répond à l'ensemble des besoins des Membres de l'OMM en conseils, assistance et coordination dans le cadre de nombreuses activités climatologiques. Elle œuvre depuis 1929, date à laquelle l'Organisation météorologique internationale l'a constituée, son nom ayant été légèrement modifié et son mandat ayant été ajusté en fonction de l'évolution des demandes et des priorités. Elle fixe les orientations générales de la mise en œuvre du Programme climatologique mondial au sein de l'OMM. L'annexe 2 fournit davantage de détails au sujet des programmes internationaux relatifs au climat.

1.4 **ACTIVITÉS MONDIALES ET RÉGIONALES RELATIVES AU CLIMAT**

Il incombe à tous les pays de cerner les besoins du public en information relative au climat et d'y répondre. Pour cela, il leur faut mener à bien différentes activités: observation du climat, gestion et transmission des données, différents services de données, surveillance continue du système climatique, applications pratiques et services aux différents groupes d'utilisateurs, prévision du climat aux échelles intrasaisonnières et interannuelles, projection climatique, évaluation de la variabilité et de l'évolution du climat axée sur les stratégies, et détermination des priorités de la recherche pour exploiter au maximum les avantages à tirer de toutes ces activités. Beaucoup de pays, en particulier les pays en développement et les pays les moins avancés, ne disposent pas de capacités suffisantes pour assurer tous ces services. En 2009, les participants à la troisième Conférence mondiale sur le climat ont décidé d'instaurer un Cadre mondial pour les services climatologiques afin de consolider la production, l'accessibilité, la fourniture et l'application de services et de prévisions climatologiques à base scientifique. Le Cadre mondial vise à servir de mécanisme à ceux qui produisent et fournissent l'information sur le climat ainsi qu'à tous les secteurs sensibles au climat dans le monde, pour qu'ils unissent leurs efforts afin d'aider les populations de la planète à relever le défi de la variabilité et de l'évolution du climat.

L'Organisation météorologique mondiale a mis sur pied un réseau de centres mondiaux de production de prévisions à longue échéance (CMP) et de centres climatologiques régionaux (CCR) pour aider les pays Membres à répondre convenablement à leurs besoins en information sur le climat. Les définitions et les fonctions obligatoires des CMP et des CCR figurent dans le volume I – Aspects mondiaux, du *Manuel du Système mondial de traitement des données et de prévision* (OMM-N° 485) et font partie du Règlement technique de l'OMM. Le Manuel donne aussi les critères de désignation par l'OMM des CMP, des CCR et d'autres centres opérationnels.

Les CMP désignés produisent des prévisions mondiales à longue échéance en respectant les critères définis dans le *Manuel du Système mondial de traitement des données et de prévision*; ils sont reconnus par l'OMM sur recommandation de la Commission des systèmes de base. En outre l'OMM a désigné deux centres principaux, à savoir le Centre principal pour les prévisions d'ensemble multi-modèle à longue échéance et le Centre principal du système de vérification normalisée des prévisions à longue échéance, qui ajoutent de la valeur aux services opérationnels fournis par les CMP.

Les CCR ont été créés pour aider les Membres de l'OMM d'une Région donnée à améliorer la qualité et la cohérence des services et produits climatologiques qu'ils proposent, notamment dans le domaine des prévisions à longue échéance, et à renforcer leurs capacités pour satisfaire les besoins nationaux en matière d'information climatologique. Les principaux clients des CCR sont les Services météorologiques et hydrologiques nationaux (SMHN) et les autres CCR se trouvant dans la région et les zones avoisinantes. Les services et produits des CCR sont fournis aux SMHN qui leur apportent davantage de précision avant de les diffuser. Les CCR ne distribuent pas leurs produits et services directement aux utilisateurs sans l'accord préalable des SMHN de la Région. Les compétences d'un CCR n'empiètent pas sur celles des SMHN, ni ne s'y substituent. Il importe de noter que la liaison avec les groupes d'utilisateurs nationaux et la diffusion de bulletins météorologiques et d'avis relèvent des SMHN et que tous les CCR sont tenus de respecter les principes de la résolution 40 (Cg-XII) de l'OMM concernant l'échange de données et de produits.

L'ensemble des produits et services émanant des CCR peut varier d'une Région à l'autre en fonction des priorités fixées par le conseil régional compétent. Certaines fonctions essentielles sont cependant remplies par tous les CCR désignés par l'OMM, et ce en application de critères établis afin qu'une certaine uniformité de service soit garantie partout dans le monde. Les fonctions obligatoires sont les suivantes:

- a) Des activités opérationnelles relevant de la prévision à longue échéance, y compris l'interprétation et l'évaluation des produits pertinents fournis par les CMP, l'élaboration de produits adaptés aux besoins régionaux et sous-régionaux, et la rédaction de déclarations consensuelles sur les prévisions régionales et sous-régionales;

- b) Une surveillance du climat, y compris l'établissement de diagnostics climatiques d'échelle régionale et sous-régionale, l'analyse de la variabilité du climat et des extrêmes climatiques, et la mise en place d'une veille régionale des phénomènes climatiques extrêmes;
- c) Des services de données à l'appui de la prévision à longue échéance, y compris l'élaboration de jeux de données climatologiques régionaux;
- d) La formation à l'utilisation des produits et services opérationnels des CCR.

Outre ces fonctions obligatoires, plusieurs autres activités sont hautement recommandées, notamment la réduction d'échelle des scénarios de l'évolution du climat, des services de données non opérationnels, en particulier le sauvetage et l'uniformisation des données, des fonctions de coordination, la formation et le renforcement des capacités, et la recherche et développement.

Les conseils régionaux ont aussi la possibilité de créer des centres chargés de remplir diverses fonctions ayant trait au climat, telles qu'elles sont précisées dans le volume II – Aspects régionaux, du *Manuel du Système mondial de traitement des données et de prévision*. Ce volume ne faisant pas partie du Règlement technique de l'OMM, les centres en question ne sont pas soumis à la procédure officielle de désignation. L'entière responsabilité de l'élaboration et de l'approbation des critères s'appliquant à ces centres incombe donc aux conseils régionaux. Ces centres jouent souvent un rôle important en participant aux réseaux climatologiques régionaux. Il faut noter cependant que l'appellation «CCR de l'OMM» est exclusivement réservée aux entités désignées officiellement en application des dispositions figurant dans le volume I – Aspects mondiaux, du *Manuel du Système mondial de traitement des données et de prévision*, et qu'elle ne peut s'appliquer à d'autres centres.

Reconnaissant que les prévisions climatiques peuvent apporter une aide considérable dans l'adaptation à la variabilité du climat et aux changements climatiques et l'atténuation de leurs effets, l'OMM a contribué à la création des forums régionaux sur l'évolution probable du climat. Reposant sur une approche essentiellement consensuelle, ces forums sont chargés globalement de produire et de diffuser des évaluations concernant l'état présent du climat régional et son évolution au cours de la saison à venir. Ils réunissent sur une base opérationnelle des experts nationaux, régionaux et internationaux du climat chargés de produire des aperçus régionaux du climat en se fondant sur l'apport des SMHN, des institutions régionales, des CCR et des CMP. Ils favorisent et améliorent les retours d'information entre utilisateurs et experts du climat, et catalysent la mise au point de produits adaptés aux utilisateurs. Ils permettent d'analyser aussi les obstacles à l'emploi de l'information climatologique, de partager les enseignements tirés de l'utilisation de produits diffusés antérieurement et d'affiner les applications destinées aux différents secteurs. Ces forums donnent souvent lieu à l'organisation de forums nationaux au cours desquels les spécialistes précisent l'évolution probable du climat et les risques afférents à l'échelle nationale, y compris les avis à transmettre aux décideurs et au grand public.

Le processus des forums régionaux sur l'évolution probable du climat peut varier de forme suivant la région, mais il comporte habituellement au moins la première des activités suivantes et, dans certains cas, les quatre:

- a) Une réunion de climatologues régionaux et internationaux chargés de dégager un consensus concernant les perspectives d'évolution du climat régional, habituellement sous forme probabiliste;
- b) Un forum plus large, réunissant des climatologues et des représentants des secteurs d'utilisateurs, destiné à la présentation des prévisions consensuelles sur l'évolution probable du climat, à l'analyse et à la présentation des incidences prévues par secteur, et à la formulation de stratégies de parade;
- c) Des stages de formation sur la prévision saisonnière visant à renforcer les capacités des climatologues nationaux et régionaux;
- d) Des séances de sensibilisation spéciales, avec la participation de spécialistes des médias, devant permettre d'élaborer des stratégies efficaces de communication.

1.5 ACTIVITÉS NATIONALES RELATIVES AU CLIMAT

Dans la plupart des pays, la responsabilité des activités nationales en climatologie incombe essentiellement depuis longtemps aux SMHN. Ces activités comprennent l'observation du climat, le contrôle de qualité des relevés et leur archivage; la diffusion de l'information climatologique; la recherche sur le climat; la prévision climatique; et les applications des connaissances sur le climat. Il faut noter cependant que les universités et les entreprises du secteur privé contribuent de plus en plus à ces activités.

Dans certains pays, les SMHN disposent d'un seul service chargé de l'ensemble des activités en climatologie. Dans d'autres, on a estimé qu'il était préférable de répartir la responsabilité des différentes activités climatologiques (notamment l'observation, la gestion des données et la recherche) entre différentes entités au sein des SMHN. La répartition des responsabilités peut être réalisée en fonction de compétences de nature identique, pour couvrir par exemple l'analyse synoptique et l'observation du climat ou encore la recherche sur la prévision météorologique et climatique. Dans certains cas, des pays créent des bureaux par secteur géographique ou par secteur d'activité pour qu'ils se chargent des activités sous-nationales, alors que dans d'autres on met en commun et on conserve les compétences propres à certaines activités en créant une entité de coopération régionale pour répondre aux besoins d'un groupe de pays.

Quand les responsabilités sont réparties au sein d'un SMHN, ou quand elles incombent à une autre institution, il est essentiel que d'étroites relations soient entretenues entre ceux qui se chargent de l'acquisition et de la gestion des observations et ceux qui ont pour fonction l'application des données climatologiques à la recherche ou aux services. Ces relations sont déterminantes, car elles permettent de veiller à ce que les réseaux, mais aussi le contenu et le contrôle de la qualité des observations soient satisfaisants. Il est essentiel aussi que le personnel soit formé pour remplir les fonctions qui lui incombent, de sorte que les activités climatologiques soient menées à bien avec autant d'efficacité que dans le cas d'un centre ou autre entité climatologique intégré. Si le traitement des données est réparti entre plusieurs lieux, il importe de créer une autorité de coordination qui veille à ce que les jeux de données ne présentent pas de divergences.

Au sein d'un SMHN, les climatologues sont directement chargés des activités suivantes, ou alors fournissent des conseils et avis y afférents:

- a) Planification des réseaux de stations;
- b) Choix de l'emplacement des stations climatologiques, notamment en cas de changement de lieu d'implantation;
- c) Entretien et sécurité des stations d'observation;
- d) Inspection régulière des stations;
- e) Sélection et formation des observateurs;
- f) Choix des instruments ou systèmes d'observation à installer pour veiller à la représentativité et à l'homogénéité des relevés obtenus (voir le chapitre 2).

Une fois les données d'observation recueillies, il convient d'en assurer la gestion. Parmi les fonctions que regroupe la gestion de l'information provenant des stations d'observation, citons l'acquisition des données et des métadonnées, le contrôle de qualité, le stockage, l'archivage et l'accès (voir le chapitre 3). Il faut aussi assurer la diffusion de l'information recueillie relative au climat. Un SMHN doit pouvoir anticiper et comprendre les besoins en information climatologique des pouvoirs publics, des ministères, des institutions de recherche et des universités, du secteur du commerce, de celui de l'industrie et du grand public, notamment en menant des enquêtes; il doit pouvoir aussi promouvoir l'utilisation de l'information et en assurer la commercialisation, proposer son expertise pour interpréter les données et fournir des conseils sur l'utilisation des données (voir le chapitre 6).

Un SMHN doit assurer le bon fonctionnement d'un programme de recherche et de développement ou alors entretenir des relations de travail avec une institution qui dispose de capacités de recherche et de développement en lien direct avec les fonctions et opérations

climatologiques du SMHN. Le programme de recherche devrait examiner les applications et produits climatologiques qui améliorent, auprès des utilisateurs, la compréhension et l'application de l'information climatologique. Il convient aussi d'entreprendre des études pour rechercher de nouvelles méthodes ou améliorer l'efficacité des méthodes existantes, appliquées à la gestion d'un volume de données ne cessant de croître, à l'accès par les utilisateurs des données archivées et à la numérisation des données. Il y a lieu aussi d'évaluer régulièrement les programmes d'assurance de la qualité s'appliquant aux observations et aux résumés climatologiques, dans le but de mettre au point des techniques meilleures et plus rapides. Il faudrait aussi faire progresser l'utilisation des plates-formes de diffusion de l'information, notamment l'internet.

Pour pouvoir faire face aux responsabilités qui lui incombent sur le plan national et international, et renforcer ses capacités en matière d'activités climatologiques, un SMHN doit impérativement disposer d'un personnel qualifié. Il lui appartient par conséquent d'entretenir des liens avec des établissements de formation et de recherche en climatologie, notamment appliquée, voire de développer de tels liens. Il doit en particulier veiller à ce que son personnel suive des programmes de formation qui complètent la formation générale en météorologie par des cours portant sur les compétences propres à la climatologie. Le Programme d'enseignement et de formation professionnelle de l'OMM favorise et soutient la collaboration internationale qui vise notamment à élaborer une série de moyens permettant d'assurer la formation continue, à savoir des bourses, des conférences, des visites d'information, l'apprentissage en ligne, les cours de formation et le transfert de technologie vers les pays en développement. En outre, d'autres programmes de l'OMM entreprennent des activités de renforcement des capacités relatives à la climatologie (données, surveillance, prévision, applications et services), notamment le Programme climatologique mondial, le Programme d'hydrologie et de mise en valeur des ressources en eau, et le Programme de météorologie agricole.

Pour donner de bons résultats, un programme national de services climatologiques doit posséder une structure qui fonctionne efficacement dans le pays. La structure doit permettre de relier des applications disponibles, la recherche scientifique, des capacités technologiques et les communications dans un système unifié. Les composants essentiels d'un programme national de services climatologiques sont les suivants:

- a) Mécanismes permettant de prendre en compte les besoins de tous les utilisateurs en matière d'information et de prévision climatologiques;
- b) Collecte d'observations météorologiques et connexes, gestion de bases de données et fourniture de données;
- c) Coordination des activités de recherche scientifique dans les domaines météorologique, océanographique, hydrologique et connexes pour améliorer les services climatologiques;
- d) Études pluridisciplinaires visant à déterminer, à l'échelle d'un pays, d'un secteur ou d'une population donnée, la vulnérabilité aux risques que posent la variabilité et l'évolution du climat, pour qu'il soit possible de formuler des stratégies de parade et de recommander des politiques nationales;
- e) Élaboration et fourniture de services d'information et de prévision climatologiques visant à satisfaire les besoins des utilisateurs;
- f) Liens avec d'autres programmes présentant des objectifs similaires ou connexes pour éviter que les efforts déployés se chevauchent inutilement.

Il faut bien se dire qu'un programme national de services climatologiques relève d'un processus continu et peut donc évoluer dans sa structure. L'analyse permanente et la prise en compte des exigences et des retours d'information des utilisateurs, qui conduisent à la mise au point de produits et de services utiles, font partie intégrante de ce processus. Pour l'élaboration du programme, il est essentiel de recueillir prescriptions et spécifications. Les utilisateurs peuvent contribuer au processus en évaluant les produits, ce qui conduit invariablement à des ajustements et à des améliorations. Il peut se révéler difficile de mesurer les avantages qu'apporte l'application des produits, mais l'interaction avec les utilisateurs, par le biais d'ateliers, de stages de formation ou d'autres activités de communication, facilitera le processus. Le fait de disposer de documents étayant les exigences des utilisateurs et leur opinion positive permet d'asseoir le bien-fondé d'un programme national de services climatologiques ou de dûment justifier des demandes d'aide

financière internationale concernant divers aspects du programme. Le fait de disposer de documents attestant l'approbation du programme par un ou plusieurs représentants de groupes d'utilisateurs constitue un élément essentiel quand il s'agit d'orienter les opérations futures ou de promouvoir le service en tant qu'entité couronnée de succès.

1.6 BIBLIOGRAPHIE

1.6.1 Publications de l'OMM

- Organisation météorologique mondiale, 1986: *Report of the International Conference on the Assessment of the Role of Carbon Dioxide and of Other Greenhouse Gases in Climate Variations and Associated Impacts* (Villach, Autriche, 9–15 octobre 1985) (WMO-No. 661), Genève.
- , 1990: *Forty Years of Progress and Achievement: A Historical Review of WMO* (Sir Arthur Davies, éd.) (WMO-No. 721), Genève.
- , 1990: *Guide des pratiques climatologiques*, deuxième édition (OMM-N° 100), Genève.
- , 1990: *L'OMM et son œuvre – Quarante ans au service de la météorologie et de l'hydrologie internationales* (OMM-N° 729), Genève.
- , 1991: *Manuel du Système mondial de traitement des données*. Vol. I – Aspects mondiaux. Supplément N° 10, octobre 2005 (OMM-N° 485), Genève.
- , 1992: *Manuel du Système mondial de traitement des données*. Vol. II – Aspects régionaux. Supplément N° 2, août 2003 (OMM-N° 485), Genève.
- , 1992: *Vocabulaire météorologique international* (OMM-N° 182), Genève.
- , 1997: *Report of the GCOS/GOOS/GTOS Joint Data and Information Management Panel*, Troisième session (Tokyo, Japon, 15–18 juillet 1997) (WMO/TD-No. 847, GCOS-No. 39, GOOS-No. 11, GTOS-No. 11), Genève.
- , 2000: *OMM – 50 ans d'activité* (OMM-N° 912), Genève.
- , 2003: *Climate: Into the 21st Century*. Cambridge, Cambridge University Press.
- , 2003: *Proceedings of the Meeting on Organization and Implementation of Regional Climate Centres* (Genève, 27–28 novembre 2003) (WMO/TD-No. 1198, WCASP-No. 62), Genève.
- , 2004: *Implementation Plan for the Global Observing System for Climate in support of the UNFCCC* (WMO/TD-No. 1219, GCOS-No. 92), Genève.
- , 2005: *The World Climate Research Programme Strategic Framework 2005–2015. Coordinated Observation and Prediction of the Earth System* (WMO/TD-No. 1291, WCRP-No. 123), Genève.
- , 2007: *Cryosphere Theme Report: For the Monitoring of our Environment from Space and from Earth* (WMO/TD-No. 1405), Genève.
- , 2008: *Final Report of the CCI/CBS Intercommission Technical Meeting on Designation of Regional Climate Centres* (Genève, 21–22 janvier 2008), Genève.
- , 2009: *Déclaration de l'OMM sur l'état du climat mondial en 2008* (OMM-N° 1039), Genève.

1.6.2 Autres lectures

- Aristote, environ 350 av. J.-C.: *Météorologiques*.
- Bergeron, T., 1930: Richtlinien einer dynamischen Klimatologie. *Meteorologische Zeitung*, 47:246–262.
- Fedorov, E.E., 1927: Climate as totality of the weather. *Monthly Weather Rev.*, 55:401–403.
- Geiger, R., 1927: *Das Klima der bodennahen Luftschicht. Ein Lehrbuch der Mikroklimatologie*. Deuxième édition, 1942; troisième édition, 1942; quatrième édition, 1961. Braunschweig, Vieweg.
- Geiger, R., R.H. Aron et P. Todhunter, 2003: *The Climate Near the Ground*. Sixième édition. Lanham, Maryland, Rowman and Littlefield Publishers.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), 2004: *16 Years of Scientific Assessment in Support of the Climate Convention*, Genève.

- , 2007: *Quatrième rapport d'évaluation: Changements climatiques 2007*, Volumes 1 à 4. Cambridge, Cambridge University Press.
- Groupe sur l'observation de la Terre (GEO), 2005: *The Global Earth Observation System of Systems (GEOSS): 10-year Implementation Plan*. Reference Document GEO 1000R/ESA SP-1284. Noordwijk, Division des publications de l'Agence spatiale européenne, ESTEC.
- , 2007: *GEO 2007–2009 Work Plan. Toward Convergence*, Genève.
- Hadley, G., 1735: Concerning the cause of the general trade-winds. *Royal Soc. London Philos. Trans.*, 29:58–62.
- Hann, J. von, 1883: *Handbuch der Klimatologie*. Deuxième édition, 1897, 3 volumes; troisième édition, 1908–11, 3 volumes. Stuttgart, Englehorn.
- Hippocrate, vers 400 av. J.-C.: *Des airs, des eaux et des lieux*.
- Köppen, W. et G. Geiger (éds.), 1930–1939: *Handbuch der Klimatologie*, 5 volumes. Berlin, Gebrüder Borntraeger.
- Köppen, W., 1918: Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahreslauf. *Petermanns Geog. Mitt.*, 64:193–203, 243–248.
- Landsberg, H., 1962: *Physical Climatology*. Deuxième édition. Dubois, Pennsylvania, Gray Printing.
- Mann, M.E., Bradley, R.S. et M.K. Hughes, 1999: Northern Hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations. *Geophys. Res. Lett.*, 26(6):759.
- Thorntwaite, C.W., 1948: An Approach toward a rational classification of climate. *Geographical Rev.*, 38(1):55–94.
- Walker, G.T., 1923-24: World weather, I et II. *Indian Meteorol. Dept. Mem.*, 24(4):9.
-

CHAPITRE 2. OBSERVATIONS, STATIONS ET RÉSEAUX CLIMATOLOGIQUES

2.1 INTRODUCTION

Toutes les activités climatologiques nationales, y compris la recherche et les applications, se fondent principalement sur les observations de l'état de l'atmosphère ou du temps. Le Système mondial d'observation fournit des observations sur l'état de l'atmosphère et de la surface des océans. Son fonctionnement est assuré par les Services météorologiques et hydrologiques nationaux, les exploitants de satellites nationaux ou internationaux, diverses organisations et divers groupements chargés de systèmes d'observation spécifiques ou de régions géographiques précises. Le Système mondial d'observation de l'OMM est un système coordonné, comprenant divers sous-systèmes d'observation dont l'objectif est de fournir, de manière économique et efficace, des données d'observation normalisées et de qualité élevée relevant de la météorologie ou de domaines connexes de la géophysique et de l'environnement, provenant de toutes les parties du globe et de l'espace extra-atmosphérique. Voici des exemples de sous-systèmes d'observation utiles à la climatologie: les réseaux de stations d'observation en surface (GSN) et en altitude (GUAN) pour le Système mondial d'observation du climat (SMOC), les réseaux climatologiques de base régionaux, la Veille de l'atmosphère globale (VAG), les systèmes d'observation marine et le Système de positionnement global par satellite. Les observations émanant de ces réseaux et de ces stations sont nécessaires à l'élaboration en temps réel d'analyses, de prévisions et d'avis météorologiques et climatologiques, et à celle de services climatologiques ou encore à des fins de recherche, et ce à l'appui de l'ensemble des programmes de l'OMM et de programmes environnementaux pertinents d'autres organisations internationales.

Le présent chapitre relatif aux observations se présente dans l'ordre suivant: paramètres à mesurer pour décrire le climat, caractéristiques des stations où ces paramètres sont mesurés, instruments de mesure, choix de l'emplacement des stations, configuration des réseaux et fonctionnement des réseaux. Les indications fournies sont tirées des ouvrages qui suivent: le *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques* (OMM-N° 8, cinquième, sixième et septième éditions), le *Guide du Système mondial d'observation* (OMM-N° 488) et les *Guidelines on Climate Observation, Network and Systems* (WMO/TD-No. 1185). Le thème central est légèrement différent dans chacune des éditions du *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques*. La sixième édition par exemple contient des indications utiles sur l'étalonnage des capteurs, en particulier pour les instruments de base qui équipent les stations climatologiques, tandis que les tableaux 2 et 3 de la cinquième édition fournissent davantage de détails sur les exigences de précision dans les mesures effectuées à des fins climatologiques générales. Dans les sections qui suivent, le lecteur trouvera des renvois à d'autres publications de l'OMM qui contiennent davantage d'indications précises.

Le présent chapitre s'appuie aussi sur les dix principes relatifs à la surveillance du climat présentés dans le rapport intitulé *Report of the GCOS/GOOS/GTOS Joint Data and Information Management Panel* (troisième session, Tokyo, Japon, 15–18 juillet 1997, WMO/TD-No. 847), à savoir:

1. Évaluer, avant le stade de la mise en œuvre, l'incidence des nouveaux systèmes ou des éventuelles modifications des systèmes existants.
2. Lors de la transition entre les anciens et les nouveaux systèmes, prévoir une période d'exploitation en parallèle, d'une durée suffisante.
3. Recueillir et traiter avec soin non seulement les données elles-mêmes, mais aussi les renseignements et l'historique relatifs aux conditions locales, aux instruments, aux modalités d'exploitation, aux algorithmes de traitement des données et aux autres facteurs entrant en ligne de compte dans l'interprétation des données (c'est-à-dire les métadonnées).
4. Procéder à l'évaluation systématique de la qualité et de l'homogénéité des données.
5. Tenir compte, en fixant les priorités nationales, régionales et mondiales en matière d'observation, des besoins en produits et en évaluations concernant la surveillance du climat et de l'environnement.

6. Maintenir en service les stations et systèmes d'observation dont l'exploitation n'a jamais été interrompue.
7. En matière d'observations additionnelles, accorder une priorité élevée aux régions déficitaires en données, aux paramètres faisant l'objet d'observations insuffisantes, aux régions particulièrement sensibles aux changements et aux mesures de première importance présentant une résolution temporelle peu satisfaisante.
8. Dès la phase initiale de la conception et de la mise en œuvre de nouveaux systèmes, préciser les besoins à long terme à l'intention des concepteurs et des exploitants de réseaux et des spécialistes des instruments.
9. S'agissant des systèmes d'observation, préparer soigneusement le passage de la phase expérimentale à la phase d'exploitation prolongée.
10. Veiller à ce que les systèmes de gestion des données qui facilitent l'accès aux données et aux produits ainsi que leur utilisation et leur interprétation fassent partie intégrante des systèmes de surveillance du climat.

Ces principes ont été établis avant tout pour les observations en surface, mais ils s'appliquent aussi aux données provenant de toutes les plates-formes d'observation. On trouvera dans la section 2.3.4 des principes complémentaires s'appliquant spécifiquement aux observations par satellite.

2.2 ÉLÉMENTS CLIMATIQUES

On entend ici par élément climatique, toute propriété du système climatique décrite dans la section 1.2.2. Combinées à d'autres éléments, ces propriétés permettent de décrire le temps ou le climat d'un lieu sur une durée précisée. Tout élément météorologique observé peut aussi être appelé élément climatique. Les éléments les plus communément employés en climatologie sont les suivants: la température de l'air (y compris les maximums et les minimums), les précipitations (pluie, chute de neige et tous les types de dépôts humides, tels la grêle, la rosée, le givre, la gelée blanche et les précipitations de brouillard), l'humidité, le mouvement atmosphérique (vitesse et direction du vent), la pression atmosphérique, l'évaporation, l'insolation et le temps présent (exemples: brouillard, grêle ou tonnerre). Les propriétés propres aux terres émergées, en surface et sous la surface (y compris les éléments hydrologiques, la topographie, la géologie et la végétation), celles des océans et celles de la cryosphère servent aussi à décrire le climat et sa variabilité.

Dans les sous-sections ci-après sont décrits les éléments habituellement observés pour des types particuliers de stations et de réseaux. Des indications détaillées figurent dans le *Manuel du Système mondial d'observation* (OMM-N° 544), le *Règlement technique* (OMM-N° 49, en particulier dans le Volume III – Hydrologie) et dans le *Guide des pratiques de météorologie agricole* (OMM-N° 134). Il convient de conserver ces documents à portée de la main pour pouvoir les consulter en cas de besoin.

2.2.1 Éléments de surface et sous la surface

Une station climatologique ordinaire se situe sur un terrain présentant les conditions requises pour l'observation de la température maximale et minimale quotidienne et de la hauteur de précipitation. Une station climatologique principale assure en général l'observation d'un plus large éventail de paramètres du temps: le vent, les caractéristiques des nuages, l'humidité, la température, la pression atmosphérique, les précipitations, l'enneigement, l'insolation et le rayonnement solaire. Afin de pouvoir établir une climatologie des précipitations, du vent ou de tout autre élément en particulier, il faut parfois exploiter une station pour observer spécifiquement un élément ou un sous-ensemble d'éléments, en particulier dans les zones où la topographie varie. Les stations climatologiques de référence (voir la section 2.5) fournissent des données homogènes sur de longues périodes afin qu'il soit possible de déterminer les tendances climatiques. Il serait souhaitable que chaque pays dispose d'un réseau de ces stations, représentatif des zones climatiques principales et des régions vulnérables.

Dans les zones urbaines, les conditions atmosphériques revêtent une importance particulière en raison des conséquences qu'elles peuvent avoir. De fortes pluies peuvent causer de graves inondations; la neige et les précipitations se congelant peuvent perturber les réseaux de transport; les orages violents, avec leur cortège de foudre, de grêle et de vents forts, peuvent entraîner des pannes de courant. Les vents violents peuvent aussi ralentir voire stopper la circulation des automobiles, des autocaravanes, des autorails, des véhicules de transport en commun et des poids lourds. Les zones urbaines sont particulièrement vulnérables face aux tempêtes tropicales qui pénètrent à l'intérieur des terres, compte tenu des grosses concentrations de population à risque, de la densité élevée d'ouvrages édifiés par l'homme et du risque accru d'inondation et de contamination de l'eau potable. Les stations urbaines observent habituellement les mêmes éléments que les stations climatologiques principales et relèvent en plus des données sur la pollution atmosphérique, notamment les concentrations d'ozone près de la surface, d'autres substances chimiques et de particules.

Il est en général possible de classer les observations marines en deux catégories: les éléments physiques et dynamiques, et les éléments biochimiques. Les éléments physiques et dynamiques (notamment le vent, la température, la salinité, les vagues du vent et la houle, les glaces de mer, les courants océaniques et le niveau de la mer) déterminent les modifications du système marin. Les éléments biochimiques (notamment l'oxygène dissous, les éléments nutritifs et la biomasse phytoplanctonique) ne participent pas activement en général aux processus physiques et dynamiques, sauf peut-être à échelle de temps relativement longue, et sont donc appelés éléments passifs. Du point de vue de la plupart des SMHN, il convient généralement d'accorder une priorité élevée aux éléments physiques et dynamiques, bien que dans certains cas les éléments biochimiques puissent revêtir une importance quand il s'agit de répondre aux besoins de certaines parties prenantes (par exemple, les observations en rapport avec le rôle du dioxyde de carbone dans les changements climatiques).

Certains SMHN sont aussi chargés de la surveillance des phénomènes hydrologiques, de la planification en hydrologie ou encore de la prévision et des alertes hydrologiques. Ils ont alors pour mission d'observer et de mesurer les éléments propres à l'hydrologie. Ces éléments peuvent comprendre différents ensembles de paramètres, tels que la hauteur de cours d'eau, de lacs ou de réservoirs; le débit; le transport solide et le dépôt; le taux de prélèvement et de recharge; la température de l'eau et de la neige; la couche de glace; les propriétés chimiques de l'eau; l'évaporation; l'humidité du sol; le niveau des nappes; ou encore l'étendue des crues. Ces éléments définissent une partie intégrante du cycle hydrologique et jouent un rôle important dans la variabilité du climat.

Outre les éléments observés en surface, la température et l'humidité du sol sont des éléments mesurés sous la surface qui importent en particulier pour les applications en agriculture, en sylviculture et dans l'aménagement du territoire. Il convient de mesurer d'autres éléments pour établir les caractéristiques de l'environnement physique dans le cadre d'applications agricoles, notamment l'évaporation au-dessus du sol et des plans d'eau, l'insolation, le rayonnement de faible et de grande longueurs d'onde, la transpiration des plantes, le ruissellement et la hauteur de la nappe phréatique ainsi que les conditions météorologiques (en particulier la grêle, la foudre, la rosée et le brouillard). Idéalement, les mesures des éléments qui importent pour l'agriculture devraient être effectuées à plusieurs hauteurs allant de 200 cm sous la surface du sol à 10 m au-dessus de cette surface. Pour déterminer ces hauteurs, il convient de tenir compte de la nature de la végétation cultivée ou non.

Par données indirectes, on entend celles obtenues par la mesure de conditions ayant un lien indirect avec le climat, notamment grâce à la phénologie ou à l'étude de carottes de glace, de varves (dépôts annuels de sédiments), de récifs coralliens ou de cernes de croissance d'arbres. La phénologie étudie les phénomènes biologiques périodiques de la végétation et du règne animal et leur date d'apparition, ainsi que les causes des variations observées dans ces dates qu'il s'agisse de forçage biotique ou abiotique et les relations entre les stades de développement d'une même espèce ou d'espèces différentes. La feuillaison et la floraison au printemps, la fructification, la coloration et la chute des feuilles à l'automne, ainsi que l'arrivée et le départ des oiseaux, des insectes et d'autres animaux migrateurs sont tous des exemples de marqueurs phénologiques.

La phénologie offre un moyen facile et économique de détecter rapidement les changements que subit la biosphère et complète donc utilement les mesures instrumentales effectuées par les Services météorologiques nationaux.

Une carotte glaciaire est constituée de neige et de glace ayant piégé des bulles d'air. La composition d'une carotte, en particulier la présence d'isotopes d'hydrogène et d'oxygène, est fonction du climat qui régnait au moment où la glace et la neige se sont déposées. Les carottes de glace contiennent aussi des inclusions, telles que des poussières et de la cendre portées par le vent, des bulles de gaz atmosphériques ainsi que des substances radioactives dans la neige déposée chaque année. Diverses propriétés, que l'on peut observer le long d'une carotte, fournissent des données indirectes sur la température, le volume des océans, les précipitations, la chimie et la composition gazeuse de la basse atmosphère, les éruptions volcaniques, la variabilité du rayonnement solaire, la productivité de la surface marine, l'étendue des déserts et les incendies de forêt. L'épaisseur et la composition des varves sont de façon identique liées aux variations annuelles et saisonnières des précipitations, des débits des cours d'eau et des températures.

Les récifs coralliens des régions tropicales sont très sensibles aux changements climatiques. Leurs bandes de croissance sont fonction de la température de l'eau et de la saison au cours de laquelle elles se sont formées. L'analyse de ces bandes permet d'établir l'année ou la saison exacte à laquelle correspond telle valeur de la température de l'eau. Les données tirées des coraux servent à opérer une reconstitution estimative des variations passées du phénomène El Niño-Oscillation australe (ENSO) et de la chronologie des remontées d'eaux froides équatoriales, ou encore de l'évolution des tourbillons subtropicaux, des régimes des alizés et de la salinité de l'océan.

L'étude de la croissance des cernes d'arbres révèle une grande variabilité interannuelle et d'importantes différences spatiales. Il est possible d'établir une relation entre certaines des variations et les conditions météorologiques et climatiques à micro-échelle et à grande échelle; on peut considérer les plantes un peu comme des appareils intégrés de mesure de l'environnement. Certaines espèces d'arbres ayant une durée de vie de plusieurs siècles, leurs cernes annuels de croissance nous permettent de reconstituer sur une longue durée la chronologie de la variabilité du climat (en nous fournissant des indications bien antérieures aux mesures réalisées à l'aide d'instruments). Compte tenu de la relation étroite qu'il est possible d'établir entre le développement végétal et les conditions météorologiques et climatiques, les SMHN de nombreux pays exploitent des réseaux d'observation phénologique.

Le tableau 2.1 propose un résumé des éléments climatiques les plus courants observés en surface et sous la surface dans divers types de réseaux et de stations.

2.2.2 Éléments en altitude

Les observations en altitude font partie intégrante du Système mondial d'observation. L'éventail des activités climatologiques nécessitant des observations en altitude comprend la surveillance et la détection de la variabilité et de l'évolution du climat, la prévision du climat à toutes les échelles de temps, la modélisation du climat, les études sur les processus climatiques, la réanalyse des données et les études concernant les satellites, notamment l'étalonnage des extractions de données de satellites et du transfert radiatif.

La plus longue série chronologique de données provient des réseaux de radiosondage, les mesures étant réalisées grâce à des instruments emportés par ballon et les données, transmises à un dispositif de poursuite au sol. Ces radiosondages représentent une base de données sur des variables atmosphériques qui remonte jusqu'aux années 1930, même si la couverture est en général médiocre avant 1957. Les séries de données de radiosondage se caractérisent par de nombreuses interruptions et erreurs systématiques dues à des changements d'instruments et de procédures opérationnelles, ainsi que par un manque de métadonnées. Les observations par satellite existent depuis les années 1970, certaines ayant été regroupées et retraitées afin de constituer des séries chronologiques continues. Tout comme les séries de radiosondage, les séries de données de satellites présentent des défauts découlant de différents facteurs: résolution

Tableau 2.1. Exemples d'éléments mesurés en surface et sous la surface dans différents types de réseaux ou de stations

Éléments	Observations						
	Climatolo- giques ordinaires	Climatolo- giques principales	Marines	Hydrométéo- rologiques	Agrométéo- rologiques	Urbaines	Indirectes
Température de l'air	•	•	•		•	•	
Température du sol					•		
Température de l'eau			•	•			
Précipitations	•	•	•	•	•	•	
Conditions météorologiques		•	•		•	•	
Nuages		•	•		•	•	
Pression		•	•		•	•	
Visibilité		•	•		•	•	
Humidité		•	•		•	•	
Vent		•	•		•	•	
Rayonnement solaire		•			•	•	
Insolation		•			•	•	
Salinité			•				
Courants			•				
Niveau de la mer			•				
Vagues			•				
Échanges de quantité de mouvement air-mer			•				
Flux air-mer			•				
Glace			•	•			
Oxygène dissous			•				
Éléments nutritifs			•				
Bathymétrie			•				
Biomasse			•				
Écoulement fluvial				•			
Niveau des cours d'eau				•			
Flux solide				•			
Recharge				•			
Évaporation				•	•	•	
Humidité du sol				•	•	•	
Ruissellement				•	•		
Eau souterraine				•	•		
Développement végétal						•	•
Pollen							•
Composition de la glace et des sédiments							•
Croissance des cernes d'arbres							•
Croissance des bandes coralliennes							•
Substances chimiques atmosphériques						•	
Particules						•	

verticale limitée, dérive de l'orbite, changement de la plate-forme satellitaire, dérive des instruments, complications engendrées par les procédures d'étalonnage et erreurs systématiques découlant des modifications apportées aux algorithmes de traitement. Des mesures en altitude peuvent aussi provenir d'autres plates-formes mobiles, tels les aéronefs. On estime que les observations exécutées en certains lieux en haute montagne font également partie du système de mesure en altitude.

Voici les principales exigences s'appliquant aux observations dans le cas de la surveillance des changements en altitude sur une longue période:

- a) Une série de données de longue durée (plusieurs décennies), stable et homogène dans le temps, pour qu'il soit possible de déterminer en toute confiance que les changements observés touchent bien l'atmosphère et qu'ils ne sont pas induits par des modifications du système d'observation ou des artefacts des méthodes d'homogénéisation;
- b) Une bonne résolution verticale permettant de décrire la structure verticale des variations de la température, de la vapeur d'eau et de l'ozone, et des changements dans la tropopause;
- c) Une couverture et une résolution géographiques suffisantes, pour qu'il soit possible d'établir des tendances mondiales et régionales dignes de foi;
- d) Une précision dans les observations plus fine que la signature des variations atmosphériques prévues, pour qu'il soit possible de déterminer clairement aussi bien les changements de la variabilité que les changements à long terme. Cette exigence est particulièrement importante en ce qui concerne les observations de la vapeur d'eau dans la haute troposphère et la stratosphère.

Les publications de l'OMM intitulées *Second Report on the Adequacy of the Global Observing Systems for Climate in Support of the UNFCCC* (WMO/TD-No. 1143) et *Implementation Plan for the Global Observing System for Climate in Support of the UNFCCC* (WMO/TD-No. 1219) indiquent que les éléments climatiques essentiels tirés des observations en altitude sont la température, la vapeur d'eau, la pression, la vitesse et la direction du vent, les propriétés des nuages, la luminance énergétique et le rayonnement (total résultant, descendant et ascendant). Il importe de bien connaître la structure verticale de la composition chimique de l'atmosphère globale, car cette composition présente un intérêt majeur pour la prévision du climat, la surveillance de l'évolution du climat, la prévision de l'ozone et d'autres paramètres de la qualité de l'air ainsi que dans des domaines d'application tels que l'étude, notamment prospective, de la santé et du bien-être de la faune, de la flore et de l'être humain (Voir le *Règlement technique*, Volume I, partie II, chapitre 2; le *Plan for the Global Climate Observing System (GCOS)*, Version 1.0 (WMO/TD-No. 681); et le *GCOS/GTOS Plan for Terrestrial Climate-related Observations*, Version 2.0 (WMO/TD-No. 796)). Parmi les éléments de cette composition chimique qu'il y a lieu de mesurer à la fois dans l'atmosphère libre et près du sol, citons les concentrations d'ozone et de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, méthane, etc.), le trouble atmosphérique (épaisseur optique des aérosols), la charge totale en aérosols et les concentrations de gaz réactifs et des composés radioactifs. Il faut aussi mesurer les pluies acides (ou plus généralement la chimie des précipitations et des particules) et le rayonnement ultraviolet. (Pour des informations détaillées sur la composition chimique de l'atmosphère, se reporter à la publication intitulée *Integrated Global Atmospheric Chemistry Observations (IGACO) Report of IGOS-WMO-ESA* (WMO/TD-No. 1235).

Les mesures en altitude devraient représenter tous les régimes climatiques et les types de surface. Les codes de transfert radiatif employés pour convertir les données brutes de la luminance énergétique obtenues par satellite en données sur les paramètres géophysiques se fondent sur des hypothèses relatives aux conditions de surface. Il y a donc lieu de disposer d'une représentation des conditions environnementales locales, tant à la surface des océans qu'à celle des terres émergées.

2.2.3 Éléments mesurés par télédétection

Les satellites et autres systèmes de télédétection, notamment les radars météorologiques, fournissent un supplément abondant d'information, en particulier dans les zones où les données

sont rares. Ils ne peuvent pas encore proposer cependant, pour beaucoup d'éléments que les stations au sol mesurent en surface, des données présentant la précision et l'homogénéité requises. Grâce à leur couverture spatiale, ils complètent les réseaux d'observation en surface, mais ne s'y substituent point. Voici une liste d'éléments qu'il est possible de mesurer ou d'estimer grâce à la télédétection: précipitations (avec une précision présentant des limites pour de petites superficies, à l'interface océan-atmosphère, sur de hautes terres ou en cas d'orographie abrupte); nébulosité; flux radiatifs; bilan radiatif et albédo; biomasse dans les couches supérieures de l'océan, topographie de la surface des océans et hauteur des vagues; étendue des glaces de mer; température superficielle de l'eau de la mer; vecteurs vent et vitesse vent à la surface de l'océan; profils de la température, de l'humidité et du vent dans l'atmosphère; composition chimique de l'atmosphère; enneigement; étendue des inlandsis et des glaciers; végétation et couverture du sol; et topographie de la surface terrestre.

La télédétection permet d'obtenir une meilleure couverture spatiale et temporelle que les observations *in situ*. Les données obtenues par télédétection complètent aussi les observations provenant d'autres plates-formes et se révèlent particulièrement utiles en cas d'absence ou de corruption de ces observations. Même si la télédétection apporte un avantage indéniable, l'utilisation directe des données qui en découlent pour les applications en climatologie pose des difficultés. Avant tout, les relevés portent sur des périodes relativement courtes, ce qui signifie qu'il est impossible de déduire de ce type de données la variabilité et l'évolution du climat à long terme. Il est impossible aussi de comparer directement les données de la télédétection avec les mesures effectuées *in situ*. À titre d'exemple, les estimations de la température de la pellicule superficielle de la Terre à l'aide d'observations par satellite ne sont pas comparables aux mesures de température effectuées sous abris normalisés, ou encore la relation entre les mesures de la réflectivité radar et les hauteurs de précipitations recueillies à l'aide de pluviomètres peut se révéler complexe à établir. Il est néanmoins possible de produire des séries de données homogènes qui combinent les mesures par télédétection et les observations *in situ*.

2.3 INSTRUMENTS

Les stations climatologiques qui font partie d'un réseau national devraient être équipées d'instruments normalisés et approuvés; il peut incomber aux SMHN de fournir ces instruments. Quand les instruments proviennent d'autres organismes ou que leur achat relève de l'observateur, il appartient alors à un bureau climatologique de tout mettre en œuvre pour veiller à ce qu'ils soient conformes aux normes nationales.

La présente section donne des indications sur l'essentiel des instruments de mesure en surface et sur le choix de ces instruments. Plusieurs autres publications de l'OMM constituent des compagnons indispensables de ce guide; il convient de les conserver à portée de la main pour pouvoir les consulter en cas de besoin. Ainsi le *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques* dresse un inventaire détaillé des instruments à utiliser pour mesurer les éléments du climat notamment aux stations terrestres et marines. Le *Manuel international des pratiques de mesure de la pollution atmosphérique de fond* (OMM-N° 491) fournit des précisions sur les instruments qu'il faut utiliser pour mesurer la composition chimique de l'atmosphère, le *Guide des pratiques de météorologie agricole*, sur ceux permettant de mesurer les éléments agrométéorologiques et le *Guide des pratiques hydrologiques* (OMM-N° 168), sur ceux utilisés à des fins hydrologiques.

Pour sélectionner ces instruments, y compris les systèmes de traitement et de transmission de données qui les accompagnent, il convient de respecter les dix principes relatifs à la surveillance du climat (voir la section 2.1), tout en se préoccupant des points suivants:

- a) Leur fiabilité;
- b) La mesure dans laquelle ils sont adaptés à l'environnement opérationnel de la station;
- c) Leur degré d'exactitude;
- d) Leur simplicité;
- e) Les raisons qui motivent les observations.

On estime qu'un instrument est fiable lorsqu'il fonctionne en permanence suivant ses spécifications. Un manque de fiabilité est la cause de données manquantes, d'erreurs systématiques et d'autres hétérogénéités. Les instruments fiables sont suffisamment solides pour résister à tous les phénomènes météorologiques et physiques extrêmes qui peuvent se produire à l'emplacement du site de mesure et, le cas échéant, à toute manipulation dans le cas d'observations manuelles.

Il faut choisir un instrument conçu pour le climat du lieu où il sera installé et aussi qui soit compatible avec les appareils avec lesquels il doit fonctionner. À titre d'exemple, un capteur anémométrique installé dans une région au climat froid doit pouvoir résister au givrage, tandis qu'un autre situé dans une zone désertique devra être protégé contre toute intrusion de poussière. Les capteurs d'une station météorologique automatique doivent fournir un signal de sortie qui puisse être traité automatiquement. Ainsi, le thermomètre à mercure standard qu'on utilise pour prendre des mesures à la main dans les stations dotées de personnel, par exemple, doit être remplacé par une sonde thermique, tel un thermocouple, dont la réaction peut être convertie en un signal électronique. Les instruments doivent aussi être installés de façon qu'on puisse y accéder à des fins d'entretien.

Idéalement, on devrait choisir les instruments qui présentent un degré d'exactitude et de précision suffisamment élevé pour répondre aux besoins climatologiques. Il importe aussi de veiller à ce que l'instrument puisse continuer de fournir le degré d'exactitude exigé sur une longue période, car les dérives instrumentales peuvent causer de graves problèmes d'hétérogénéité dans les séries de données climatologiques. Sans fiabilité, l'exactitude perd de son utilité.

Plus un instrument est simple, plus il est facile de le faire fonctionner, d'assurer son entretien et de surveiller ses performances. Il est parfois nécessaire d'installer des capteurs redondants (par exemple, une triple thermistance dans les stations d'enregistrement de données automatique) pour en vérifier correctement la performance et la fiabilité dans le temps. Les systèmes complexes tendent plus facilement à causer des problèmes d'hétérogénéité dans les données, de données manquantes, de coûts élevés de maintenance et de variation d'exactitude.

Les exigences en matière de mesure sont en général dictées par l'objet de l'observation. Le type et les caractéristiques de l'instrument ou encore le type d'installation du capteur sont des facteurs dont il faut bien tenir compte pour veiller à ce que ces exigences puissent être satisfaites.

Le *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques* fournit des informations détaillées sur ces questions, notamment en ce qui concerne les normes et les pratiques recommandées en matière d'instruments et de mesures.

2.3.1 **Équipement de base en surface**

Plusieurs options peuvent se présenter pour obtenir des observations sur le climat à partir d'une station en surface. Il est possible par exemple d'équiper une station à l'aide soit d'instruments de base, soit d'instruments enregistreurs ou automatisés en prévision des périodes au cours desquelles le personnel serait absent, soit de capteurs entièrement automatiques. Quand il s'agit de faire un choix, il importe de prendre en compte le coût du personnel, celui de la maintenance et du remplacement du matériel. Il est souvent possible de négocier les prix avec les fabricants en invoquant par exemple les quantités sur lesquelles porte l'achat.

Quand cela est possible, il est bon qu'une personne habitant à proximité, dûment formée, remplisse la fonction de gardien du site d'observation. Il appartient à ce gardien de vérifier le site régulièrement, c'est-à-dire d'assurer l'entretien du terrain (notamment couper l'herbe), d'assurer aussi la maintenance de base des instruments (notamment un simple nettoyage), de vérifier que ceux-ci ne sont pas endommagés et de vérifier aussi que personne ne s'est introduit sur le site. Dans les stations terrestres dotées de personnel, cette inspection devrait être au moins

hebdomadaire. L'inspection de sites isolés devrait être effectuée aussi souvent que possible. Il faut aussi disposer de personnel prêt à intervenir rapidement en cas de panne des systèmes essentiels.

Il existe des appareils capables d'enregistrer les variations de bon nombre d'éléments climatiques, notamment la température, l'humidité, le vent et l'intensité des précipitations. Cela nécessite par la suite de transférer les données enregistrées sur des tables ou sous forme numérique. Il appartient aux observateurs de s'assurer que ces appareils fonctionnent normalement et que les données enregistrées, par exemple sur des diagrammes, sont claires et faciles à lire. Il leur appartient aussi de vérifier et d'évaluer régulièrement les données enregistrées (en les comparant aux valeurs relevées par lecture directe des instruments), et d'exécuter un marquage chronométrique à intervalle fréquent bien défini. Ces données enregistrées peuvent servir notamment à remplacer les données manquantes lorsqu'un observateur, absent de la station pour cause de maladie par exemple, n'a pas pu exécuter les observations directes. Les sections 1.4.2 et 1.4.3 du *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques* (cinquième édition) fournissent des indications précises sur la maintenance et le fonctionnement des instruments enregistreurs, de leurs tambours et de leurs mouvements d'horlogerie.

Les données fournies par les stations météorologiques automatiques (SMA), dans lesquelles les instruments enregistrent et transmettent des observations automatiquement, se limitent en général à celles qu'il est possible d'obtenir sous forme numérique, mais l'éventail des capteurs automatiques, déjà important, ne cesse de s'élargir. Les stations automatiques servent en complément des stations dotées de personnel; elles augmentent la densité des réseaux, la fréquence des mesures et la quantité des éléments mesurés, en particulier dans les régions isolées ou inhabitées, d'accès difficile. Le *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques* mentionne certaines des exigences en matière de sensibilité et d'exactitude s'appliquant à ces stations automatiques; de nouvelles exigences sont définies, en particulier pour l'étude de la variabilité du climat.

Grâce aux SMA, de nombreux pays ont réussi à réduire leurs dépenses d'exploitation. Les SMHN qui ont à choisir, pour leurs programmes d'observation, entre des SMA et des stations dotées de personnel doivent examiner plusieurs points. Certes les SMA offrent un potentiel considérable en proposant des données suivant une fréquence particulièrement élevée ou encore des données supplémentaires provenant de lieux isolés, mais il faut cependant associer à leur fonctionnement un coût non négligeable qui comprend le coût de la main d'œuvre chargée d'assurer la maintenance et de veiller à la fiabilité des SMA, la nécessité d'avoir accès à ce type de main d'œuvre, l'accessibilité du lieu pour les besoins de l'installation et de la maintenance, la proximité d'une source d'énergie adéquate, la sécurité du site et l'existence d'une infrastructure de communication. Il y a lieu de bien prendre en compte tous ces facteurs en regard des avantages attendus, comme la densification ou l'élargissement du réseau. Les SMA peuvent présenter un réel intérêt par rapport à des programmes d'observation fondés sur des stations dotées de personnel, voire même constituer la seule solution possible, mais elles exigent un engagement fort de la part de l'organisme chargé de les exploiter.

Les instruments maritimes comprennent les bouées ancrées et dérivantes de collecte de données, des flotteurs des glaces et des flotteurs profonds. Les données sont recueillies à distance, mais les instruments effectuent en général les mesures *in situ*. Il s'agit de dispositifs relativement économiques permettant d'obtenir des données météorologiques et océanographiques de surface en provenance de zones océaniques reculées. Ces instruments constituent ainsi une composante essentielle des systèmes d'observation du milieu marin et des programmes météorologiques et océanographiques, expérimentaux et opérationnels. Par exemple, le réseau de bouées ancrées pour l'observation océan-atmosphère dans les mers tropicales permet de recueillir sans délai des données océanographiques et météorologiques en surface, de grande qualité, dans l'ensemble de la zone équatoriale du Pacifique, pour les besoins de la surveillance, de la prévision et de la connaissance des oscillations climatiques associées aux évolutions d'El Niño et de La Niña.

2.3.2 Instruments de mesure en altitude

La plupart des données climatologiques en altitude sont déduites généralement des mesures réalisées, pour la prévision synoptique, à l'aide de radiosondes emportées par ballon. Des techniques et des instruments divers sont employés pour mesurer la pression, la température, l'humidité et le vent, et pour transformer les signaux de sortie en quantités météorologiques. Il importe que chaque SMHN distribue les manuels d'instruction pour chaque type de station d'observation en altitude, afin que le matériel soit correctement utilisé et les données convenablement interprétées. Selon le *Manuel du Système mondial d'observation* (OMM-N° 544), volume I, partie III, section 3.4.5, toute modification apportée aux systèmes de radiosondage ou de mesure du vent utilisés à des fins d'exploitation dans une station doit être signalée rapidement au Secrétariat de l'OMM.

La qualité des mesures effectuée par les radiosondes pose plusieurs problèmes pour la surveillance du climat et la détection des changements climatiques. Des incertitudes pèsent sur les données de température en raison des erreurs dues au rayonnement. À basse température, les radiosondes standard ne peuvent pas mesurer la vapeur d'eau avec un degré d'exactitude suffisant. Les types de capteurs utilisés, en particulier pour mesurer l'humidité, ont évolué avec le temps. La couverture spatiale des observations par radiosondage n'est pas uniforme; la plupart des stations se situent sur les terres émergées de l'hémisphère Nord et le réseau est bien moins dense dans l'hémisphère Sud et sur les océans. S'agissant des séries chronologiques établies à partir des radiosondages, des problèmes innombrables sont dus à l'absence de comparaison entre les différents types de radiosondes et de capteurs, et les différences d'exposition; il est capital de disposer de métadonnées concernant les instruments et les procédures de réduction et de traitement des données si l'on veut utiliser les données de radiosondage en climatologie appliquée. De nouvelles radiosondes de référence sont mises au point pour atténuer les défauts des radiosondes standard employées actuellement. Un réseau restreint de ces nouvelles radiosondes sera mis en place pour étalonner et valider différentes observations de la température et de la vapeur d'eau par satellite.

Un système d'observation en altitude peut évoluer avec le temps, en fonction des progrès technologiques. Il est essentiel, dans un réseau, de prévoir une période suffisamment longue au cours de laquelle un nouveau système fonctionnera en parallèle avec l'ancien, ce qui permettra de garantir la continuité des données et une comparaison probante de l'exactitude et de la précision entre les deux systèmes. Il y a lieu d'étalonner régulièrement les systèmes de mesure sur site. Les stratégies de remplacement d'instruments doivent impérativement tenir compte des changements qui interviennent dans d'autres réseaux, tels que l'utilisation des satellites. Il convient de se fonder sur les principes relatifs à la surveillance du climat (voir la section 2.1) pour orienter la mise au point et le fonctionnement d'un système d'observation en altitude.

2.3.3 Télédétection à partir de la surface

Pour les besoins de la télédétection, on utilise des capteurs soit actifs soit passifs. Les systèmes à capteurs actifs émettent une forme ou une autre de rayonnement qui est diffusé par diverses cibles, les capteurs analysant ensuite le signal rétrodiffusé. Les capteurs passifs mesurent le rayonnement émis (ou modifié) par l'environnement.

La technique de télédétection active à partir du sol la plus commune est le radar météorologique. Une antenne concentre en un faisceau étroit l'énergie hyperfréquence de forte puissance émise sous la forme d'une courte impulsion. Les précipitations réfléchissent le faisceau et le rayonnement rétrodiffusé est en général reçu par le même système d'antenne. Le lieu des précipitations est déterminé en fonction de l'azimut et du site de l'antenne, et du temps écoulé entre l'émission et la réception de l'énergie réfléchi. L'intensité du rayonnement reçu est fonction de la nature des précipitations, le signal pouvant être traité pour estimer l'intensité des précipitations. Les conditions atmosphériques et environnementales peuvent nuire aux données radar, aussi faut-il faire preuve de prudence lorsqu'il s'agit d'interpréter l'information. Parmi les effets indésirables, citons les signaux réfléchis par le relief, les immeubles ou d'autres cibles non

météorologiques; l'atténuation du signal radar quand les échos météorologiques traversent des zones de précipitations intenses; les inversions de température dans les basses couches de l'atmosphère qui infléchissent le faisceau radar de telle façon que les échos de sol sont observés à des endroits inhabituels; ou encore l'effet de bande brillante qui correspond à une couche où la réflectivité radar est renforcée par les cristaux de glace qui commencent à fondre au passage du niveau de fusion dans l'atmosphère, ce qui peut entraîner une surestimation des précipitations. Pour des raisons d'accès et de traitement, d'incertitudes touchant l'étalonnage et les modifications d'étalonnage et de relation complexe entre la réflectivité et les précipitations, l'utilisation des données radar dans les études climatologiques est relativement limitée.

Les profileurs de vent font appel au radar pour dresser des profils verticaux du vent, en vitesse et en direction, de la surface jusqu'à la tropopause. Le mélange turbulent de l'air causé par les différences de température et de teneur en humidité provoque des fluctuations de la densité atmosphérique. Les variations qui en résultent touchant l'indice de réfraction sont utilisées comme traceur du vent moyen. Bien qu'ils donnent de meilleurs résultats en air clair, les profileurs de vent peuvent fonctionner en présence de nuages et de précipitations modérées. Quand ils sont équipés d'un système de sondage radioacoustique, ils peuvent en outre mesurer la température et dresser des profils verticaux de cet élément. Dans l'atmosphère, la vitesse du son varie en fonction de la température. Le profil de la température est donc établi à partir de la vitesse de propagation des ondes acoustiques à travers l'atmosphère.

La détection de la foudre constitue l'utilisation la plus commune de la télédétection passive à partir de la surface. Les capteurs de foudre balayent une bande de fréquences électromagnétiques pour détecter les décharges électriques au sein des nuages, entre les nuages et entre les nuages et le sol. Les caractéristiques des éclairs sont déduites de celles du rayonnement reçu (amplitude, temps d'arrivée, direction de la source, polarité et autres caractéristiques de la forme de l'onde). Un capteur ne suffit pas à déterminer avec précision la position des décharges électriques; il faut pour cela réunir les données provenant de plusieurs capteurs pour les traiter à l'aide d'un processeur central. Le processeur analyse et combine les données des différents capteurs pour calculer la position et les caractéristiques des éclairs observés. L'exactitude et l'efficacité de détection d'un réseau de détecteurs de foudre diminuent progressivement en périphérie du réseau. La distance à laquelle il est possible de détecter l'onde correspondant à la foudre est fonction de la bande de fréquences employée, de l'amplitude de la décharge et de la configuration du réseau. Quand un éclair se produit trop loin du réseau, il ne peut plus être détecté.

2.3.4 **Télédétection à partir d'aéronefs et de l'espace**

De nombreux longs courriers sont équipés de systèmes automatiques d'enregistrement qui transmettent régulièrement pendant le vol des données sur la température et le vent, et, dans certains cas, l'humidité. Certains aéronefs enregistrent et transmettent des observations fréquentes en phase d'ascension et de descente, ce qui complète de façon importante les données normales de radiosondage, au moins dans la troposphère. Les données de ces observations sont prises en compte par les systèmes opérationnels d'analyse météorologique et, grâce à des programmes de réanalyse, apportent une contribution importante aux séries de données sur le climat.

Les systèmes de retransmission des données météorologiques d'aéronefs fonctionnent à bord d'aéronefs équipés de systèmes de navigation et d'autres systèmes de télédétection. Ce sont des capteurs qui mesurent la vitesse, la température de l'air et la pression atmosphérique. L'équipement de radionavigation de l'aéronef fournit d'autres données relatives à la position, l'accélération et la direction du vol. Les calculateurs de bord qui assurent la gestion de vol et servent aux systèmes de navigation calculent en permanence les données de navigation et les données météorologiques et les communiquent à l'équipage. Les données sont entrées automatiquement dans le système de communication de l'aéronef, qui les transmet au sol. Dans certains cas, on peut utiliser un dispositif de traitement spécifique embarqué pour accéder aux données brutes des systèmes de l'aéronef et en dériver indépendamment des variables

météorologiques. Les messages transmis aux stations au sol contiennent normalement la vitesse et la direction du vent (dans le plan horizontal), la température de l'air, l'altitude (par rapport à une surface isobare de référence), une mesure de la turbulence, l'heure de l'observation, la phase du vol et la position de l'aéronef. Ces données sont utilisées par les contrôleurs aériens, qui veillent à la bonne sécurité des vols, et par les prévisionnistes.

Il existe un grand nombre de sources d'erreurs susceptibles d'accroître l'incertitude des mesures réalisées par les aéronefs. On peut tabler sur une incertitude d'environ 5 à 10 % dans le processus de calcul. Le choix de l'intervalle d'échantillonnage et du temps d'intégration des valeurs moyennes complique encore les choses. L'analyse d'une série chronologique caractéristique de données sur l'accélération verticale indique souvent une forte variabilité des propriétés statistiques sur de courtes distances. La variation de la vitesse aérodynamique, pour un appareil donné et entre divers types d'appareils, modifie les distances d'échantillonnage et fait fluctuer les longueurs d'onde filtrées. Bien qu'elles ne présentent pas un degré de précision et d'exactitude aussi bon que la plupart de celles issues de systèmes d'observation au sol, les données d'aéronefs peuvent fournir un complément d'information utile pour les bases de données météorologiques.

Les données de satellites viennent compléter de façon utile les bases de données climatologiques en raison de leur vaste couverture géographique, en particulier au-dessus de régions où les données sont rares, voire complètement absentes. Les satellites présentent un grand intérêt lorsqu'il s'agit de surveiller des phénomènes tels que l'étendue des glaces de mer aux pôles, l'enneigement, l'activité glaciaire, l'évolution du niveau de la mer, le couvert végétal et la teneur en humidité, et l'activité des cyclones tropicaux. Ils contribuent aussi à l'amélioration des analyses synoptiques, une composante importante de la climatologie synoptique.

Les techniques de télédétection reposent sur les propriétés d'émission, d'absorption et de diffusion de l'atmosphère et de la surface. L'équation physique du transfert radiatif fournit des renseignements sur les propriétés radiatives de l'atmosphère et de la surface terrestre, et sa solution inverse, sur des propriétés géophysiques telles que les profils de la température et de l'humidité, la température de la pellicule superficielle et les propriétés des nuages.

On trouvera des chiffres et des spécifications concernant les plates-formes et capteurs satellitaires dans la publication intitulée *GCOS Guide to Satellite Instruments for Climate* (WMO/TD-No. 685). Des indications sur les éléments observés et sur l'exactitude et la résolution spatiale et temporelle des mesures par satellite figurent dans *Preliminary Statement of Guidance Regarding How Well Satellite Capabilities Meet WMO User Requirements in Several Application Areas* (WMO/TD-No. 913). Les documents *GCOS Plan for Space-based Observations* (version 1.0, WMO/TD-No. 684) et *Systematic Observation Requirements for Satellite-based Products for Climate* (WMO/TD-No. 1338) contiennent des informations sur l'historique et l'évolution future des plates-formes et capteurs satellitaires. La technologie de la télédétection progressant à grands pas, il arrive que les plans d'exploitation des plates-formes et des capteurs subissent des modifications. Il faut donc se reporter aux documents les plus récents quand on utilise des données issues de la télédétection. Le Comité sur les satellites d'observation de la Terre publie des rapports, accessibles sur l'internet, qui fournissent des renseignements à jour sur les satellites.

Comme dans le cas de la télédétection à partir de la surface, il est possible de classer les capteurs de satellites et autres capteurs embarqués en deux groupes: les capteurs passifs et les capteurs actifs. Les capteurs passifs comprennent les imageurs, les radiomètres et les sondeurs. Ils mesurent le rayonnement émis par l'atmosphère ou la surface terrestre. Les mesures qu'ils recueillent sont converties en données géophysiques, notamment des profils verticaux de la vapeur d'eau, de la température et de l'ozone; des renseignements sur les nuages; la température de surface de l'océan et des terres émergées; la couleur de l'océan et des terres émergées. La longueur d'onde dans laquelle fonctionne un capteur influe sur le type d'information recueillie, chaque bande de longueurs d'onde présentant des avantages et des inconvénients.

Les capteurs actifs comprennent les radars, les diffusiomètres et les lidars. Ils mesurent le signal rétrodiffusé par la cible irradiée. Ils présentent l'avantage de fournir des données précises sur la distance de la cible en mesurant le temps écoulé entre l'émission et le retour de l'onde.

Ils fournissent aussi des renseignements sur la position de la cible en utilisant un faisceau directionnel relativement concentré. Les signaux rétrodiffusés peuvent être convertis pour fournir des données sur la vitesse et la direction du vent, la hauteur dynamique de l'océan et le spectre des vagues, le rotationnel de la tension du vent et l'écoulement géostrophique, les propriétés des nuages, l'intensité des précipitations ainsi que des données pour les inventaires des étendues de glace.

Il arrive que des informations utiles soient tirées de données de satellites qui ne sont pas destinées initialement à l'étude du climat. À titre d'exemple, le Système de positionnement global exploite une constellation comptant une douzaine de satellites pour assurer un service de navigation. Mais en mesurant le temps de propagation des signaux utilisés par ce système, il est possible de déterminer la teneur de l'atmosphère en vapeur d'eau.

Les satellites opérationnels d'observation de l'environnement se situent sur deux types d'orbites complémentaires: géostationnaire et polaire. Un satellite en orbite géostationnaire se trouve à une altitude d'environ 36 000 km au-dessus de l'équateur, ce qui lui permet de tourner à la même vitesse et dans le même sens que la Terre. Il reste ainsi toujours au-dessus du même point de la surface terrestre. Il dispose alors d'une capacité de surveillance permanente, ce qui rend possible la poursuite de certaines caractéristiques atmosphériques et permet d'en tirer des données sur le vent. Les satellites en orbite polaire dite basse, ou également appelés satellites à défilement, se déplacent généralement à une altitude d'environ 800 km, dans une direction presque nord-sud par rapport à la Terre. Les instruments dont les satellites opérationnels à défilement sont équipés permettent d'observer la majeure partie du globe deux fois par jour à intervalle de 12 heures environ. Certes le fait de n'assurer que deux passages quotidiens constitue un inconvénient par rapport aux satellites géostationnaires, mais en contrepartie, les instruments embarqués sont plus variés et disposent d'une meilleure résolution spatiale, et les latitudes élevées sont bien mieux observées.

Comme pour le traitement des données *in situ*, les climatologues doivent être conscients de la nécessité de garantir la bonne gestion scientifique des données, qu'il s'agisse des données brutes que fournissent les mesures par télédétection ou les données traitées à des fins climatologiques. En plus des dix principes énumérés dans la section 2.1, les systèmes de satellites devraient respecter aussi les principes suivants:

1. Maintenir un échantillonnage constant tout au long du cycle diurne (en réduisant au minimum les effets du déclin et de la dérive de l'orbite).
2. Prévoir une période suffisante d'exploitation en parallèle pour déterminer les écarts de mesure entre satellites.
3. Assurer la continuité des mesures de satellite (en comblant les lacunes des relevés de longue durée) par le biais de stratégies de lancement et de mise en orbite bien adaptées.
4. Étalonner systématiquement les instruments – en particulier pour ce qui concerne la confirmation de la luminance énergétique au moyen d'une échelle internationale de luminance fournie par un institut national de métrologie – et décrire en détail leurs caractéristiques avant leur mise sur orbite.
5. Prévoir un étalonnage à bord pour les observations du système climatique ainsi que des moyens de contrôle des caractéristiques des instruments embarqués.
6. Assurer la production opérationnelle des produits climatologiques essentiels et faire en sorte que des spécialistes puissent procéder, s'il y a lieu, à l'examen des nouveaux produits.
7. Mettre en place des systèmes de données susceptibles de faciliter l'accès, par les utilisateurs, aux produits climatologiques, aux métadonnées et aux données brutes – y compris les données essentielles destinées aux analyses en différé.
8. Maintenir en service le plus longtemps possible les instruments de base en état de marche qui satisfont aux exigences en matière d'étalonnage et de stabilité précisées ci-dessus, même si ces instruments se trouvent sur des satellites mis hors service.
9. Veiller à compléter les mesures de satellites par des observations de référence *in situ* en ayant recours à la coopération et à des activités pertinentes.
10. S'agissant des observations satellitaires et des produits dérivés, déterminer les erreurs aléatoires et les écarts de mesure dépendant du temps.

2.3.5 Étalonnage des instruments

Pour qu'il soit possible de déterminer les variations spatiales et temporelles du climat, il est primordial d'établir à un moment donné le degré relatif d'exactitude des mesures exécutées par chacun des capteurs utilisés au sein d'un réseau et de le vérifier périodiquement. De même, il faut veiller à ce qu'il soit possible d'établir la relation entre les performances de capteurs et systèmes de remplacement et celles des appareils remplacés. Il est prescrit dans le *Manuel du Système mondial d'observation* (OMM-N° 544), volume I, partie III, section 3, que toutes les stations sont équipées d'instruments convenablement étalonnés. On trouvera des informations détaillées sur les techniques d'étalonnage dans le *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques*. Pour les besoins de la climatologie, il ne suffit pas en général de se satisfaire des étalonnages réalisés par les fabricants et il est faux de penser qu'après un étalonnage, il ne se produira pas de dérive ou qu'il n'y aura pas d'évolution dans le temps.

Il y a lieu de procéder, à l'aide d'un étalon portatif, à une comparaison des mesures exécutées par les instruments ou les systèmes de mesure à l'occasion du remplacement d'un appareil et à chaque inspection régulière de la station (voir la section 2.6.6). Les étalons voyageurs, qu'il faut vérifier par comparaison aux étalons de référence nationaux avant et après chaque déplacement, doivent être suffisamment robustes pour résister au transport et aux changements d'étalonnage. Il faut veiller à bien noter les modifications concernant les instruments et les dérives par rapport aux étalonnages et à communiquer ces informations qui constituent des métadonnées indispensables à l'évaluation des variations vraies du climat (voir la section 2.6.9).

Au cours des inspections des SMA installées dans des zones reculées, il convient d'exécuter des observations à l'aide d'étalons de voyage qu'on pourra ensuite comparer aux signaux de sortie enregistrés par la SMA, tels qu'ils sont reçus au centre chargé de réunir les données. Dans certains SMHN, on dispose de procédures de détection automatique d'erreurs et de dérives instrumentales, selon lesquelles les valeurs mesurées sont comparées à celles recueillies par le réseau et à des valeurs analysées provenant de champs lissés numériquement. Ces procédures automatiques sont utiles, car elles servent à détecter non seulement les dérives, mais aussi les variations anormales d'un échelon de la grandeur mesurée.

Des SMHN exploitent leurs propres installations d'étalonnage ou font appel pour cela à des sociétés d'étalonnage agréées. Les installations régionales d'étalonnage relevant de l'OMM sont chargées de conserver les étalons et de les étalonner, de certifier la conformité des instruments par rapport aux étalons, d'organiser des évaluations d'instruments et de fournir des conseils en ce qui concerne les performances des instruments.

La publication intitulée *GCOS Plan for Space-Based Observations* fournit des informations détaillées sur l'étalonnage des capteurs utilisés pour la télédétection à partir de l'espace, sur les chevauchements de relevés à des fins d'interétalonnage et sur les besoins en matière de métadonnées. Le Système mondial d'interétalonnage des instruments satellitaires prévoit de comparer les valeurs de la luminance énergétique mesurée simultanément par des paires de satellites au croisement de leurs traces au sol, en particulier dans les situations où les trajectoires d'un satellite à défilement et d'un satellite géostationnaire se croisent. Ce type de comparaison garantira un étalonnage mondial, cohérent sur le plan opérationnel.

L'étalonnage des radars météorologiques nécessite la mesure des caractéristiques des systèmes, notamment la fréquence émise et la puissance d'émission, le gain de l'antenne, les largeurs du faisceau, le niveau de sortie du récepteur et les pertes dues au filtrage. Le contrôle des performances permet de maintenir d'autres caractéristiques du système dans des limites acceptables, notamment l'orientation de l'antenne, les lobes latéraux, la durée et la forme des impulsions, les diagrammes des faisceaux et les niveaux de bruit au récepteur.

L'analyse régulière des données (par exemple, le contrôle par recoupement du comportement des capteurs et l'analyse des paramètres des décharges) doit permettre de détecter les dérives que peuvent subir les capteurs de détection de la foudre ou les paramètres du processeur central de traitement de l'information. Il convient aussi de procéder à des comparaisons avec d'autres

observations de l'activité des éclairs, notamment des observations manuelles de perception du tonnerre ou de la foudre, ou encore des observations de cumulonimbus. Comme pour les radars météorologiques, le contrôle et l'étalonnage des caractéristiques du système devraient être réalisés régulièrement.

2.4 EMPLACEMENT DES STATIONS CLIMATOLOGIQUES

Les critères précis d'exposition des instruments équipant spécialement les stations climatologiques, établis pour obtenir un degré d'exactitude optimal dans les mesures, sont examinés dans la partie III du *Manuel du Système mondial d'observation*, dans le *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques* et dans la publication intitulée *Representativeness, Data Gaps and Uncertainties in Climate Observations* (WMO/TD-No. 977). Ces ouvrages sont des compléments indispensables du présent guide.

La représentativité et l'homogénéité des relevés climatologiques sont étroitement liées à l'emplacement de la station d'observation. Une station située sur un versant, sur une crête, sur une falaise ou dans une cuvette, ou à proximité d'un relief, d'un immeuble, d'un mur ou de tout autre obstacle fournira des données qui seront plus représentatives du lieu même que de la contrée plus vaste qui l'entoure. Quand une station subit ou sera amenée à subir l'influence de la végétation, même s'il s'agit de petits arbustes près d'un capteur, ou celle de cultures de grande taille ou de bois à proximité, celle d'immeubles qui seraient construits sur des terrains adjacents, ou celle d'une hausse ou d'une baisse de la densité de la circulation routière ou aérienne (y compris dans le cas de changements touchant l'utilisation de pistes ou de voies d'accès), les données fournies ne seront ni largement représentatives ni homogènes.

Une station d'observation climatologique devrait se situer en un lieu favorisant l'exposition appropriée des instruments et offrant la plus large vue possible sur le ciel et le paysage environnant quand il faut y effectuer des observations visuelles. Les stations climatologiques ordinaires et principales devraient se trouver sur un terrain plat, couvert d'herbe rase, bien éloigné d'arbres, d'immeubles, de murs ou de pentes raides et qui ne se situe pas au fond d'une cuvette. Pour installer les instruments extérieurs de mesure de la température et de l'humidité, il suffit d'un enclos d'une superficie de neuf mètres sur six. L'idéal est de disposer dans cet enclos d'un carré de deux mètres de côté, conservé nu, pour les observations de l'état et de la température du sol. Une superficie légèrement plus grande (dix mètres sur sept) sera préférable si le site comprend aussi un pluviomètre.

À ce sujet, la distance entre un obstacle (y compris la clôture) et le pluviomètre sera supérieure à deux fois, et de préférence quatre fois, la hauteur de l'obstacle au-dessus de l'ouverture du pluviomètre, ce qui est une règle en vigueur dans de nombreux SMHN. D'une façon générale, la distance entre l'anémomètre et un obstacle quelconque représente au moins dix fois, mais de préférence vingt fois, la hauteur dudit obstacle. Compte tenu des différents critères d'exposition propres aux différents instruments, il peut falloir séparer le site en deux. Certains éléments sont alors mesurés en un point donné et d'autres en un autre point à proximité, l'ensemble des données étant regroupées sous l'indicatif d'une seule et même station.

Il est impératif de protéger le site des visiteurs non autorisés, ce qui peut nécessiter l'installation d'une clôture. Il importe cependant que ce type de mesure de sécurité ne vienne pas compromettre l'exposition des instruments. En règle générale, les stations automatiques exigent un degré élevé de sécurité, afin d'en assurer la protection contre les animaux et contre l'intrusion de toute personne non autorisée; elles nécessitent une alimentation électrique adéquate et résistante, et parfois aussi une protection supplémentaire contre les inondations, les débris de feuilles ou le sable soulevé par le vent.

Dans le cas des stations climatologiques ordinaires et principales, le choix de l'emplacement et des conditions administratives qui s'y appliquent, doit permettre un fonctionnement permanent de l'installation pendant au moins une décennie, son exposition demeurant inchangée durant toute

la période. Dans celui des stations utilisées ou créées pour déterminer les changements climatiques à long terme, notamment les stations climatologiques de référence et autres stations de référence du réseau du SMOC, le critère de constance de l'exposition et du fonctionnement porte sur plusieurs décennies.

Les sites d'observation et les instruments devraient être entretenus correctement de manière que la qualité des observations ne se détériore pas sensiblement entre deux inspections de la station. Le programme d'entretien ordinaire préventif comprend le «ménage» périodique des sites et du matériel (par exemple, fauchage de l'herbe et nettoyage des parties non protégées des instruments, y compris les abris météorologiques) et les vérifications auxquelles les fabricants recommandent de soumettre les instruments. Il faudrait prévoir de fréquents contrôles de qualité à la station ou dans un centre approprié, afin de déceler le plus tôt possible les défaillances de l'équipement. Selon la nature de la défaillance et le type de la station, l'équipement devrait être remplacé ou réparé conformément à un ordre de priorité et dans des délais convenus. Il importe tout particulièrement de tenir un journal des dysfonctionnements et des dispositions prises pour y remédier lorsque les données servent à des fins climatologiques. Ce journal sert de source principale de métadonnées concernant la station et fait donc partie intégrante des relevés climatologiques. Des indications détaillées sur l'entretien des stations figurent dans le *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques* (sixième édition).

Des contraintes supplémentaires s'appliquent aux stations de la VAG établies pour fournir des données sur la composition chimique de l'atmosphère, comme cela est indiqué dans le *Règlement technique*, Volume I, partie II, section 2. Les critères s'appliquant à ces stations comprennent les points suivants: les pratiques d'utilisation du sol ne doivent pas subir de modification notable dans un rayon de 50 km, l'endroit doit être à l'abri des sources locales et régionales de pollution, et donc être situé à l'écart des grands centres de population, des activités industrielles, des zones agricoles étendues, des voies à grande circulation, des activités volcaniques et des incendies de forêt. Les stations mondiales et régionales de la VAG doivent se situer à moins de 70 km d'une station d'observation synoptique en altitude.

Compte tenu de la nature des environnements urbains, il est impossible de se conformer aux indications standard, s'agissant du choix de l'emplacement d'une station et de l'exposition des instruments, qu'il y a lieu d'appliquer pour établir un relevé homogène qui puisse servir à décrire le climat à plus grande échelle. Les stations en milieu urbain présentent néanmoins un intérêt réel, puisqu'elles permettent de détecter localement de vrais changements du climat, ce qui revêt une importance dans un large éventail d'applications. La publication intitulée *Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites* (WMO/TD-No. 1250) propose des directives s'appliquant à la sélection des sites urbains, à l'installation de l'équipement et à l'interprétation des observations. Il est essentiel pour appliquer ces directives de bien comprendre dans quel but on veut effectuer des observations et obtenir des mesures qui soient représentatives d'un milieu urbain. Dans bon nombre de situations, il sera possible de respecter les pratiques normalisées, mais il peut falloir disposer d'une certaine latitude quand il s'agit d'installer une station et des équipements dans une ville. Les caractéristiques propres à ce type d'installation montrent combien il importe de consigner des métadonnées qui décrivent exactement la configuration de la station et des instruments.

2.5 CONCEPTION DES RÉSEAUX CLIMATOLOGIQUES

Un réseau de stations est formé de plusieurs stations de même type (par exemple, un ensemble de stations de mesure des précipitations, de stations de mesure du rayonnement ou de stations climatologiques) administrées en groupe. Il convient d'optimiser l'exploitation de chaque réseau pour obtenir des données à un coût acceptable. La plupart des méthodes d'optimisation mettent à profit les données provenant d'un réseau déjà en place et portant sur une période d'observation suffisamment longue pour qu'il soit possible de bien établir les propriétés des champs météorologiques. Elles se fondent sur des analyses statistiques à la fois temporelles et spatiales des séries chronologiques. Il est difficile d'anticiper sur quelle durée doivent porter les séries de

données car le nombre d'années qu'il faut pour parvenir à mettre en évidence les caractéristiques de la variabilité et de l'évolution du climat peut varier en fonction de l'élément climatique. On part du principe en général qu'il faut disposer d'observations quotidiennes sur une durée d'au moins dix ans pour produire les paramètres statistiques fondamentaux de la plupart des éléments et sur une durée d'au moins trente ans dans le cas des précipitations. La variabilité et les tendances climatiques régionales et mondiales qu'on a pu déterminer à partir des observations effectuées dans de nombreuses régions du globe au cours du siècle écoulé semblent indiquer cependant que des relevés portant sur des durées aussi courtes ne seraient probablement pas particulièrement représentatifs de périodes analogues à venir.

Parmi les solutions d'optimisation possibles, les responsables de réseaux sont amenés à rechercher l'existence de stations redondantes, ce qui leur permet, le cas échéant, d'éliminer de telles stations pour réduire les coûts et d'utiliser les ressources pour créer de nouvelles stations en des lieux où les observations contribueront mieux à atteindre les objectifs du réseau. Ils devraient tirer parti de la cohérence spatiale relativement élevée de certains champs météorologiques, notamment la température. Diverses techniques permettent d'évaluer le degré de redondance de l'information, notamment l'emploi des matrices de variance et covariance spatiales des stations en service, la régression linéaire multiple, l'analyse canonique et les expériences de simulation des systèmes d'observation (voir le chapitre 5).

La densité et la répartition des stations climatologiques qu'il faut viser au sein d'un réseau terrestre, dans une région donnée, sont fonction des éléments météorologiques à observer, de la topographie et de l'occupation des sols, et des besoins en données propres à l'élément climatique à étudier. D'un élément climatique à l'autre, les variations se produisent plus ou moins rapidement au sein d'une même région. Un réseau peu dense suffit pour l'étude de la pression en surface, un réseau moyennement dense, pour l'étude des températures maximales et minimales, et il faut atteindre une densité bien plus élevée pour établir la climatologie des précipitations, du vent, du gel ou du brouillard, en particulier dans les régions à la topographie bien marquée.

Les lieux d'implantation devraient être choisis pour que les stations puissent observer des caractéristiques du climat représentatives de tous les types de terrains (plaines, régions montagneuses, plateaux, littoral, îles, etc.) et de tous les types de couvertures du sol (forêts, zones urbaines, zones agricoles, déserts, etc.) présents dans la région étudiée. La densité du réseau devrait varier en fonction des fins pour lesquelles les observations doivent être effectuées et les données, employées. Lorsque les données doivent servir à des applications sectorielles dans une région précise, la densité à atteindre devra probablement être plus élevée si les activités sont sensibles au climat ou si les conditions climatiques ont une influence sur la santé; elle le sera moins dans les endroits moins peuplés. La planification des réseaux terrestres nécessite souvent des compromis entre la densité optimale des stations et les ressources dont on dispose pour installer, exploiter et administrer les stations.

La répartition des stations du Réseau synoptique de base régional qui transmettent des données climatologiques mensuelles en surface devrait être telle que chaque zone de 250 000 km² soit représentée par au moins une station et jusqu'à dix également réparties si cela est possible. La répartition des stations qui transmettent des données climatologiques mensuelles en altitude devrait être telle que chaque zone de 1 000 000 km² soit représentée par au moins une station. Dans les réseaux de stations climatologiques principales, l'espacement moyen entre les stations ne doit pas dépasser 500 km, et quand il s'agit de stations d'observation en altitude à des fins climatologiques, il ne doit pas dépasser 1 000 km.

Chaque Membre devrait établir et exploiter au moins une station climatologique de référence dont les données doivent permettre de déterminer les tendances du climat. À cet effet, il faut disposer de séries d'observations homogènes portant sur une période de plus de 30 ans, effectuées en des emplacements où des modifications du milieu dues aux activités de l'homme se sont rarement produites et ont peu de chance de se produire. Des indications sur les réseaux et les stations d'observation agrométéorologique et hydrométéorologique figurent respectivement dans le *Guide des pratiques de météorologie agricole* et le *Guide des pratiques hydrologiques*, et des conseils supplémentaires, dans le *Manuel du Système mondial d'observation*.

À l'échelon national, les activités d'information sur l'environnement incombent souvent à différentes entités dont les contributions sont complémentaires et parfois redondantes. Pour un pays, le fait que l'information sur l'environnement soit recueillie et diffusée à la fois par des organismes publics et des entités non gouvernementales (y compris les sociétés privées, les sociétés de service et les universités) représente un avantage. Pour optimiser les ressources, il est tout à fait souhaitable que des partenariats officiels soient établis entre les SMHN et ces autres parties. Étant donné que les données et informations recueillies auprès de sources différentes ne sont généralement pas soumises au contrôle des SMHN, il est indispensable, pour pouvoir les utiliser à bon escient, de disposer des métadonnées correspondantes. Comme dans le cas des stations exploitées par les SMHN, il convient donc d'obtenir des métadonnées dûment étayées sur les instruments, leur emplacement, les procédures de traitement des données, les méthodes appliquées et toute autre indication qui pourrait améliorer l'utilité de l'information. Ces métadonnées doivent en outre être conservées avec soin et accessibles. Pour encourager un échange ouvert et non restrictif d'informations sur l'environnement, y compris les observations météorologiques, il est hautement souhaitable que les SMHN soient autorisés à utiliser l'ensemble des données et informations climatologiques de partenaires, sans aucune restriction, comme s'il s'agissait des leurs. Pour ce faire, des contrats ou des protocoles d'accord devront éventuellement être conclus et signés entre les directions générales des SMHN et des organisations concernées.

Outre les données que recueillent les réseaux publics et privés de stations climatologiques, il existe aussi parfois des données d'observation émanant de réseaux de stations mis en place temporairement pour les besoins de programmes de recherche ou d'étude, ou encore des mesures effectuées pour établir des transects ou des profils ponctuels. Les SMHN devraient s'attacher à obtenir de telles données avec les métadonnées qui y correspondent. Certes, ces données risquent de ne pas convenir pour un archivage normal, mais elles se révèlent souvent fort utiles en tant qu'information complémentaire, par exemple pour les enquêtes portant sur des phénomènes extrêmes bien précis. Et quand elles proviennent de régions où les données d'observation sont rares, leur utilité est d'autant plus grande.

2.6 FONCTIONNEMENT DES STATIONS ET DES RÉSEAUX

Les indications figurant dans la présente section portent principalement sur les observations effectuées dans les stations climatologiques ordinaires (habituellement deux fois par jour, mais dans certains cas une fois seulement et qui comprennent le relevé quotidien des maximums et des minimums de température et des valeurs des précipitations). Elles portent aussi sur les stations d'observation pluviométrique (où seules les précipitations sont mesurées une ou plusieurs fois par jour). En ce qui concerne les stations climatologiques principales (qui font aussi fonction en général de stations d'observation synoptique), ainsi que d'autres types de stations climatologiques, on trouvera la réglementation et les directives en vigueur dans le *Manuel du Système mondial d'observation*.

2.6.1 Heures des observations

Dans les stations climatologiques ordinaires et les stations pluviométriques, on procède à des observations au moins une fois par jour (et de préférence deux fois) à heure fixe, sans modification en cours d'année. Dans les stations climatologiques principales, on procède à des observations au moins trois fois par jour en plus des relevés horaires établis à partir des enregistrements automatiques et, quand il ne s'agit pas d'instruments enregistreurs, les observations sont généralement horaires. D'un point de vue pratique, les heures d'observation devraient correspondre aux horaires de travail des observateurs, soit habituellement une observation le matin et une observation dans l'après-midi ou en soirée. Si le régime de l'heure d'été est appliqué pendant une partie de l'année, il faut prendre des dispositions pour que les observations continuent à être effectuées à la même heure locale, et il y a lieu d'enregistrer les dates de début et de fin de la période d'heure d'été. Dans toute la mesure du possible, les heures d'observation

devraient coïncider avec les heures standard principales ou intermédiaires (0000, 0300, 0600 UTC (temps universel coordonné), etc.) prescrites pour les observations synoptiques en surface. Dans les conditions où seule une observation quotidienne se révèle possible, celle-ci doit avoir lieu entre 0700 et 0900 (heure locale standard).

Il y a lieu d'éviter les périodes de la journée correspondant aux minimums et aux maximums de température quand on fixe les horaires des observations climatologiques. Les hauteurs de précipitations et les températures maximales relevées le matin de bonne heure doivent être imputées au jour civil précédent, tandis que les températures maximales relevées au cours des observations effectuées dans l'après-midi ou en soirée doivent l'être au jour civil de l'observation.

Il est fréquent que les heures d'observation varient en fonction des réseaux. Les observations sommaires, telles que les extrêmes de température et les hauteurs totales des précipitations sur une période de 24 heures (par exemple entre 0800 un jour et 0800 le lendemain) ne coïncident pas avec celles couvrant une période de 24 heures différente (par exemple entre 0000 et 2400).

Quand un changement des heures d'observation intervient dans un réseau, des observations simultanées devraient être effectuées par un nombre réduit de stations représentatives durant une période comprenant les saisons climatiques principales de la région, aux anciennes et aux nouvelles heures d'observation. Il faut ensuite évaluer ces observations simultanées pour déterminer si le changement d'horaire a pu causer des erreurs systématiques. Pour la transmission et l'archivage des données, les observations effectuées aux anciennes et aux nouvelles heures doivent porter des indicatifs de station uniques.

2.6.2 Enregistrement et transmission des observations

Dans une station dotée de personnel, l'observateur doit, dès qu'il a réalisé une observation, inscrire le résultat sur un registre qui est conservé à la station à cet effet. Mais il peut aussi saisir les données ou les transcrire immédiatement sur un ordinateur ou un terminal de transmission, dans une base de données. Dans certains pays, la législation en vigueur ou des entités juridiques (cours de justice par exemple) peuvent exiger qu'un relevé sur papier ou qu'une sortie sur imprimante de la saisie initiale soit conservé pour pouvoir servir de pièce justificative en cas de procédure juridictionnelle. Cette obligation peut aussi découler de la difficulté à faire accepter l'information produite par une base de données. L'observateur doit veiller à ce qu'un relevé complet et précis de l'observation soit enregistré. Selon une fréquence établie (qui peut aller de l'immédiat à une fois par mois) en fonction des besoins des SMHN, les données inscrites dans le registre de la station (y compris dans une base de données sur ordinateur) doivent être transcrites sur un formulaire bien défini pour être transmises, soit par courrier soit de façon électronique, à un bureau centralisateur.

Le personnel d'une station climatologique doit veiller à ce que l'information pertinente soit correctement transcrite sur le formulaire de transmission de données. Quand il s'agit de relevés sur papier, il convient d'insister sur la nécessité de bien tenir le registre et les formulaires de transmission et d'y écrire distinctement. Il est fréquent que les observateurs inscrivent sur le registre davantage de renseignements que la stricte information requise par le bureau central, notamment peut-être en cas de phénomènes météorologiques inhabituels ou d'occurrences particulières. Dans la station, le registre sur lequel les relevés sont inscrits doit être conservé à portée de la main pour que le personnel puisse s'y reporter afin de répondre à toute demande émanant du bureau central au sujet d'erreurs ou d'omissions éventuelles dans les formulaires de transmission de données. Certains Services demandent aux observateurs d'expédier les registres au centre climatologique national pour qu'ils y soient archivés.

Certains centres climatologiques nationaux demandent au personnel des stations de calculer et d'enregistrer les totaux et les moyennes mensuels des précipitations et de la température pour qu'il soit plus facile de vérifier les données dans l'entité centralisatrice. Par ailleurs, les données doivent être codées en messages CLIMAT, soit par le centre climatologique soit par l'observateur, comme cela est décrit dans le *Manuel sur le chiffrage des messages CLIMAT et CLIMAT TEMP*

(OMM/DT-N° 1188). L'OMM a mis au point un logiciel pour coder les données. Il appartient à l'observateur de noter dans le registre de la station et sur les formulaires de transmission de données la nature de tout dommage ou toute panne constaté sur un instrument et l'heure à laquelle cela s'est produit, et d'en faire de même pour les activités de maintenance et pour tout changement touchant l'équipement ou l'exposition de la station. Tous ces événements peuvent en effet avoir une influence sur les données d'observation et par conséquent sur les relevés climatologiques. Le cas échéant, des instructions doivent être fournies au sujet de la transmission électronique des données d'observation. De même, quand les formulaires de transmission de données doivent être expédiés par courrier postal, les instructions correspondantes sont fournies à la station, ainsi que des enveloppes timbrées, libellées au nom et à l'adresse du centre climatologique destinataire.

2.6.3 Contrôle de qualité sur site

Des indications générales sur le contrôle de qualité sur site portant sur les observations et les messages d'observation sont présentées dans la partie V, volume I, du *Manuel du Système mondial d'observation*. Le *Guide du Système mondial d'observation*, dans sa partie VI, apporte à ce sujet davantage de détails. Les procédures décrites ci-après s'appliquent aux cas où un observateur ou un membre compétent du personnel est présent sur place.

Il y a lieu d'effectuer des contrôles pour déceler des erreurs flagrantes, par rapport aux extrêmes déjà enregistrés, et pour vérifier la cohérence interne des séries d'observations, la cohérence temporelle de la série de dates et d'heures des observations, la cohérence par rapport à d'autres éléments et aux calculs, l'exactitude des copies et des messages codés. Ces contrôles peuvent être réalisés manuellement ou suivant des procédures automatisées. Si des erreurs sont découvertes, il convient de prendre des mesures appropriées et notamment corriger les données initiales et le formulaire avant la transmission. Si les erreurs sont décelées après la transmission des données, il faut néanmoins les corriger et envoyer un nouveau message d'observation corrigé. En réponse à toute demande portant sur la qualité des données et émanant de sources externes, il faut aussi procéder à des contrôles et, le cas échéant, enregistrer toutes modifications requises et transmettre les corrections. Quand le relevé d'une observation comporte une erreur, il faut l'annoter ou y ajouter un indicateur en précisant que la valeur initiale est erronée ou suspecte. Dans le contrôle de qualité sur site, il faut aussi vérifier que les capteurs et la station conservent bien leur exposition standard et que les procédures correctes de lecture des instruments et de vérification des diagrammes d'enregistrement sont bien suivies.

Il convient d'analyser toutes les formes d'erreurs de mesure, pour vérifier par exemple s'il faut les attribuer à la dérive ou au mauvais fonctionnement d'un instrument, et il y a lieu de préparer des résumés mensuels ou annuels des insuffisances en matière de données ou de messages de données.

2.6.4 Responsabilités générales des observateurs

Dans chaque pays Membre, les attributions des observateurs sont en général définies par le SMHN. Dans l'ensemble, la compétence des observateurs doit porter sur l'exécution des tâches suivantes:

- a) Exécuter avec les instruments appropriés des observations climatologiques offrant l'exactitude requise;
- b) Maintenir en bon état les instruments et les sites d'observation;
- c) Procéder aux contrôles de qualité appropriés;
- d) Coder et envoyer les observations (en l'absence de systèmes automatiques de codage et de communication);
- e) Entretien des appareils enregistreurs et enregistreurs électroniques de données de la station, notamment changer les diagrammes s'il y a lieu;

- f) Dresser ou compiler les relevés hebdomadaires ou mensuels de données climatologiques en l'absence de systèmes automatiques appropriés;
- g) Fournir des observations supplémentaires ou de remplacement lorsque l'équipement automatique se trouve hors service ou ne se prête pas à l'observation de tous les éléments prescrits.

2.6.5 Formation professionnelle des observateurs

Les observateurs devraient recevoir d'un service météorologique habilité une formation ou un diplôme garantissant qu'ils possèdent les compétences voulues pour exécuter des observations conformes aux normes en vigueur. Ils devraient être capables d'interpréter et d'adapter à leurs systèmes d'observation particuliers les instructions intéressant l'emploi des instruments et des techniques manuelles. Le chapitre 4 de la partie III du *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques* (sixième édition) contient des directives sur la formation des observateurs dans le domaine des instruments.

Les observateurs sont souvent soit des bénévoles soit des employés à temps partiel ou alors l'observation fait partie d'un ensemble d'autres fonctions. Certains n'ont reçu qu'une formation succincte voire aucune formation en climatologie ou sur l'observation scientifique et doivent donc avoir accès à un ensemble de manuels rédigés avec grand soin et mis spécialement à leur disposition dans toutes les stations climatologiques ordinaires et pluviométriques. Les instructions qui contiennent ces manuels doivent être dépourvues d'ambiguïté et décrire simplement les tâches à mener à bien, en se limitant à l'information que l'observateur doit connaître pour remplir ses tâches de façon satisfaisante. Il peut être fait usage d'illustrations, de graphiques et d'exemples pour stimuler l'intérêt de l'observateur et favoriser la compréhension des tâches à accomplir quotidiennement. Des modèles dûment remplis de pages du registre de la station et du formulaire de transmission de données devraient figurer dans les manuels à disposition des observateurs. En principe, un représentant du centre climatologique devrait venir visiter l'emplacement, installer la station, puis former l'observateur.

Un observateur doit se familiariser avec les instruments et doit connaître en particulier les sources des erreurs éventuelles que leur lecture peut engendrer. Les instructions devraient comprendre un descriptif de chaque instrument accompagné d'illustrations simples pour en expliquer le fonctionnement. Elles doivent aussi fournir des indications détaillées sur les soins courants à apporter aux instruments, les opérations simples de maintenance et les contrôles d'étalonnage. Quand certaines observations ou l'enregistrement de données nécessitent l'emploi de tables de correction ou d'étalonnage, l'observateur doit bien en connaître l'usage. Les instructions devraient aussi porter sur le fonctionnement des outils informatiques utilisés pour saisir les données et les transmettre.

Les instructions doivent porter aussi bien sur les observations visuelles que sur les observations instrumentales. Les observations visuelles sont particulièrement sujettes aux erreurs subjectives et leur exactitude est fonction de la compétence de l'observateur et de l'expérience qu'il a pu acquérir. Comme il est très difficile de contrôler l'exactitude ou la validité d'une observation visuelle personnelle, il y a lieu de fournir autant d'indications que possible à ce sujet pour que les observations soient exécutées correctement.

En complément des manuels d'instructions, il appartient aux membres du personnel du Service climatologique chargé de l'exploitation des stations de communiquer avec le personnel des stations quand des erreurs d'observation se répètent ou que des instructions sont mal interprétées. Les visites d'inspection régulières fournissent l'occasion d'aborder les problèmes propres à l'emplacement ou aux instruments et de parfaire la formation des observateurs.

Des centres climatologiques organisent des cours de formation s'adressant spécialement à des groupes d'observateurs bénévoles. Ces cours ont pour intérêt d'assurer une bonne qualité uniforme des observations et de dégager du temps pour examiner un éventail de problèmes plus large que ceux qu'un seul observateur soulèverait à l'occasion d'une visite sur site.

2.6.6 Inspection des stations

Les stations climatologiques principales devraient être inspectées une fois par an et les stations climatologiques ordinaires et pluviométriques, au moins une fois tous les trois ans – ou plus fréquemment si nécessaire – cela permettant de s’assurer de l’entretien et du bon fonctionnement des instruments et de garantir ainsi aux observations un niveau de qualité élevé. Les stations automatiques devraient être inspectées au moins tous les six mois. Les dispositions spéciales concernant l’inspection des instruments à bord des navires figurent dans le *Guide des instruments et des méthodes d’observation météorologiques* (cinquième édition).

Avant chaque voyage d’inspection, l’inspecteur devrait déterminer dans toute la mesure du possible la qualité de l’information et des données reçues de chaque station figurant sur son itinéraire. À l’occasion de chaque inspection, il y a lieu de confirmer que:

- a) Le niveau de formation de l’observateur est à jour;
- b) L’observateur demeure compétent;
- c) L’emplacement et l’exposition des instruments sont connus, enregistrés et toujours les meilleurs possible;
- d) Les instruments sont d’un modèle approuvé, en bon état et vérifiés régulièrement par comparaison avec les étalons appropriés;
- e) Les méthodes d’observation et les méthodes de calcul des grandeurs dérivées sont uniformes;
- f) Le registre de la station est bien tenu;
- g) Les formulaires de transmission de données sont expédiés avec ponctualité et régularité au centre climatologique.

Il est bon d’inclure dans les rapports d’inspection des croquis, des photographies ou des diagrammes du site d’observation indiquant les caractéristiques physiques du voisinage immédiat qui peuvent avoir un effet sur les valeurs observées des éléments climatiques. Il faut aussi y dresser une liste de tous les changements concernant les instruments, de tous les écarts enregistrés entre les valeurs fournies par les instruments de la station et celles fournies par les étalons de voyage, des changements d’exposition ou des modifications des caractéristiques du site par rapport à la visite précédente, et des dates des comparaisons et des changements. Les inspecteurs doivent aussi pouvoir proposer des solutions aux observateurs qui éprouvent des difficultés s’agissant de la transmission des données, y compris au sujet des systèmes automatiques de saisie et de transmission des données. Les rapports d’inspection, qui représentent une source importante de métadonnées servant à déterminer l’homogénéité du relevé climatologique, devraient être conservés indéfiniment, ou l’information qu’ils contiennent, stockée dans une base de données informatique (voir la section 3.1).

2.6.7 Sauvegarde de l’homogénéité des données

Contrairement aux observations servant à la production de prévisions et d’avis, la réalisation de relevés climatologiques permanents et ininterrompus constitue la base de nombreuses études importantes auxquelles participent divers protagonistes du secteur de la climatologie. Les jeux de données homogènes sur le climat revêtent une importance cruciale si l’on veut satisfaire les besoins de la recherche, des applications et de la prestation de services.

La modification d’un site ou le déplacement d’une station sont les principales causes à l’origine d’un manque d’homogénéité. Les dix principes relatifs à la surveillance du climat (voir la section 2.1) devraient être appliqués quand le déplacement d’une station climatologique se révèle indispensable, quand une station doit être remplacée par une autre située à proximité ou quand les systèmes d’instruments sont remplacés. Dans la mesure où cela est réalisable, des observations simultanées devraient être effectuées – à l’ancien et au nouvel emplacement ou avec les anciens et les nouveaux instruments – pendant au moins une année, et de préférence deux ou plus, pour que la période de chevauchement permette de déterminer les effets du changement de lieu ou d’instruments sur les données climatologiques. Pour la transmission et l’archivage des

données, les observations provenant de l'ancien et du nouveau sites devraient porter des indicatifs de station uniques. La publication intitulée *Directives pour la gestion des changements apportés aux programmes d'observation du climat* (OMM/DT-N° 1378) fournit des directives précises à ce sujet.

2.6.8 **Contrôle des messages aux centres de collecte**

Il incombe aux centres de collecte ou d'archivage des données de vérifier que les observateurs ont bien transmis l'information à l'heure prévue et que les données sont de bonne qualité. Ils doivent aussi s'occuper des données provenant des systèmes de mesure ou de transmission automatiques. Le traitement porte donc normalement sur de gros volumes de données et les systèmes de vérification informatiques facilitent bien la tâche.

Il faut tout d'abord vérifier que les observations attendues sont bien arrivées et qu'elles ont été transmises à l'heure correcte. Dans le cas contraire, il faut communiquer avec l'observateur pour en déterminer la raison. Quand il s'agit de systèmes automatiques, le «gardien» doit rechercher tout signe visible de panne et en informer dès que possible les responsables de la maintenance des systèmes d'observation et de transmission.

Au sujet de la qualité des données reçues des stations automatiques et des stations dotées de personnel, les contrôles devraient comprendre ceux décrits dans la section 2.6.3. D'autres vérifications sont utiles et faciles à intégrer dans le contrôle informatisé. Il s'agit notamment de vérifications par rapport aux données provenant de stations voisines, de divers contrôles statistiques, de vérifications par rapport à des seuils prédéfinis, ainsi que de vérifications de cohérence temporelle et de cohérence entre les divers éléments. Des techniques de vérification de données sont décrites dans les chapitres 4 et 5.

Les contrôles effectués peu après l'exécution des observations, à la station ou à distance, présentent peu d'intérêt si aucune mesure n'est prise rapidement pour remédier aux problèmes. L'information doit être envoyée aux observateurs, aux gardiens, aux inspecteurs, aux personnes chargées de la maintenance des instruments ou du système et aux fabricants; il faut ensuite informer le centre de contrôle, des mesures prises. Il faut conserver copie de tous les messages.

2.6.9 **Documentation relative à la station et métadonnées**

Pour qu'on puisse utiliser au mieux les données climatologiques, les organes climatologiques ou toute autre entité autorisée doivent veiller à bien conserver la documentation relative à toutes les stations du pays, pour tous les réseaux et toutes les plates-formes d'observation. Ces métadonnées sont essentielles; elles doivent être tenues à jour et mises à disposition sous forme de catalogues de stations, d'inventaires de données et de fichiers de données climatologiques. L'OMM met au point actuellement des normes applicables aux métadonnées qui se fondent sur les normes déjà établies à ce sujet par l'Organisation internationale de normalisation (ISO), et notamment les normes ISO de la série 19100. Il convient d'appliquer les indications fournies ci-après, à moins que des normes sur les métadonnées relatives à la climatologie soient publiées pour les remplacer.

Les principales métadonnées relatives à la station sont les suivantes: nom et indicatif(s) de la station; coordonnées géographiques; altitude; administrateur ou propriétaire; type de sol, constantes physiques et profil du sol; type de végétation et état de la végétation; description de la topographie; description de l'occupation des sols aux alentours; photographies et graphiques des instruments, du site et des alentours; type de SMA, nom du fabricant, modèle et numéro de série; programme d'observation de la station (éléments mesurés, heure de référence, heures d'observation ou de mesure et heures de transmission des données, et niveau de référence pour la mesure de la pression atmosphérique à la station); et renseignements permettant de communiquer avec quelqu'un sur place, nom et adresse postale, adresse électronique et numéros de téléphone.

La documentation devrait comprendre l'historique complet de la station et fournir les dates et les détails de tous les changements intervenus. Cela doit démarrer à la création de la station, avec le commencement des observations, inclure toutes les interruptions de service et se terminer à la fermeture éventuelle de la station. Il importe d'y joindre les comptes rendus des visites d'inspection (voir la section 2.6.6), en particulier les remarques portant sur l'emplacement, l'exposition, la qualité des observations et le fonctionnement de la station.

Les métadonnées relatives aux instruments qu'il convient de consigner sont les suivantes: type de capteur, nom du fabricant, modèle et numéro de série; principe de fonctionnement; méthode de mesure ou d'observation; type de système de détection; caractéristiques de fonctionnement; unité de mesure et plage de mesure; résolution, exactitude (degré d'incertitude), constante de temps, résolution temporelle et temps d'intégration des valeurs moyennes; choix de l'emplacement et exposition (lieu, protection et hauteur au-dessus du sol ou profondeur); date de l'installation; acquisition des données (intervalle d'échantillonnage et intervalle et type d'intégration des valeurs moyennes); procédures de correction; données sur l'étalonnage précisant la date et l'heure; maintenance préventive et corrective (opérations de maintenance et d'étalonnage recommandées et prévues, y compris fréquence et description de ces opérations); et résultats de la comparaison avec des étalons voyageurs.

Pour chacun des éléments météorologiques, voici le type de métadonnées sur le traitement des observations qu'il convient de consigner: programme de mesure ou d'observation (heures d'observation, fréquence de transmission, sortie de données); méthode, procédure ou algorithme de traitement des données; formules de calcul; mode d'observation ou de mesure; intervalle de traitement; résolution indiquée; source du signal (instrument et élément); et constantes et valeurs des paramètres.

Les métadonnées relatives à la manipulation des données devraient porter notamment sur les procédures et algorithmes de contrôle de la qualité, la définition des indicateurs de contrôle de qualité, les constantes et les valeurs des paramètres, et les procédures de traitement et de stockage. Les métadonnées sur la transmission des données présentant un intérêt sont les suivantes: mode de transmission, forme de présentation des données, heures de transmission et fréquences de transmission.

Pour les stations d'observation en altitude, les besoins en métadonnées sont sensiblement les mêmes que ceux qui s'appliquent aux stations d'observation en surface. Il convient également de disposer de métadonnées sur tous les instruments non récupérables utilisés (notamment les radiosondes).

2.7 BIBLIOGRAPHIE

2.7.1 Publications de l'OMM

- Organisation météorologique mondiale, 1982: *Manuel international des pratiques de mesure de la pollution atmosphérique de fond* (OMM-N° 491), Genève.
- , 1983: *Guide des pratiques de météorologie agricole*. Deuxième édition (OMM-N° 134), Genève.
- , 1988: *Règlement technique*, Vol. I – Pratiques météorologiques générales normalisées et recommandées; Vol. II – Assistance météorologique à la navigation aérienne internationale; Vol. III – Hydrologie (OMM-N° 49), Genève.
- , 1990, 1996, 2008: *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques*. Cinquième, sixième et septième éditions (OMM-N° 8), Genève.
- , 1990: *Manuel de l'assistance météorologique aux activités maritimes*, vol. I – Aspects mondiaux; vol. II – Aspects régionaux (OMM-N° 558), Genève.
- , 1992: *Manuel du Système mondial de traitement des données*, vol. I et II (OMM-N° 485), Genève.

- , 1994: *Guide des applications de la climatologie maritime* (OMM-N° 781), Genève.
- , 1994: *Guide des pratiques hydrologiques*. Cinquième édition (OMM-N° 168), Genève.
- , 1995: *GCOS Guide to Satellite Instruments for Climate* (WMO/TD-No. 685, GCOS-No. 16), Genève.
- , 1995: *GCOS Plan for Space-Based Observations*. Version 1.0 (WMO/TD-No. 684, GCOS-No. 15), Genève.
- , 1995: *Manuel du Système mondial d'observation*, vol. II – Aspects régionaux (OMM-N° 544), Genève.
- , 1995: *Plan for the Global Climate Observing System (GCOS)*. Version 1.0 (WMO/TD-No. 681, GCOS-No. 14), Genève.
- , 1997: *GCOS/GTOS Plan for Terrestrial Climate-related Observations*, Version 2.0 (WMO/TD-No. 796, GCOS-No. 32), Genève.
- , 1997: *Report of the GCOS/GOOS/GTOS Joint Data and Information Management Panel*, troisième session (Tokyo, Japon, 15–18 juillet 1997) (WMO/TD-No. 847, GCOS-No. 39), Genève.
- , 1998: *Preliminary Statement of Guidance Regarding How Well Satellite Capabilities Meet WMO User Requirements in Several Application Areas* (WMO/TD-No. 913, SAT-21), Genève.
- , 1999: *Representativeness, Data Gaps and Uncertainties in Climate Observations* (exposé présenté par Chris Folland lors du Treizième Congrès météorologique mondial, 21 mai 1999) (WMO/TD-No. 977, WCDMP-No. 44), Genève.
- , 2000: *SPARC Assessment of Upper Tropospheric and Stratospheric Water Vapour* (WMO/TD-No. 1043, WCRP-No. 113), Genève.
- , 2000: *WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO 2000)*, Lightning Detection Systems, (WMO/TD-No. 1028), Genève.
- , 2001: *Guide de l'assistance météorologique aux activités maritimes*. Troisième édition (OMM-N° 471), Genève.
- , 2002: *Guide to the GCOS Surface and Upper-Air Networks. GSN and GUAN*, Version 1.1 (WMO/TD-No. 1106, GCOS-No. 73), Genève.
- , 2003: *Aerosol Measurement Procedures Guidelines and Recommendations* (WMO/TD-No. 1178, GAW-No. 153), Genève.
- , 2003: *Guidelines on Climate Observation, Network and Systems* (WMO/TD-No. 1185, WCDMP-No. 52), Genève.
- , 2003: *Manuel du Système mondial d'observation*, vol. I – Aspects mondiaux (OMM-N° 544), Genève.
- , 2003: *The Second Report on the Adequacy of the Global Observing System for Climate in Support of the UNFCCC* (WMO/TD-No. 1143, GCOS-No. 82), Genève.
- , 2004: *The Changing Atmosphere: An Integrated Global Atmospheric Chemistry Observation Theme for the IGOS Partnership* (WMO/TD-No. 1235, ESA SP-1282), Genève.
- , 2004: *Guidelines on Climate Data Rescue*, (WMO/TD-No. 1210, WCDMP-No. 55), Genève.
- , 2004: *Manuel sur le chiffrement des messages CLIMAT et CLIMAT TEMP* (OMM/DT-N° 1188), Genève.
- , 2004: *Implementation Plan for the Global Climate Observing System for Climate in Support of the UNFCCC* (WMO/TD-No. 1219, GCOS-No. 92), Genève.
- , 2006: *Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites* (WMO/TD-No. 1250), Genève.
- , 2006: *Systematic Observation Requirements for Satellite-based Products for Climate* (WMO/TD-No. 1338, GCOS-No. 107), Genève.
- , 2007: *Guide du Système mondial d'observation* (OMM-N° 488), Genève.
- , 2007: *Directives pour la gestion des changements apportés aux programmes d'observation du climat* (OMM/DT-N° 1378, PMDSC-N° 62), Genève.
- , 2007: *RA IV Training Seminar on Capacity Building in Climate-related Matters* (WMO/TD-No. 1386, WCDMP-No. 63), Genève.
- , 2008: *Plant Phenological Guidelines* (WMO/TD-No. 1484, WCDMP-No. 70), Genève.

2.7.2 **Autres lectures**

- Bénichou, P., 1992: Optimisation de l'implantation d'un réseau complémentaire en zone accidentée: application au réseau automatisé d'Auvergne. *La Météorologie*, 43–44: 3–17.
- Christian, H., 2003: *Global lightning activity*. In: *Proceedings of the 12th International Conference on Atmospheric Electricity*, Versailles, France, 9–11 juin 2003 (S. Chauzy et P. Laroche, coordinateurs de la publication). Paris, ONERA.
- Cronin, T.M., 1999: *Principles of Paleoclimatology*. New York, Columbia University Press.
- Der Mègréditchian, G., 1985: Méthodes statistiques d'analyse et d'interpolation spatiales des champs météorologiques. *La Météorologie*, 17:51–66.
- Dover, J. et L.J. Winans, 2002: Evaluation of windshields for use in the automated surface observing system (ASOS). In: *Proceedings of the Sixth Symposium on Integrated Observing Systems*, Orlando, Florida, 14–17 janvier 2002. Boston, American Meteorological Society.
- Free, M., I. Durre, E. Aguilar, D. Seidel, T.C. Peterson, R.E. Eskridge, J.K. Luers, D. Parker, M. Gordon, J. Lanzante, S. Klein, J. Christy, S. Schroeder, B. Soden et L.M. McMillin, 2002: Creating climate reference datasets: CARDS workshop on adjusting radiosonde temperature data for climate monitoring. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 83:891–899.
- Free, M. et D.J. Seidel, 2005: Causes of differing temperature trends in radiosonde upper-air datasets. *J. Geophys. Res.*, 110:D07101.
- Haas, T.C., 1992: Redesigning continental-scale monitoring networks. *Atmospheric Environment*, 26A:3323–3333.
- Karl, T.R., C.N. Williams Jr, P.J. Young et W.M. Wendland, 1986: A model to estimate the time of observation bias associated with monthly mean maximum, minimum, and mean temperature for the United States. *J. Climate Appl. Meteorol.*, 25:145–160.
- Leroy, M., 1998: Meteorological measurements representativity: nearby obstacles influence. In *Tenth Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Phoenix, Arizona, 11–16 janvier 1998. Boston, American Meteorological Society.
- , 1998: Climatological site classification. In: *Tenth Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Phoenix, Arizona, 11–16 janvier 1998. Boston, American Meteorological Society.
- Lieth, H. (éd.), 1974: *Phenology and Seasonality Modeling*. New York, Springer.
- National Climatic Data Center (NCDC), 2002: *U.S. Climate Reference Network Site Information Handbook*. Asheville, NCDC.
- Ohring, G., B. Wielicki, R. Spencer, B. Emery et R. Datla, 2005: Satellite instrument calibration for measuring global climate change: report of a workshop. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 86:1303–1313.
- Oke, T.R., 1987: *Boundary Layer Climates*. Deuxième édition. Cambridge, Cambridge University Press.
- , 2006: Towards better scientific communication in urban climate. *Theor. Appl. Climatol.*, 84:179–190.
- Panel on Climate Change Feedbacks, Climate Research Committee, National Research Council, 2003: *Understanding Climate Change Feedbacks*. Washington, DC, National Academy Press.
- Panel on Reconciling Temperature Observations, Climate Research Committee, Board on Atmospheric Sciences and Climate, National Research Council, 2000: *Reconciling Observations of Global Temperature Change*. Washington, DC, National Academy Press.
- , 2000: *Improving Atmospheric Temperature Monitoring Capabilities: Letter Report*. Washington, DC, National Academy Press.
- Quadrelli, R. et J.M. Wallace, 2004: A simplified linear framework for interpreting patterns of Northern Hemisphere wintertime climate variability. *J. Climate*, 17:3728–3744.
- Santer, B.D., M.F. Wehner, T.M.L. Wigley, R. Sausen, G.A. Meehl, K.E. Taylor, C. Ammann, J. Arblaster, W.M. Washington, J.S. Boyle et W. Bruggemann, 2003: Contributions of anthropogenic and natural forcing to recent tropopause height changes. *Science*, 301(5632):479–483.
- Schwartz, M.D. (éd.), 2003: *Phenology: An Integrative Environmental Science*. Tasks for Vegetation Science, Vol. 39. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- Seidel, D.J. et M. Free, 2006: Measurement requirements for climate monitoring of upper-air temperature derived from reanalysis data. *J. Climate*, 19:854–871.
- Singleton, F. et E.A. Spackman, 1984: Climatological network design. *Meteorol. Mag.*, 113:77–89.

- Sneyers, R., 1973: Sur la densité optimale des réseaux météorologiques. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie Serie B*, 21:17–24.
- Soden, B.J. et I.M. Held, 2006: An assessment of climate feedbacks in coupled ocean–atmosphere models. *J. Climate*, 19:3354–3360.
- Système mondial d’observation de l’océan, 2000: *Report of the First GOOS Users’ Forum* (GOOS-No. 92). UNESCO, Paris.
- , 2001: *Principles of the Global Ocean Observing System (GOOS) Capacity Building* (GOOS-No. 69). UNESCO, Paris.
- , 2002: Stratégie de mise en œuvre pour le renforcement des capacités du Système mondial d’observation de l’océan (GOOS) (Rapport du GOOS-N° 106). UNESCO, Paris.
- Thompson, D.W.J. et J.M. Wallace, 2000: Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. *J. Climate*, 13:1000–1016.
- Thorne, P.W., D.E. Parker, J.R. Christy et C.A. Mears, 2005: Uncertainties in climate trends: Lessons from upper-air temperature records. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 86:1437–1444.
- Thorne, P.W., D.E. Parker, S.F.B. Tett, P.D. Jones, M. McCarthy, H. Coleman et P. Brohan, 2005: Revisiting radiosonde upper-air temperatures from 1958 to 2002. *J. Geophys. Res.*, 110 (D18):D18105.
- Unninayar, S. et R.A. Schiffer, 1997: *In-Situ Observations for the Global Observing Systems: A Compendium of Requirements and Systems*. Washington, DC, National Aeronautics and Space Administration Office of Mission to Planet Earth, NP-1997(01)-002-GSFC.
- Wang, J., D.J. Carlson, D.B. Parsons, T.F. Hock, D. Lauritsen, H.L. Cole, K. Beierle et E. Chamberlain, 2003: Performance of operational radiosonde humidity sensors in direct comparison with a chilled mirror dew-point hygrometer and its climate implication. *Geophys. Res. Lett.*, 30:10.1029/2003GL016985.
- Zhang, H.-M. et L.D. Talley, 1998: Heat and buoyancy budgets and mixing rates in the upper thermocline. *J. Phys. Oceanogr.*, 28:1961–1978.
-

CHAPITRE 3. GESTION DES DONNÉES CLIMATOLOGIQUES

3.1 INTRODUCTION

Depuis des millénaires, les historiens consignent des indications sur les conditions météorologiques dans leurs chroniques. Souvent, ce sont cependant des faits qui leur ont été relatés par d'autres et non pas des situations qu'ils ont observées en personne. Les récits ont donc pu être tronqués ou vagues et les descriptions affectées par les défaillances de la mémoire. Ce type d'indication sur le temps est enfoui au milieu d'un immense volume d'autres types d'information et se trouve la plupart du temps dans les bibliothèques et archives nationales. La constitution d'archives météorologiques nationales constitue en effet un phénomène relativement récent, les premières ayant été créées dans la première moitié du XX^e siècle.

Les premiers relevés manuscrits se présentaient sous la forme de recueils journaliers, hebdomadaires ou mensuels. On y consignait les phénomènes extrêmes ou catastrophiques, tels que les températures particulièrement élevées ou basses, les vitesses de vent anormales, les précipitations exceptionnelles et les sécheresses prolongées, les jours de gel, les ouragans et les tornades. Les livres de bord des navires faisaient état des tempêtes, des calmes, du vent, des courants, des types de nuages et de la nébulosité. Les dates de gel et de fonte des cours d'eau, des lacs et des mers, ainsi que les dates de la première et de la dernière chute de neige de la saison faisaient aussi partie des éléments importants ainsi consignés. Le goût du travail bien fait et le sentiment d'accomplissement ont toujours caractérisé l'observation météorologique et l'enregistrement des données. Encore de nos jours, c'est la personne chargée de réaliser une observation qui, en signant ou cachetant le registre et en donnant ainsi accès à la source de l'enregistrement, authentifie les relevés.

Des journaux consacrés spécialement à la collecte et à la conservation de l'information climatologique sont utilisés depuis deux ou trois siècles. Jusque dans les années 1940, les observations étaient presque toujours notées à la main et souvent sur des formulaires propres au pays. Depuis lors, et particulièrement à la suite de la création de l'OMM, les formulaires et procédures normalisés se sont peu à peu imposés et les archives météorologiques nationales ont été désignées comme centres d'archivage des relevés.

La quantification des données climatologiques a évolué sous l'effet de l'amélioration des instruments facilitant l'observation de variables continues ainsi que discrètes et l'enregistrement des valeurs dans des registres. Citons par exemple les thermomètres qui ont permis de mesurer de façon systématique la valeur de la température et les pluviomètres qui ont favorisé la mesure des précipitations. La mise au point de mécanismes à mouvement d'horlogerie a permis de relever et d'enregistrer des valeurs d'intensité et de durée. D'autres types d'instruments ont permis l'enregistrement automatique de données ou des relevés analogiques. Plus les outils de l'observation gagnaient en perfectionnement et en diversité, plus le nombre des éléments ou variables à noter dans les registres augmentait et il fallut mettre au point des formes de présentation spécialement pour tous ces types de données. Si les formes de présentation ont évolué, la régularité, la cohérence ou la continuité ont toujours été des qualités éminemment souhaitables en ce qui concerne la tenue des documents d'enregistrement des données. Un relevé chronologique de données, pour qu'il soit de qualité, doit être tenu à jour et se présenter dans un ordre séquentiel. Pour faciliter la collecte et l'archivage des données et l'utilisation ultérieure des relevés, il faut que l'observation et l'enregistrement soient exécutés avec soin et méthode.

Dans la plupart des pays, les formulaires remplis à la main étaient expédiés périodiquement à un centre. Jusqu'aux années 1970, les originaux de ces formulaires constituaient l'essentiel de toutes les données sur le climat en possession de la plupart des centres de collecte. Ces centres faisaient partie d'administrations locales ou nationales ou alors ils étaient rattachés à un office central d'un secteur d'activité tel l'exploitation minière, l'agriculture ou l'aviation. Peu à peu, les activités visant à rassembler les données sur les éléments du climat ayant une incidence sur la vie du pays furent

regroupées au sein d'un programme concerté d'observation et de collecte créé pour servir des intérêts nationaux et internationaux.

Depuis la fin du XX^e siècle, une grande partie de l'information sur les conditions météorologiques est transmise numériquement à des centres de collecte nationaux. Les messages étant destinés principalement à la prévision opérationnelle du temps, les centres climatologiques du monde entier se réfèrent généralement aux documents contenant les observations d'origine pour établir des relevés climatologiques. La collecte, la transmission, le traitement et le stockage des données météorologiques opérationnelles se sont cependant considérablement améliorés grâce aux progrès rapides de l'informatique. Aussi les archives météorologiques se remplissent-elles de plus en plus de données jamais notées sur papier. La puissance et la facilité d'utilisation des ordinateurs, la capacité d'enregistrer et de transmettre l'information de façon électronique et la mise au point de mécanismes d'échanges internationaux, notamment l'internet, fournissent aux climatologues de nouveaux moyens leur permettant d'améliorer rapidement leur compréhension du climat.

Tout devrait être mis en œuvre pour recueillir toutes les données primaires sous forme numérique électronique. La collecte électronique des données à la source permet un contrôle automatique et rapide des données, y compris la vérification des erreurs, avant même la transmission des données à partir de la station d'observation. Dans de nombreux cas, la collecte des données climatologiques par courrier postal peut encore se révéler meilleur marché et plus fiable, en particulier dans les régions les moins avancées du point de vue technologique, mais à moins que les données aient été enregistrées sur support électronique avant leur envoi par la poste, il faudra les scanner ou les numériser au centre de collecte. La gestion de la grande diversité des données recueillies à des fins météorologiques et climatologiques nécessite une approche visant à rassembler systématiquement les relevés sur papier et sur microformes et les relevés numériques.

3.2 **IMPORTANCE ET OBJET DE LA GESTION DES DONNÉES**

La gestion des données climatologiques a essentiellement pour but de récolter et de conserver les données et produits sur le climat, et à y donner accès pour que les planificateurs, les décideurs et les chercheurs puissent les utiliser. L'archivage permanent en est aussi un objectif important. Le système de gestion des données des archives climatologiques doit fournir l'information qui décrit le climat en fonction du domaine d'intérêt pour lequel les archives ont été créées, qu'elles soient nationales, régionales ou mondiales. Les données produites par des réseaux météorologiques et climatologiques ainsi que par divers programmes de recherche constituent une ressource utile et souvent unique, acquise au prix d'efforts considérables ayant nécessité beaucoup de temps et d'argent. Quand on planifie un programme d'acquisition de données, il est impossible d'entrevoir toutes les utilisations possibles de l'information sur le climat qui sera recueillie; il est fréquent que de nouvelles applications voient le jour longtemps après l'acquisition des données. L'utilisation initiale des données météorologiques et connexes n'est souvent que la première de toute une série d'applications. Les analyses de données réalisées ultérieurement à des fins nombreuses et variées ne cessent d'améliorer nettement le retour sur l'investissement que représentent les programmes d'acquisition de données. Notons à titre d'exemple que depuis que la question des changements climatiques préoccupe la planète, les besoins en données sur le climat et en systèmes de gestion de données n'ont plus aucune mesure par rapport à ceux qu'on avait pu prévoir au moment de la création des réseaux. Pour pouvoir satisfaire ces besoins grandissants, il est d'une importance capitale que la gestion de l'information climatologique, tant actuelle qu'historique, soit systématique et complète. Aux données météorologiques classiques viennent s'ajouter aujourd'hui des données provenant d'un large éventail d'instruments et de systèmes, y compris les satellites, les systèmes radar et d'autres dispositifs de télédétection; il est donc indispensable pour les centres climatologiques modernes de se doter de systèmes de gestion de données à la fois efficaces et exhaustifs.

3.3 GESTION DES DONNÉES CLIMATOLOGIQUES

Pour être le plus utiles possible, les données climatologiques doivent avoir été vérifiées, avoir subi un contrôle de qualité, être stockées dans des archives nationales ou un centre climatologique, et être rapidement accessibles sous des formes en permettant une utilisation aisée. Bien que les innovations technologiques se succèdent à un rythme soutenu, bon nombre de relevés climatologiques stockés par les SMHN se présentent encore sous une forme non numérique. Ces relevés doivent être gérés avec les relevés numériques dont le volume ne cesse de croître. Un système de gestion des données climatologiques (SGDC) est constitué d'un ensemble d'outils et de procédures qui permettent de stocker et de gérer correctement toutes les données qui présentent un intérêt pour les études sur le climat.

La gestion de bases de données vise avant tout à garantir à tout moment l'intégrité de la base gérée et à assurer que celle-ci contient toutes les données et métadonnées nécessaires à l'atteinte des objectifs fixés initialement, au moment présent et à l'avenir. Les systèmes de gestion de bases de données ont révolutionné la gestion des données climatologiques, car ils offrent un moyen efficace de stockage, d'accès, de conversion et de mise à jour pour un grand nombre de types de données et renforcent la sécurité des données.

Une étape majeure a été franchie dans le domaine de la gestion des bases de données climatologiques avec le lancement en 1985 du projet CLICOM (application de l'informatique à la climatologie) par le Programme mondial des données climatologiques et de surveillance du climat (PMDSC). Le projet a conduit à l'installation sur des ordinateurs personnels d'un logiciel de base de données climatologiques, dotant ainsi même les SMHN des plus petits pays de la capacité de gérer efficacement leurs relevés climatologiques. Il a également été à l'origine d'améliorations notoires des services, des applications et des activités de recherche en climatologie. À la fin des années 1990, le PMDSC a mis en place un projet de SGDC afin de tirer parti des toutes dernières technologies pour répondre aux besoins variés et évolutifs des Membres de l'OMM en matière de gestion de données. En dehors des progrès réalisés par les technologies de bases de données, telles que les bases de données relationnelles, les langages d'interrogation ou les liens avec des systèmes d'information géographique (SIG), la saisie de données est devenue plus efficace grâce à l'augmentation du nombre des SMA, à l'utilisation de carnets de notes électroniques, à l'internet et à d'autres technologies nouvelles encore.

Il est indispensable de tenir compte des besoins et des capacités des utilisateurs actuels et futurs, à la fois dans la mise au point de bases de données climatologiques et dans la mise en place de pratiques de gestion des données. Même si cela semble aller de soi, il arrive qu'on omette des données importantes pour une application utile ou que des centres de données consacrent trop peu de ressources au contrôle de la qualité des données pour lesquelles les utilisateurs exigent explicitement ou implicitement un degré élevé de qualité. Par exemple, une base de données qui ne contiendrait pas les codes météorologiques tant actuels qu'anciens pourrait donner lieu à des sous-estimations de la fréquence des phénomènes observés. Pour étudier toute nouvelle évolution, les gestionnaires de données devraient soit compter au moins un utilisateur clé dans leur équipe de projet, soit mettre en place des consultations régulières auprès du groupe d'utilisateurs, afin de se tenir au courant de l'évolution des besoins et de toute question préoccupant les utilisateurs. Les secteurs demandeurs sont notamment la prévision du climat, l'évolution du climat, l'agriculture, la santé, la gestion des catastrophes et des interventions en cas d'urgence, l'énergie, la gestion des ressources naturelles, l'aménagement urbain, la finance et l'assurance.

3.3.1 Conception d'un système de gestion des données climatologiques

Tous les SGDC reposent sur un modèle de données sous-jacent. La conception de ce modèle revêt une grande importance pour la qualité du système qui sera mis au point. Si le modèle n'est pas adapté, le système sera plus difficile à élaborer et à exploiter. En général, une base de données conçue pour des données météorologiques actuelles permettra une extraction rapide des données récentes d'un grand nombre de stations. En revanche, dans beaucoup d'applications

de données climatologiques, il s'agit surtout d'extraire les données d'une ou de quelques stations sur une longue durée. Il est essentiel de bien consigner l'ensemble de la démarche de conception du SGDC, y compris la description du modèle de données sous-jacent, pour faciliter la tâche des programmeurs en cas d'extension ou de modification ultérieure. Les préoccupations seront sensiblement les mêmes dans le cas d'un modèle de métadonnées. Des informations détaillées sur les modèles de données figurent dans la publication intitulée *Principes directeurs pour la gestion de données climatologiques* (OMM/DT-N° 1376).

Une fois qu'un système de gestion de données a été créé et qu'il est mis en service, il devrait être révisé régulièrement pour continuer à correspondre aux besoins des utilisateurs et des archivistes. Dans la figure 3.1, on décrit les relations et échanges entre les composantes fonctionnelles d'un système général de gestion de données.

Dans ce schéma opérationnel, les métadonnées ne sont pas encadrées, car elles sont issues de toutes les composantes du système de gestion des données. Par exemple, les indications portant sur les instruments et sur les conditions environnementales propres à l'emplacement doivent être recueillies à la station d'observation, tandis que les algorithmes et les méthodes doivent être décrits avec soin en ce qui concerne la phase du contrôle de qualité. Tous les renseignements au sujet des données et du traitement qu'elles ont subi constituent des métadonnées pour le système.

3.3.2 Acquisition des données d'un SGDC

Quand elles se présentent sous forme numérique, les données peuvent être directement intégrées dans le système. Dans le cas contraire, elles sont généralement numérisées au cours d'un processus de saisie. L'objectif fondamental du processus de saisie des données consiste à copier, avec un minimum d'erreurs, les données brutes telles qu'elles ont été recueillies initialement. Un système de saisie à touches doit permettre à l'opérateur de saisir les données aisément et avec efficacité. Le système peut aussi être conçu pour valider les données à mesure de leur saisie et détecter les erreurs éventuelles. Il est possible aussi de définir des valeurs par défaut pour certains éléments, ce qui évite des combinaisons de touches inutiles.

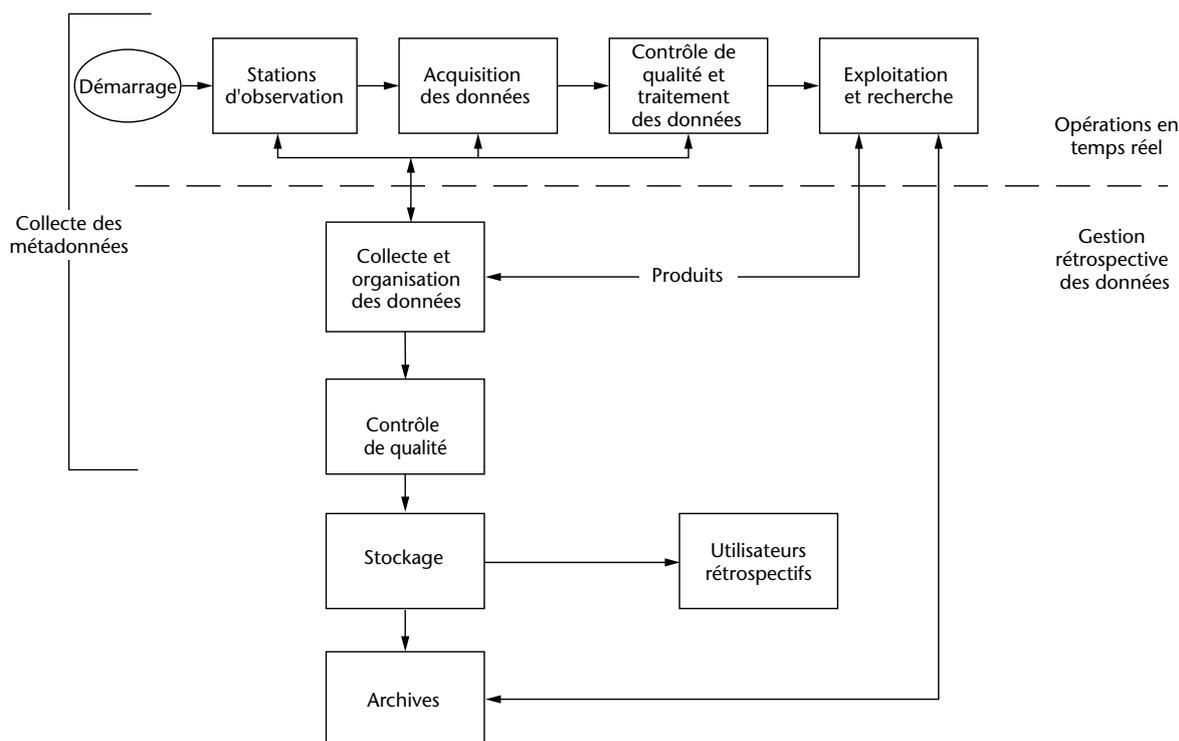


Figure 3.1. Système général de gestion de données

Quand elles proviennent de SMA, les données climatiques, y compris les messages d'erreur, sont normalement transmises par voie électronique aux SGDC. Les données issues d'observations manuelles devraient être transmises aux SGDC dans les plus brefs délais par le moyen le plus pratique. Il est avantageux de recueillir les données au moins une fois par jour, car leur qualité en sera probablement améliorée, le contrôle de qualité manuel demandera probablement moins d'effort, les erreurs techniques seront détectées plus rapidement et on aura plus de chances d'accéder à davantage de données dans de meilleures conditions. Néanmoins, quand cela se révèle impossible, un envoi mensuel demeure une solution acceptable. À titre d'exemple, parmi les quelque 6 000 observateurs bénévoles australiens, beaucoup continuent d'envoyer chaque mois un compte rendu mensuel des précipitations qui contient les résultats de leurs observations quotidiennes du mois écoulé.

Beaucoup d'observations météorologiques sont enregistrées par d'autres institutions ou organismes que les SMHN, ce qui peut rendre difficile l'acquisition des données sous leur forme initiale. Il faut alors s'efforcer d'obtenir des copies des formulaires de messages d'origine. S'il est impossible d'obtenir soit l'original soit une copie des relevés, il y a lieu de l'indiquer dans l'inventaire des données du centre en y indiquant l'existence des données en question, le lieu où se trouvent les données, le volume des données disponibles, la période couverte par les relevés, les stations appartenant au réseau, le cas échéant, et les éléments observés.

Bien que cela ne soit pas obligatoire, il est recommandé que, outre les données et métadonnées traditionnelles, les SGDC contiennent aussi des informations diffusées par les médias, photos, etc. Il est possible d'enregistrer ce type d'information sous forme d'image numérique tirée d'un article de presse, à l'aide d'un appareil photo numérique ou d'un scanner, avec l'indication de la date, de la région et du type de phénomène (crue, sécheresse, fortes précipitations, etc.), le nom du média et quelques commentaires complémentaires sur le phénomène.

Il importe de conserver la valeur d'une donnée initialement reçue ainsi que la dernière valeur découlant du contrôle de qualité. La valeur d'origine sera probablement soumise à un premier processus de contrôle de qualité automatique au moment de la saisie, puis, au besoin, à un autre processus de contrôle de qualité plus poussé. Même quand elle est rejetée par l'un ou l'autre de ces processus, il faut la conserver. Certains SGDC conservent non seulement la valeur initiale et la dernière correction, mais aussi toutes les modifications subies.

L'enregistrement du fait que des données attendues n'aient pas été reçues fait aussi partie de l'acquisition des données. Les données se perdent par exemple en cas de panne d'instrument, d'erreur de transmission de données ou d'erreur de traitement à l'acquisition. Il est possible de reconstruire les données perdues avec différents degrés de certitude. Quand une valeur quantitative des précipitations est manquante par exemple et qu'on sait grâce à d'autres données qu'il ne pouvait se produire de précipitations compte tenu des conditions locales et synoptiques, on peut alors considérer que la valeur à enregistrer est zéro. Dans d'autres cas, il est possible d'estimer les données perdues avec un degré de certitude acceptable à l'aide des techniques examinées à la section 5.9. Dans tous les cas, les données obtenues par reconstruction ou par estimation devraient être indiquées explicitement dans la documentation portant sur le jeu de données concerné (voir la section 3.4.1).

3.3.3 **Documentation sur les données d'un SGDC**

Il faut disposer d'un ensemble approprié de métadonnées pour informer les utilisateurs futurs de la nature des données que contient le système, de la manière dont les différents jeux de données ont été constitués et de tous les problèmes intrinsèques. Concernant la gestion des bases de données, il est recommandé d'inclure des renseignements sur tout ce qui peut avoir une incidence sur l'homogénéité d'un jeu ou d'une série de données, y compris les facteurs décrits dans la section 2.6.9.

Dans un système idéal, la structure des métadonnées serait généralement plus complexe que celle des données. Prenons par exemple le cas de l'observation de la pluie. La donnée recueillie fournit

essentiellement la hauteur des précipitations pour une période donnée en un lieu précis, celui de la station. À cette donnée, il est possible d'associer diverses métadonnées s'appliquant à l'observation et pouvant présenter un intérêt pour obtenir une interprétation complète de la donnée recueillie, à savoir notamment: la date de référence utilisée par la base de données (Temps universel (TU) ou fuseau horaire, par exemple); des indicateurs de qualité attribués à l'observation; l'historique des modifications apportées à la valeur et tout autre indicateur associé; le nom de l'instrument de mesure utilisé, avec des détails sur son programme de maintenance, ses tolérances, ses paramètres internes et toute autre indication appropriée; le nom de l'observateur et les renseignements utiles pour pouvoir le joindre; toutes les précisions voulues sur l'emplacement et l'exposition de la station et sur son historique; le programme d'observation en vigueur et son historique; et des informations détaillées sur la topographie et la couverture du sol. Le traitement des métadonnées spécifiques à chaque station est décrit en détail dans la publication intitulée *Guidelines on Climate Metadata and Homogenization* (WMO/TD-No. 1186). Prenons pour autre exemple un jeu de données aux points de grille provenant d'observations à haute résolution du rayonnement solaire par satellites. Les métadonnées qu'il convient d'y associer comprendraient les indications suivantes: l'étendue géographique des observations, la période sur laquelle portent les relevés composant le jeu de données, l'historique des révisions apportées au jeu de données et de sa maintenance, les satellites qui ont fourni les données, les fonctions de transfert et les méthodes de calcul des moyennes ayant servi à obtenir les valeurs aux points de grille, la précision du positionnement des satellites, des informations sur l'exactitude des données et les coordonnées d'un correspondant.

Les métadonnées doivent aussi porter sur le SGDC même. Tous les processus propres au système devraient être décrits de façon exhaustive (caractéristiques de la saisie, du contrôle de qualité, etc.). L'historique de toutes les modifications apportées à tous les éléments du système (logiciel, matériel, procédures manuelles, etc.) devrait y figurer et être tenu à jour. Étant donné que les pratiques d'observation, les techniques de contrôle de qualité et les procédures de manipulation des données évoluent, ce type de métadonnées est essentiel pour l'analyse climatologique des données chronologiques. L'analyste se sert des métadonnées pour déterminer et comprendre comment une valeur a été obtenue et traitée, afin d'extraire des relevés uniquement la signature météorologique, sans les éventuelles influences non météorologiques qu'ils intègrent.

L'inventaire des données que contient un SGDC constitue aussi une catégorie de métadonnées et il convient de le mettre à jour régulièrement. Une stratification par type de donnée, par élément, par emplacement de station ou par heure peut être réalisée. Il convient de dresser et de tenir à jour une liste du contenu comprenant une description et une définition des données dans chaque fichier, ainsi que des indications sur les codes et les pratiques d'observation employés. Il importe de savoir ce que contient un SGDC pour pouvoir en extraire efficacement de l'information. Il y a lieu d'utiliser le profil de base OMM des séries de données et de métadonnées aux normes ISO 19100, à moins que d'autres normes sur les métadonnées relatives à la climatologie soient publiées pour les remplacer.

3.3.4 **Stockage des données d'un SGDC**

L'une des principales fonctions du gestionnaire de données consiste à évaluer les besoins en stockage de données ainsi que leur évolution. Il doit tenir compte des informations complémentaires à inclure dans les relevés de données (indicateurs de contrôle de qualité, messages d'origine ou date/heure de mise à jour des relevés, par exemple), des besoins en métadonnées et de toute redondance nécessaire pour que les bases de données puissent être correctement récupérées. Certains types de données (telles que les données de télédétection, les données océanographiques ou les données de SMA de grande résolution temporelle) représentent des volumes importants à stocker. Pour certaines formes de données nouvelles (comme l'humidité du sol, les observations phénologiques ou les indices de végétation), les besoins en stockage peuvent varier par rapport aux données issues d'observations plus traditionnelles. Les SMA fournissent souvent des données portant sur la qualité des observations, qui ne sont pas des données climatologiques proprement dites (par exemple, indication de la tension des batteries de la SMA). En règle générale, les renseignements de ce type devraient être

utilisés avant l'archivage des données; si elles ne figurent pas dans le SGDC, il convient de les conserver de façon permanente dans un autre lieu en veillant qu'elles demeurent à la disposition des gestionnaires de données. Le processus de contrôle de qualité engendre souvent des valeurs et des informations pouvant différer des données initiales; aussi faut-il prévoir suffisamment d'espace de stockage à la fois pour les données d'origine et pour les données découlant du contrôle de qualité. Il peut se révéler très difficile d'évaluer les besoins futurs, notamment car il est compliqué de déterminer les types de données dont on pourra disposer à l'avenir en fonction des progrès technologiques. Il appartient aux gestionnaires de données de prendre en compte tous ces facteurs pour déterminer les besoins en stockage.

Tous les relevés autres que numériques devraient être stockés de manière à éviter autant que possible qu'ils se détériorent. Ils devraient être conservés dans un milieu contrôlé pour éviter les destructions potentielles causées par les extrêmes de température et d'humidité, les insectes, les parasites, les incendies, les inondations, les accidents ou les actes de vandalisme. Le mieux consiste à les stocker dans des boîtes sans acide, dans des salles climatisées et sécurisées réservées à cet effet. Il faudrait aussi mettre en place un programme de maintenance pour le sauvetage des documents qui se détériorent et en particulier des données qu'ils contiennent.

Comme la quantité de données produites et conservées ne cesse d'augmenter, il est normal de se demander si l'on doit ou non continuer de stocker tous les relevés sous leur forme manuscrite d'origine. Bien trop souvent, les relevés climatologiques sont conservés en sous-sol, dans des abris ou dans d'autres lieux peu adaptés. Souvent aussi ils ne sont pas inventoriés dans un catalogue, les données pouvant être inaccessibles, voire soumises à la détérioration. Afin de diminuer les achats de papier, de mieux utiliser l'espace et de sécuriser le contenu des documents d'origine, il est recommandé de numériser les données manuscrites pour pouvoir dûment les conserver sous la forme de fichiers numériques. Les images numériques des relevés sur papier peuvent certes être stockées ainsi, mais l'informatique permet aussi d'utiliser les données qu'elles contiennent par extraction à l'aide de logiciels de reconnaissance de caractères. Les caractéristiques des ordinateurs nécessaires au stockage et à l'extraction des documents sont fonction des besoins en données, des ressources financières disponibles et aussi des progrès technologiques. Il n'y a donc pas de normes mondiales en la matière et on ne peut recommander un support de stockage plutôt qu'un autre. Il importe de ne pas oublier qu'aucun support de stockage ne dispose d'une durée de vie illimitée et qu'il faut donc revoir régulièrement les dispositions en matière d'archivage. Il faut prendre des mesures pour garantir une sauvegarde régulière des archives informatiques, une copie au moins des données étant stockée ailleurs que dans les archives principales.

On entend par microforme, un document sur support microphotographique, et donc réduit à une très petite fraction de sa taille d'origine. Il existe différents formats de microformes, à savoir essentiellement des microfilms ou des microfiches se présentant sur différents supports: bobines, jaquettes, folios, cartes à fenêtre, cartouches ou cassettes. Cependant, compte tenu des progrès importants accomplis en matière de stockage numérique, il est préférable à présent de numériser directement les documents sur papier, mais aussi les images sur microformes périmées, à l'aide d'un scanner ou d'un appareil photo numérique. Le processus facilite l'accès aux données et en garantit la préservation pour les générations futures.

3.3.5 **Accès aux données et extraction des données d'un SGDC**

La puissance des fonctions d'extraction et d'analyse des données est l'un des aspects importants des SGDC. Pour répondre aux besoins d'extraction de données de la majorité des utilisateurs, il suffira d'une interface graphique. Une interface en ligne de commande devrait être réservée au petit nombre d'utilisateurs plus avertis qui ont besoin d'exécuter des extractions sortant de l'ordinaire. Les utilisateurs devraient avoir la possibilité de spécifier leurs propres critères d'extraction; la documentation du système devrait être explicite et fournir tous les renseignements dont les utilisateurs ont besoin.

Le système doit proposer un large éventail d'options pour personnaliser les résultats des extractions, notamment en ce qui concerne les stations, les horaires et les détails de présentation. L'accès devrait être ainsi donné à des listes de données, des résumés tabulaires, des analyses statistiques et des présentations graphiques.

3.3.6 **Archives d'un SGDC**

Les archives constituent la partie du SGDC destinée à la conservation des données et des métadonnées. Quelle soit simple ou complexe, physique ou électronique, la structure des archives est fonction de différents facteurs: les ressources financières disponibles, le degré de qualification des archivistes, le volume des données à archiver, le support des données (documents papier ou forme numérique), la facilité d'introduire des données dans les archives puis d'en extraire l'information requise, le caractère convivial de l'accès à l'information, la facilité de maintenance des archives et la facilité d'augmenter le volume des archives au fur et à mesure que les données affluent. Il convient d'archiver tous les éléments constituant le SGDC, c'est-à-dire, outre les valeurs elles-mêmes, les catalogues, les inventaires, les historiques, les dictionnaires et d'autres informations analogues.

3.3.7 **Sécurité d'un SGDC**

Les principes de sécurité applicables et les activités qui s'y rattachent ont pour principal objectif d'éviter la perte ou la détérioration du SGDC. Pour ce faire, les conditions à remplir sont les suivantes:

- a) L'ensemble du personnel doit avoir connaissance de ses responsabilités professionnelles;
- b) Les archives et l'environnement des bases de données doivent être sécurisés et protégés contre des facteurs physiques tels que des incendies ou un excès d'humidité;
- c) Pour les données numériques, il y a lieu de protéger la base de données et ses composantes au niveau de l'utilisateur. Seul un petit groupe de personnes agréées devrait avoir le droit de manipuler les données (insertion, mise à jour ou suppression);
- d) Les personnes ayant un accès en écriture à la base de données doivent s'engager à ne procéder à aucune transaction en dehors des opérations et pratiques approuvées par le gestionnaire de données;
- e) Tout changement apporté aux tables de données doit faire l'objet d'une piste d'audit dont l'accès doit être réglementé;
- f) Certains principes de sécurité doivent s'appliquer aux mots de passe – il ne faut ni les communiquer, ni les noter sur papier, ils doivent être changés régulièrement, ils doivent être composés de lettres, chiffres et caractères n'ayant apparemment aucun lien entre eux;
- g) Tous les services annexes devraient être désactivés sur l'ordinateur donnant accès à la base de données;
- h) La base de données doit être protégée contre les virus et les actes de piratage;
- i) Il importe d'exécuter fréquemment des sauvegardes, car, en cas de panne de l'ordinateur, tout le travail réalisé depuis la dernière sauvegarde sera probablement perdu et il faudra le recommencer. En principe, des sauvegardes incrémentielles devraient être effectuées tous les jours et des sauvegardes complètes, une fois par semaine;
- j) Il y a lieu aussi d'exécuter de façon moins fréquente (généralement une fois par mois) une sauvegarde complète des tables de données qui sera placée en un lieu sûr et protégé contre les incendies, différent du lieu où se trouve physiquement la base de données climatologiques. Il est courant de disposer de trois exemplaires des mêmes archives dans trois lieux sûrs différents, si possible dans des villes différentes;
- k) Avant toute modification du logiciel du SGDC, de sa structure ou des applications qu'il contient, il faut exécuter une sauvegarde du système.

3.3.8 Gestion d'un SGDC

Un SGDC doit être soumis à un contrôle régulier, destiné à vérifier dans quelle mesure les processus d'exploitation de la base de données remplissent leur rôle. Ces processus comprennent notamment la maintenance des métadonnées, l'entrée de données dans la base, les mesures de contrôle de qualité qui modifient la base et l'extraction de l'information. Il convient de contrôler chaque processus, de l'analyser et de l'améliorer au besoin. Il est vivement recommandé aux gestionnaires des données de bien considérer la gestion des données de bout en bout et de communiquer, aux responsables des observations, l'information au sujet des problèmes systémiques relatifs à la qualité des données, des pertes de données ou encore des pratiques ayant un effet néfaste sur les relevés climatologiques, pour que ces derniers puissent y remédier.

Dans les rapports de surveillance figurent généralement le numéro et le type de la station inscrits dans la base de données, ainsi que la quantité de données de la base, répartie par station et par type d'élément d'observation, et les indications de données manquantes. Ces indications peuvent être comparées aux horaires d'observation pour déterminer quand et où les données sont perdues. D'autres rapports pourront examiner les mesures de contrôle de qualité à mettre en œuvre pour veiller à ce que ce contrôle soit bien en phase avec le flux de nouvelles données et pour recenser tout ensemble de données caractérisé par un excès de problèmes de qualité. Il est utile de garder une trace de la quantité et de l'étendue des données extraites suite à des requêtes d'utilisateurs, car on sait ainsi quels sont les jeux de données les plus importants et on a une idée des domaines à développer à l'avenir.

La fréquence ainsi que la période d'établissement des rapports de surveillance sont fonction des besoins du SMHN. S'agissant de l'assimilation des données, des rapports pourraient être produits automatiquement chaque jour. Les rapports mensuels sur la quantité et la qualité des données correspondent en général au cycle de beaucoup de produits climatologiques établis suivant les mois du calendrier.

3.3.9 Normes et directives internationales relatives aux SGDC

On ne peut parler de structure optimale commune aux bases de données climatologiques étant donné que chaque système est conçu en fonction des besoins spécifiques d'un SMHN et de ses partenaires. Dans un cas, on favorisera l'accès à toutes les données pour un élément précis dans une région donnée et à une certaine heure, dans un autre, ce sera davantage l'accès aux séries chronologiques pour le même élément et un lieu précis qui sera préférable. Les besoins particuliers auront une incidence forte sur les besoins en matière d'espace de stockage ou de temps de réaction pour charger des données ou pour y avoir accès. Les principes généraux qui suivent s'appliquent cependant à l'ensemble des bases de données climatologiques:

- a) Documentation à l'intention de l'utilisateur: Il convient de disposer de manuels offrant une vue d'ensemble du système et des guides d'installation et spécifiques pour les utilisateurs, les administrateurs du système et les programmeurs;
- b) Saisie des données: Les formulaires de saisie de données doivent revêtir à l'écran la même présentation que les formulaires sur papier à partir desquels les données sont copiées; il devrait être possible de personnaliser la présentation de ces formulaires; les procédures de saisie des données dans la base devraient correspondre aux besoins du SMHN; les données devraient être validées automatiquement (valeurs acceptables ou indicatifs de stations, par exemple) au cours du processus de saisie; et les valeurs par défaut devraient être saisies automatiquement;
- c) Assimilation des données numériques: Le système doit pouvoir assimiler automatiquement les données au format standard qui sont transmises par l'intermédiaire du Système mondial de télécommunications (SMT), les fichiers contenant les données de plusieurs stations, les fichiers multiples contenant les données d'une station, les données provenant des SMA, les données présentées suivant des formats définis par les utilisateurs, les données CLICOM et les métadonnées;

- d) Validation et contrôle de qualité: Le système doit comporter une série d'indicateurs pour les éléments suivants: la source des données, le type de contrôle de qualité subi (notamment au cours du processus de saisie ou du traitement en fin de mois), les résultats du contrôle de qualité et la raison justifiant la décision d'accepter ou de rejeter une valeur ou de fournir une valeur estimative. Il doit conserver les valeurs initiales, estimées et modifiées; il doit aussi vérifier la cohérence spatiale et temporelle des données pour en accepter la valeur, la cohérence météorologique et la cohérence physique;
- e) Documentation technique: La liste définissant chaque table et les relations entre les tables doit être dressée; les conventions de désignation doivent être cohérentes pour l'ensemble des tables, des index, des entités et des vues;
- f) Accès aux données: L'interface entre l'utilisateur et la base de données doit être facile à utiliser; elle doit fournir à l'utilisateur des indications explicites et des exemples au sujet des procédures d'extraction de l'information dont il a besoin;
- g) Métadonnées: Le système doit pouvoir assimiler tout l'éventail possible des métadonnées (voir la description de la section 2.6.9);
- h) Produits élaborés: Les SGDC doivent pouvoir élaborer des produits standard qui répondent aux besoins des SMHN, notamment des listes de données et des tables de données horaires, journalières, mensuelles, voire pour des périodes plus longues; des résumés statistiques; et des graphiques descriptifs, notamment des analyses d'isohypses, des roses des vents, des séries chronologiques, des sondages en altitude et des modèles de pointage;
- i) Administration des données et du système: On doit pouvoir réaliser régulièrement et à la demande une sauvegarde du système sans avoir à interrompre son fonctionnement; pouvoir restaurer rapidement le système en cas de besoin; le système doit pouvoir enregistrer les transactions individuelles; il doit pouvoir assurer sa propre protection; on doit pouvoir en surveiller les performances (par exemple l'utilisation de la mémoire, l'espace de stockage disponible, le nombre des transactions et l'état des journaux système); on doit pouvoir en effectuer régulièrement une copie en un lieu distinct;
- j) Niveau d'assistance: Les utilisateurs doivent pouvoir résoudre les problèmes à l'aide de la documentation fournie, communiquer avec d'autres utilisateurs pour échanger questions et remarques, et obtenir rapidement au besoin des conseils auprès des concepteurs du système;
- k) Souplesse: Le système doit pouvoir être élargi et modifié au fur et à mesure que les technologies progressent s'agissant du matériel et des logiciels, que les sources de données changent et que les besoins en produits évoluent.

3.4 **CONTRÔLE DE QUALITÉ**

Le contrôle de qualité a pour objectif de vérifier si une donnée transmise est bien représentative de ce qui devait être mesuré et qu'elle n'a pas été contaminée par des facteurs indépendants. Il importe donc d'établir clairement, dès le départ, ce que les relevés d'une série de données particulière sont censés représenter. Les données ne sont jugées satisfaisantes à des fins d'archivage permanent qu'une fois qu'elles ont subi un contrôle de qualité approprié.

Le contrôle de qualité relève aussi de la responsabilité de l'observateur ou du système automatique d'observation qui doit vérifier que l'heure et l'indicatif de la station sont corrects, que les valeurs enregistrées correspondent bien aux conditions présentes et qu'il y a cohérence entre les différents éléments observés. Toutes ces vérifications sont effectuées avant l'enregistrement ou la transmission des données d'observation.

Les données d'observation reçues sont également soumises à un contrôle de qualité au centre d'archivage. Quand les documents sources sont des relevés manuscrits, des membres du personnel qualifiés inspectent les données avant qu'elles soient numérisées. Il convient d'examiner les formulaires pour vérifier que les relevés sont bien identifiés (par exemple nom, indicatif et emplacement de la station), qu'ils sont lisibles et qu'ils ont bien été transcrits (par exemple avec la bonne précision et dans les bonnes colonnes). Si une erreur est détectée, il faut communiquer avec la station d'observation pour obtenir une explication ou pour corriger le problème. Si, par manque de ressources, il est impossible de réaliser le contrôle de qualité de toutes les données, il faut accorder la priorité aux éléments climatiques les plus importants.

3.4.1 Procédures du contrôle de qualité

Quand les données d'observation se présentent sous forme numérique, le centre d'archivage devrait les soumettre de façon régulière et systématique à un contrôle de qualité complet et approfondi. Un programme informatique parviendra à examiner toutes les données et à établir la liste de celles qui échouent à une série bien définie de tests, sans pouvoir cependant bien déterminer les problèmes sous-jacents. En revanche, un analyste compétent réussira souvent à déceler la cause des erreurs et à définir les corrections qu'il convient d'appliquer, mais sera dépassé par la vaste quantité des données à traiter. La meilleure technique consiste à combiner les deux méthodes: un ordinateur établit la liste des erreurs éventuelles qu'un analyste examine pour déterminer les mesures à prendre.

Les techniques statistiques (décrites dans les chapitres 4 et 5) sont d'une grande utilité pour détecter les erreurs et, dans certains cas, pour proposer ce que devrait être la «bonne» valeur. Pour valider de grandes quantités de données, il est essentiel de mettre en place un filtrage objectif et automatisé. Une vérification manuelle du résultat du filtrage devra cependant être effectuée pour s'assurer que les procédures automatiques fonctionnent comme prévu. L'affichage des données sur des cartes ou des graphiques ou encore des résumés de données se révèlent particulièrement utiles pour faciliter l'examen visuel. Les techniques statistiques intègrent et assimilent de grandes quantités de données et font apparaître des schémas dont un analyste qualifié se servira pour évaluer la vraisemblance physique, pour déceler les valeurs aberrantes, pour signaler les données suspectes et pour évaluer les performances des procédures automatiques.

Un indicateur approprié devrait être attribué à chaque observation. Il y a lieu d'introduire dans la base de données les corrections ou les données estimées correctes et y conserver aussi les données initiales. Une fois que la qualité des données a été contrôlée et que les corrections et modifications voulues ont été apportées, il convient de soumettre encore une fois le jeu de données obtenu au cycle des vérifications du contrôle de qualité. Cette dernière étape permet de garantir que des erreurs n'ont pas été introduites au cours des procédures du contrôle de la qualité. La vérification manuelle doit permettre aussi de déceler des schémas d'erreurs pouvant résulter d'erreurs logicielles, d'une mauvaise application des instructions ou des procédures ou encore de procédures ou instructions inappropriées, etc. Il convient de communiquer les schémas en question aux responsables du programme d'observation du SMHN.

Une base de données donne en général accès à une même donnée à différents stades du contrôle de qualité. La donnée initiale, telle qu'elle a été reçue dans la base, doit être conservée, mais les processus de validation entraînent souvent des modifications de cette donnée. Des indicateurs de qualité permettent de signaler ces différents stades. Il serait possible d'en utiliser une multitude, mais il vaut mieux se servir du nombre minimum suffisant pour décrire l'évaluation de la qualité et la fiabilité des données brutes ou des valeurs estimées.

Pour répondre à la plupart des besoins, il suffit d'un code à deux chiffres pour l'indicateur de qualité: un chiffre pour le type des données et l'autre pour le stade de la validation. Quand les données proviennent de plusieurs sources, un troisième chiffre correspondant à la source se révèle souvent utile. Les tableaux 3.1, 3.2 et 3.3 fournissent des exemples de «types de données», de «stades de validation» et de «méthodes d'acquisition».

Tableau 3.1. Exemple de code pour les indicateurs de types de données

<i>Type de données (chiffre du code)</i>	<i>Signification</i>
0	Donnée initiale
1	Donnée corrigée
2	Donnée reconstruite (notamment par interpolation, estimation ou désagrégation)
3	Valeur calculée

Tableau 3.2. Exemple de code pour les indicateurs de stades de validation

<i>Stade de validation (chiffre du code)</i>	<i>Signification</i>
1	Donnée manquante (la donnée n'a pas été reçue ou l'observation n'a pas été effectuée)
2	Donnée éliminée une fois le contrôle de qualité terminé
3	Donnée non vérifiée (donnée venant d'être introduite ou donnée historique n'étant soumise à aucun contrôle de qualité)
4	Donnée déclarée douteuse, car signalée comme donnée aberrante par les vérifications préliminaires, en attente d'un contrôle plus poussé (possibilité d'erreur)
5	Donnée déclarée douteuse après le contrôle automatique ou la vérification manuelle (probabilité d'erreur)
6	Donnée déclarée validée après le contrôle automatique ou la vérification manuelle (mais une modification ultérieure reste possible, par exemple si une étude révèle que la donnée peut être améliorée)
7	Donnée validée après le contrôle automatique et la vérification manuelle, et aucune modification ultérieure possible

Tableau 3.3. Exemple de code pour les indicateurs de méthodes d'acquisition

<i>Méthode d'acquisition (chiffre du code)</i>	<i>Signification</i>
1	Système mondial de télécommunications
2	Saisie
3	Réseau de télécommunications des stations météorologiques automatiques
4	Fichier numérique d'une station météorologique automatique
5	Relevé manuscrit

3.4.2 Documentation sur le contrôle de qualité

Il convient de décrire précisément les procédures et algorithmes du contrôle de qualité appliqués à chaque stade du traitement des données, de l'observation à l'archivage. Toutes les vérifications effectuées nécessitent une documentation: celles exécutées par l'observateur, la validation initiale au centre de collecte, la validation finale, le contrôle de qualité après modification des formes de présentation pour les besoins de l'archivage ou de la publication, ou encore les vérifications portant sur les résumés de données.

Les utilisateurs des données devraient avoir accès aux relevés détaillés ainsi qu'à la documentation. La connaissance des procédures de traitement et de contrôle de qualité des données leur permet en effet d'évaluer la validité des observations. Grâce à la documentation appropriée et aux données d'origine conservées dans la base, les futurs utilisateurs pourront évaluer l'incidence des modifications de procédures sur la validité, la continuité ou l'homogénéité des relevés, appliquer de nouvelles connaissances en sciences de l'atmosphère aux anciennes données, voire valider à nouveau les données en fonction de nouvelles techniques et découvertes.

3.4.3 Types d'erreur

Les erreurs portant sur les métadonnées se traduisent souvent par des erreurs de données. Par exemple, si l'indicatif de la station est inexact, on pourra comprendre que la donnée provient

d'un autre endroit, ou si la date est incorrecte, on pourra penser que la donnée provient d'une observation exécutée à une heure différente. Les tests de complétude des données feront apparaître les données manquantes pour un lieu et une heure en particulier, tandis que les tests de cohérence et de dispersion permettront de déceler les données attribuées de façon inexacte à un lieu et à une heure donnés.

Les erreurs de données découlent principalement d'erreurs instrumentales, d'erreurs commises par l'observateur, d'erreurs de transmission, d'erreurs de saisie, d'erreurs de validation, ainsi que de modifications de formes de présentation et de problèmes de réduction des données. Pour établir un ensemble de procédures de contrôle de qualité, il convient de prendre en compte tous les types possibles d'erreurs, leurs sources et leurs causes, et de s'efforcer de les réduire. En ce qui concerne la mise au point de procédures automatiques ou semi-automatiques visant à attribuer des indicateurs d'erreurs aux données, il est recommandé aux concepteurs de travailler en étroite collaboration avec le personnel du contrôle de qualité opérationnel.

3.4.4 Tests des formes de présentation

Il y a lieu de vérifier les répétitions d'observations ou l'utilisation fautive de formes de présentation, notamment des caractères alphanumériques dans un champ numérique, des champs insérés par erreur ou des champs vides dans une observation, des codes d'identification impossibles et des dates impossibles. Les erreurs de forme de présentation peuvent être causées par une erreur de saisie, par la dégradation du signal de transmission d'un message ou par une erreur faite par un opérateur.

Il convient de mettre en place des procédures visant à éliminer et au moins à réduire les erreurs de forme de présentation. Deux méthodes sont couramment employées pour réduire les erreurs de saisie, à savoir la double saisie (la même donnée étant saisie indépendamment par deux opérateurs) et les algorithmes de détection d'erreur. Ce sera en fonction de la compétence du personnel chargé de la saisie, de la complexité des observations et des ressources disponibles qu'on utilisera l'une de préférence à l'autre. Il convient d'utiliser des techniques numériques de détection et de correction des erreurs pour éliminer ou au moins déceler les erreurs de transmission. C'est en soignant la conception des systèmes de saisie que l'on peut réduire le plus possible les erreurs émanant des opérateurs; cela étant, quel que soit le degré de convivialité du système utilisé, il demeure nécessaire de bien former les opérateurs et d'exécuter des vérifications de performance.

3.4.5 Tests de complétude

Quand des données sont manquantes, cela peut avoir une importance cruciale suivant le type d'élément observé. Dans le cas d'extrêmes mensuels ou de données portant sur des phénomènes, tel le nombre de jours où la hauteur des précipitations est supérieure à un certain seuil, le fait que des données quotidiennes soient manquantes introduit une incertitude non négligeable sur les valeurs enregistrées. Des hauteurs totales mensuelles de pluie peuvent être fortement mises en doute s'il manque quelques jours de données, en particulier si cela correspond à une période de pluie. L'incidence de données manquantes sera moindre cependant sur la valeur de la température moyenne mensuelle que dans les deux exemples cités précédemment. Pour certaines applications, il est absolument nécessaire que les données soient complètes.

Il convient de classer les données par type d'observation dans un ordre chronologique prédéterminé, par station. L'inventaire des données devrait être comparé à un fichier principal des indicatifs de stations. Il y a lieu de comparer aussi les observations reçues avec les observations que l'on prévoit de recevoir. L'absence de toute observation prévue doit être indiquée pour examen ultérieur.

3.4.6 Tests de cohérence

Pour ce type d'épreuve de validité, on distingue quatre sortes de cohérence: la cohérence interne, la cohérence temporelle, la cohérence spatiale et la cohérence des résumés de données. Des relations dans le temps et l'espace pouvant être établies entre les différentes valeurs, il y a lieu de mettre au point une procédure intégrée pour examiner leur cohérence. Par ailleurs, il convient d'établir une documentation complète sur les tests de cohérence, mentionnant les procédures, les formules et les critères de décision.

La cohérence interne se fonde sur des relations physiques entre les éléments climatologiques. Il convient de vérifier avec soin tous les éléments par rapport aux éléments associés d'une même observation. Par exemple, il faut contrôler les données psychrométriques pour s'assurer que la température du thermomètre sec est égale ou supérieure à la température du thermomètre mouillé. De même, il faut vérifier la vraisemblance de la relation entre la visibilité et le temps présent pour s'assurer que les pratiques normalisées d'observation sont bien appliquées.

Il convient de vérifier aussi que les données correspondent bien à leur définition. Par exemple, la valeur maximale doit être égale ou supérieure à la valeur minimale. D'autres vérifications de cohérence interne se fondent sur des limites physiques. La durée d'insolation par exemple se limite à la durée de la journée, le rayonnement global ne peut être plus grand que l'éclairement énergétique au sommet de l'atmosphère, la direction du vent doit se situer entre 0° et 360° et les hauteurs de précipitations ne peuvent être négatives.

La cohérence temporelle vérifie la variation d'un élément dans le temps. Beaucoup de jeux de données climatologiques se distinguent par une autocorrélation importante. On peut donc vérifier les relevés en les comparant aux observations précédentes et suivantes. En se fondant sur leur expérience ou sur des méthodes analytiques ou statistiques, les vérificateurs peuvent déterminer les variations auxquelles on peut s'attendre pour un élément donné sur une période quelconque. La variation est généralement fonction de l'élément, de la saison, du lieu et de l'intervalle de temps écoulé entre deux observations successives. On pourra par exemple mettre en doute une baisse de la température de 10 °C en une heure, bien que cela soit fort réaliste dans le cas du passage d'un front froid ou de l'apparition d'une brise de mer. Il faudra alors comparer la valeur douteuse au temps présent voire à d'autres types d'observations (la direction du vent, des données de satellites ou des données radar, ou encore des données sur la détection de la foudre) avant de prendre la décision de la valider ou de la modifier. Pour certains éléments, une absence de variation peut indiquer une erreur. Une série de vitesses du vent identiques peut par exemple indiquer un problème d'anémomètre.

Il est relativement aisé d'automatiser les tests de cohérence temporelle. Dans la section 5.5 sont décrites des techniques d'analyse de séries chronologiques qu'il est possible d'adapter pour les besoins du contrôle de qualité. La représentation graphique des données est aussi un excellent moyen de vérification. Plusieurs éléments devraient être visualisés simultanément pour faciliter le diagnostic. Il sera par exemple plus facile de valider une chute de température si l'on dispose aussi de l'information montrant des vents dextrogyres associés au passage d'un front froid ou de fortes pluies associées à un orage.

Pour vérifier la cohérence spatiale, on compare chaque observation aux observations exécutées à la même heure à d'autres stations de la région. Il est possible de comparer chaque observation à la valeur à laquelle on peut s'attendre pour une station en fonction des observations provenant des stations voisines. Il convient ensuite de repérer les données qui présentent une différence importante entre la valeur attendue et la valeur enregistrée pour qu'elles soient examinées, corrigées ou éliminées au besoin. Il ne faudra pas oublier qu'une comparaison directe ne peut porter que sur des variables identiques, notamment des vitesses du vent mesurées à la même hauteur; des valeurs mesurées à des altitudes similaires sur un terrain plat et dégagé par exemple; ou des valeurs mesurées dans une région au climat homogène. Des informations détaillées sont fournies dans la section 5.9 au sujet des techniques d'estimation des données dont on a besoin pour ce type de contrôle de qualité.

Les tests de cohérence des résumés de données figurent parmi les plus faciles à réaliser. En comparant différents résumés de données, il est possible de déceler les erreurs portant sur des valeurs individuelles ou sur un résumé. Par exemple, la somme et les moyennes des valeurs quotidiennes peuvent être calculées pour différentes périodes (une semaine, un mois, une année). Dans le cas d'un élément comme la hauteur de pluie dont la mesure représente un cumul, il suffit d'effectuer un recoupement entre la somme des douze mois et la somme de toutes les valeurs quotidiennes enregistrées au cours de l'année correspondante pour déceler une erreur. Il est possible parfois de déceler des erreurs systématiques dans les données de stations d'observation en altitude en comparant les moyennes mensuelles avec les moyennes dérivées d'un système d'analyse numérique pour le même lieu et la même altitude. Il convient d'examiner la cause de toute incohérence et de la corriger.

Il est possible en général de soumettre les observations maritimes aux procédures de vérification employées pour les données provenant de stations terrestres d'observation en surface, en modifiant légèrement ces procédures pour les adapter aux éléments supplémentaires, à condition que chaque observation comprenne l'indicatif du navire pour qu'on puisse classer les données par navire et dans l'ordre chronologique. Les observations en altitude doivent être vérifiées de manière quelque peu différente. Des recoupements devraient être réalisés, portant sur les conditions en surface, avec les observations exécutées à une station de surface peu éloignée ou située au même endroit. Un programme de contrôle de qualité des données en altitude devra vérifier les données de chaque niveau successif par des calculs prenant pour base les données du niveau précédent en commençant par les données de surface. Il convient pour cela de fixer des écarts limites à ne pas dépasser entre les valeurs calculées et les valeurs enregistrées. Tout niveau dont les éléments enregistrés échouent au test de cohérence doit être signalé comme douteux, analysé et corrigé au besoin.

3.4.7 Tests de dispersion

Ces vérifications établissent des limites supérieures et inférieures pour les valeurs possibles d'un élément climatologique (notamment la direction du vent, la nébulosité, le temps passé et le temps présent), ou encore, quand l'intervalle théorique des valeurs possibles est infini, les limites au-delà desquelles les données mesurées ne devraient pas se situer. Dans ce dernier cas, les limites sont habituellement établies en fonction de l'heure et de l'emplacement, par rapport aux valeurs historiques ou par des méthodes d'interpolation spatiale. Il importe aussi de déceler les erreurs systématiques produites par les instruments et de les corriger rapidement. Il faut tenir à jour les documents dans lesquels sont consignés les tests que subissent les données, les valeurs des limites climatologiques établies pour chaque élément vérifié et la logique ayant conduit à fixer ces limites.

D'une manière générale, les tests de dispersion permettent de comparer une donnée avec une valeur étalon en fonction d'un seuil. Comparer une valeur observée à la valeur extrême ou à la valeur record ou à un multiple des écarts-types autour de la moyenne arithmétique des valeurs pour cette date constitue un test de dispersion simple à réaliser. Dans le dernier cas, il faut prendre en compte que, pour certains éléments, la distribution des valeurs n'est pas symétrique ou gaussienne et que certaines valeurs extrêmes déterminées à l'aide d'un multiple de l'écart-type peuvent être incorrectes.

Si le contrôle de qualité porte sur des séries chronologiques de données de longue durée, il est préférable d'employer une référence normalisée (des écarts-types ou un classement par ordre de grandeur non paramétrique) par opposition à une référence absolue. Dans la section 4.4, on examine divers descripteurs utilisés pour résumer les données, y compris les restrictions quant à leur adéquation.

Il peut être possible de réaliser certains tests de dispersion à l'aide de flux de données complètement différents, notamment des données de satellites ou des données radar. Un test très simple par exemple consiste à contrôler si des précipitations se sont produites ou non en vérifiant la présence de nuages sur une image satellitaire.

3.5 ÉCHANGE DE DONNÉES CLIMATOLOGIQUES

L'échange de données est essentiel à la climatologie. Pour les Membres de l'OMM, l'obligation de partager données et métadonnées entre eux et les conditions de transmission de celles-ci à des tiers sont stipulées dans la résolution 40 du Douzième Congrès météorologique mondial (données météorologiques) et dans la résolution 25 du Treizième Congrès météorologique mondial (données hydrologiques) ainsi que dans la résolution XXII-6 de la Commission océanographique intergouvernementale (données océanographiques). Ces résolutions intègrent les notions de données «essentiels» et «supplémentaires» et définissent le jeu de données minimum à mettre à disposition sans rétribution ni discrimination aucunes, sans rétribution signifiant que seuls les frais de reproduction et d'expédition sont facturés, à l'exclusion des données et des produits eux-mêmes. Les Membres peuvent décider de déclarer «essentiels» un plus grand nombre de données que ce jeu minimum. Dans le cadre de l'échange de données, il est essentiel d'utiliser des formes de présentation normalisées reconnues à l'échelle internationale.

Outre les messages CLIMAT et connexes (voir la section 4.8.7), il est demandé aussi aux Membres de fournir les données et produits supplémentaires nécessaires pour appuyer les programmes de l'OMM à l'échelle mondiale, régionale et nationale, et pour aider d'autres Membres à fournir des services météorologiques et climatologiques dans leur pays. Les Membres qui fournissent ces données et produits supplémentaires peuvent en soumettre la réexportation à certaines conditions. Les Membres devraient mettre gratuitement et sans restriction, à la disposition des chercheurs et des enseignants, pour leurs activités non commerciales, toutes les données et tous les produits échangés sous les auspices de l'OMM.

Les Membres de l'OMM acceptent qu'une partie de leurs stations appartiennent à des réseaux comme le Réseau de stations d'observation en altitude pour le SMOC (GUAN), le Réseau de stations d'observation en surface pour le SMOC (GSN), le Réseau synoptique de base régional et le Réseau climatologique de base régional. Le fait que leurs stations fassent partie de ces réseaux oblige les Membres à partager leurs données sur le plan international.

Les données sont également échangées par l'intermédiaire des centres mondiaux de données (CMD) relevant du Conseil international pour la science (CIUS). Le réseau des CMD œuvre pour garantir l'accès aux données solaires, géophysiques et environnementales connexes. C'est au service de l'ensemble de la communauté scientifique qu'il rassemble, passe au crible, organise et diffuse des données et informations. Les centres recueillent, enregistrent et archivent les mesures et les métadonnées qui s'y rapportent provenant de stations du monde entier et mettent gratuitement ces données à la disposition des milieux scientifiques. Dans certains cas, les CMD fournissent aussi des produits supplémentaires, notamment des analyses de données, des cartes de répartition des données et des résumés de données. Parmi ces CMD, certains s'occupent plus particulièrement des données ayant trait au climat, ce qui couvre la météorologie, la paléoclimatologie, l'océanographie, les gaz traces atmosphériques, la glaciologie, les sols, la géologie et la géophysique marines, les taches solaires, l'activité solaire, la physique des relations soleil-terre, la lumière du ciel, les aurores polaires, les rayons cosmiques, etc.

L'OMM participe activement à la fourniture de données à plusieurs de ces CMD et exploite directement un certain nombre de centres associés. Les domaines de spécialisation des centres de l'OMM sont les suivants: l'ozone et le rayonnement ultraviolet, les gaz à effet de serre, les aérosols, l'épaisseur optique des aérosols, le rayonnement et la chimie des précipitations. Les principes d'accès aux données diffèrent entre les centres du CIUS et ceux de l'OMM. Les centres de données du CIUS s'échangent gratuitement leurs données et fournissent gratuitement ces données aux scientifiques de tous les pays. Les centres de données relevant de l'OMM doivent se conformer aux résolutions 40 et 25 dont il est question ci-devant, ce qui leur permet de fournir aux CMD certaines données et certains produits sous certaines conditions applicables à leur usage.

Outre les CMD relevant du Conseil international pour la science, beaucoup d'autres centres fonctionnent en application d'accords de coopération avec l'OMM ou avec un SMHN. Citons notamment le Centre mondial de climatologie des précipitations et le Centre mondial de données

sur l'écoulement (Allemagne); le Centre climatologique australien; le Centre mondial des données sur l'ozone et le rayonnement ultraviolet (Canada); le Centre Hadley du Service météorologique du Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord; et, aux États-Unis d'Amérique, l'Observatoire de la terre Lamont-Doherty de l'Université Columbia, le Centre national de données climatologiques, le Centre national de données océanographiques, le Centre national de données géophysiques, le *Goddard Distributed Active Archive Center* relevant de l'Administration nationale pour l'aéronautique et l'espace (NASA), le Réseau d'observation de la région tropicale de l'océan Pacifique et la Corporation universitaire pour la recherche atmosphérique.

Pour de nombreux Membres, l'échange de données numériques se révèle relativement simple compte tenu du nombre de systèmes de communication par ordinateurs dont ils disposent. Le Système mondial de télécommunications est un système de communication réservé à la météorologie qui relie presque tous les pays du globe. En tant que système opérationnel jouant un rôle crucial dans la prévision météorologique mondiale, il propose des services de communication fiables, quoique sur une largeur de bande parfois restreinte. Comme le réseau internet, le SMT est fondé sur le regroupement d'un certain nombre de réseaux interconnectés, mais, en tant que système fermé, il n'est pas exposé aux problèmes de sécurité que connaît l'internet. Il convient de protéger les voies de communication ouvertes, comme l'internet, à l'aide des meilleurs logiciels de sécurité afin de prévenir tout accès indésirable aux fichiers, voire leur manipulation ou leur corruption.

Il est très peu probable que deux pays utilisent les mêmes formats d'archivage pour les données climatologiques. Il importe donc que la documentation sur les formats accompagne les données et décrive l'organisation des données, les types d'éléments, les unités employées et toute autre information pertinente. Par ailleurs, si les données sont compactées ou qu'elles se présentent sous un format spécial non textuel, le centre d'archivage veillera à fournir, avec les données numériques archivées demandées, les sous-programmes de lecture.

Grâce à des accords internationaux en matière d'échange de données, la compilation de données mondiales permet de produire des publications telles que les normales climatiques (*Climatic Normals*), les relevés météorologiques mondiaux (*World Weather Records*) et les données climatiques mensuelles à l'échelle du globe (*Monthly Climatic Data for the World*). Les accords bilatéraux et multilatéraux revêtent aussi de l'importance en ce qui concerne la création et l'échange de jeux de données portant sur de longues périodes, tels que ceux du Réseau mondial de données climatologiques anciennes, les jeux de données aérologiques détaillées de référence et les jeux de l'ensemble international de données détaillées océan-atmosphère constitués par les États-Unis d'Amérique, ainsi que les jeux mondiaux de données d'observation du Centre Hadley constitués par le Royaume-Uni. Ces jeux de données sont en général mis à la disposition des centres de recherche.

Les systèmes actuels d'information de l'OMM ont été mis au point pour répondre aux besoins très divers de nombreux programmes et commissions. La multiplication des systèmes a créé des problèmes de compatibilité, d'inefficacité, de chevauchement d'efforts et de coûts pour les Membres. Le Système d'information de l'OMM (SIO) est une nouvelle solution devant améliorer l'efficacité des transferts de données et d'informations entre les pays. On envisage que ce système servira à recueillir et à échanger l'information destinée à tous les programmes de l'OMM et aux programmes internationaux connexes. On pourra y inclure aussi les données environnementales et géophysiques non météorologiques et non climatologiques, notamment les données écologiques ainsi que les données sur les tremblements de terre et sur les tsunamis. Le SIO est prévu de telle façon qu'il orientera l'évolution des systèmes d'information existants vers un système intégré répondant avec efficacité aux besoins des Membres en matière d'information internationale sur l'environnement.

Le SIO proposera une démarche intégrée visant à assurer la collecte régulière et la diffusion automatisée de données d'observation et de produits, à diffuser en temps voulu données et produits et à répondre aux demandes de données et produits. Le système devrait être fiable, économique et abordable pour les Membres, qu'il s'agisse de pays en développement ou de pays développés. Il devrait aussi être durable du point de vue technologique et adapté à la

compétence locale, modulaire, adaptable, souple et évolutif. Il devrait pouvoir s'ajuster en fonction de l'évolution des besoins, permettre la diffusion de produits provenant de diverses sources et permettre à toutes les parties prenantes d'y collaborer en rapport avec leurs responsabilités en la matière et avec leurs ressources financières. Il devrait aussi accepter différents groupes d'utilisateurs et différents principes d'accès, notamment ceux dont il est question dans les résolutions 40 et 25 citées ci-devant, assurer la sécurité des données et des réseaux, et intégrer divers jeux de données.

3.6 SAUVETAGE DES DONNÉES

Il est admis à présent que le sauvetage des données est un processus en deux parties, comme cela est décrit dans le rapport intitulé *Report of the CLICOM-DARE Workshop* (WMO/TD-No. 1128). Il se décompose comme suit: premièrement la sauvegarde de toutes les données qui risquent d'être perdues à cause d'une détérioration de leur support et deuxièmement la numérisation des données dans un format informatique facile d'accès. Il appartient à chaque SMHN de créer et d'exploiter un programme de sauvetage de données.

Compte tenu des progrès technologiques réalisés, il a été possible à partir du milieu des années 1990 de numériser les données climatologiques à l'aide de scanners optiques et de créer ainsi de nouvelles archives numériques. Cette méthode permet non seulement de sauvegarder les données, mais aussi de les placer sur des supports informatiques en permettant l'échange. Certes la sauvegarde des données sous la forme d'images numériques représente une grande amélioration par rapport aux données conservées sur des supports papier, mais il faut en plus placer ces données dans des bases de données numériques pour pouvoir les utiliser pour les besoins des analyses et de l'élaboration de produits (voir la section 3.3.4). Pour veiller à la disponibilité permanente des fichiers numériques, il convient de:

- a) Sauvegarder les données sous forme de fichiers images, sur des supports (cartouches, CDROM, DVD, etc.) qu'il est possible de renouveler régulièrement pour éviter toute perte éventuelle des données due à une détérioration;
- b) Numériser les données et les intégrer dans un SGDC;
- c) Transférer dès que possible les données déjà disponibles sur support informatique vers des installations de stockage conformes aux nouvelles technologies reconnues;
- d) Convertir le format des données pour qu'il continue d'être reconnu par les logiciels les plus récents.

3.7 BIBLIOGRAPHIE

3.7.1 Publications de l'OMM

- Organisation météorologique mondiale, 1988: *WMO Region III/IV Training Seminar on Climate Data Management and User Service* (Barbade, 22–26 septembre 1986; Panama, 29 septembre–3 octobre 1986) (WMO/TD-No. 227, WCDP-No. 1), Genève.
- , 1989: *CLICOM Project* (Climate Data Management System) (WMO/TD-No. 299, WCDP-No. 6), Genève.
- , 1989: *Rapport de la Réunion des experts du CLICOM* (Paris, 11–15 septembre 1989) (OMM/TD-N° 342, PMDC-9), Genève.
- , 1990: *Report of the Expert Group on Global Baseline Datasets* (Asheville, Caroline du Nord, 22–26 janvier 1990) (WMO/TD-No. 359, WCDP-No. 11), Genève.
- , 1990: *Report of the Meeting on Archival Survey for Climate History* (Paris, 21–22 février 1990) (WMO/TD-No. 372, WCDP-No. 12), Genève.
- , 1992: *CCI Working Group on Climate Data* (Genève, 11–15 novembre 1991) (WMO/TD-No. 488, WCDMP-No. 18), Genève.

- , 1992: *Report of the First Session of the Advisory Committee on Climate Applications and Data (ACCAD)* (Genève, 19–20 novembre 1991) (WMO/TD-No. 475, WCASP-No. 18, WCDMP-No. 17), Genève.
- , 1993. *Advisory Committee on Climate Applications and Data (ACCAD)* (Rapport de la deuxième session, Genève, 16–17 novembre 1992) (WMO/TD-No. 529, WCASP-No. 22, WCDMP-No. 22), Genève.
- , 1993: *Final Report of the CCI Working Group on Climate Data and its Rapporteurs to the Eleventh Session of the Commission for Climatology* (La Havane, 15–26 février 1993) (WMO/TD-No. 523, WCDMP-No. 21), Genève.
- , 1996: *Report of the Fifth Session of the Advisory Committee on Climate Applications and Data (ACCAD)* (Genève, 26 septembre 1995) (WMO/TD-No. 712, WCASP-No. 35, WCDMP-No. 25), Genève.
- , 1996: *Report on the Status of the Archival Climate History Survey (ARCHISS) Project* (WMO/TD-No. 776, WCDMP-No. 26), Genève.
- , 1997: *Expert Meeting to Review and Assess the Oracle-Based Prototype for Future Climate Database Management Systems (CDMS)* (Toulouse, 12–16 mai 1997) (WMO/TD-No. 902, WCDMP-No. 34), Genève.
- , 1997: *Meeting of the CCI Working Group on Climate Data: Summary Report*, (Genève, 30 janvier–3 février 1995) (WMO/TD-No. 841, WCDMP-No. 33), Genève.
- , 1997: *Reports for CCI-XII from Rapporteurs that Relate to Climate Data Management* (WMO/TD- No. 833, WCDMP-No. 31), Genève.
- , 1997: *Summary Notes and Recommendations Assembled for CCI-XII from Recent Activities Concerning Climate Data Management* (WMO/TD-No. 832, WCDMP-No. 30), Genève.
- , 1999: *Report of the Meeting of the WMO Commission for Climatology Task Group on a Future WMO Climate Database Management System* (Ostrava, République tchèque, 10–13 novembre 1998) et *Follow-up Workshop to the WMO CCI Task Group Meeting on a Future WMO CDMS* (Toulouse, 30 mars–1^{er} avril 1999) (WMO/TD-No. 932, WCDMP-No. 38), Genève.
- , 1999: *Proceedings of the Second Seminar for Homogenization of Surface Climatological Data* (Budapest, Hongrie, 9–13 novembre 1998) (WMO/TD-No. 962, WCDMP-No. 41), Genève.
- , 1999: *Meeting of the CCI Working Group on Climate Data* (Genève, 30 novembre–4 décembre 1998) (WMO/TD-No. 970, WCDMP-No. 39), Genève.
- , 1999: *Report of the Training Seminar on Climate Data Management Focusing on CLICOM/CLIPS Development and Evaluation* (Niamey, Niger, 3 mai–10 juillet 1999) (WMO/TD-No. 973, WCDMP-No. 43), Genève.
- , 2000: CLICOM 3.1. Version 2. Genève.
- , 2000: *GCOS/GOOS/GTOS Joint Data and Information Management Plan, 2000* (WMO/TD-No. 1004, GCOS-No. 60), Genève.
- , 2000: *Representativeness, Data Gaps and Uncertainties in Climate Observations*, exposé scientifique présenté par Chris Folland lors du Treizième Congrès météorologique mondial (Genève, 21 mai 1999) (WMO/TD-No. 977, WCDMP-No. 44), Genève.
- , 2000: *Meeting of the WMO Commission for Climatology Task Group on Future WMO Climate Database Management Systems* (Genève, 3–5 mai 2000) (WMO/TD-No. 1025, WCDMP-No. 46), Genève.
- , 2002: *Guide to the GCOS Surface and Upper-Air Networks. GSN and GUAN*, Version 1.1 (WMO/TD-No. 1106, GCOS-No. 73), Genève.
- , 2002: *Report of the CLICOM-DARE Workshop* (San José, Costa Rica, 17–28 juillet 2002); *Report of the International Data Rescue Meeting* (Genève, 11–13 septembre 2001) (WMO/TD-No. 1128, WCDMP-No. 49), Genève.
- , 2002: *Report of the Climate Database Management Systems Evaluation Workshop* (Genève, 27 mai–1^{er} juin 2002) (WMO/TD-No. 1130, WCDMP-No. 50), Genève.
- , 2003: *Guidelines on Climate Metadata and Homogenization* (WMO/TD-No. 1186, WCDMP-No. 53), Genève.
- , 2004: *Guidelines on Climate Data Rescue* (WMO/TD-No. 1210, WCDMP-No. 55), Genève.
- , 2004: *Fourth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases* (Budapest, 6–10 octobre 2003) (WMO/TD-No. 1236, WCDMP-No. 56), Genève.
- , 2007: *Principes directeurs pour la gestion de données climatologiques* (OMM/DT-N° 1376, PMDSC n° 60), Genève.

3.7.2 **Autres lectures**

- Cornford, D., 1998: An overview of interpolation. In: *Seminar on Data Spatial Distribution in Meteorology and Climatology* (M. Bindi et B. Gozzini, édés). Volterra, European Union COST Action 79.
- De Gaetano, A.T., 1997: A quality control procedure for hourly wind data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 14:137–151.
- Graybeal, D.Y., A.T. De Gaetano et K.L. Eggleston, 2004: Complex quality assurance of historical hourly surface airways meteorological data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 21:1156–1169.
- Kresse, W. et K. Fadaie, 2004: *ISO Standards for Geographic Information*. Berlin, Springer.
- Merlier, C., 2001: *Interpolation des données spatiales en climatologie et conception optimale des réseaux climatologiques*. Annexe du rapport de Météo-France concernant ses activités en rapport avec la Commission de climatologie (CCI) de l'OMM. Rapport OMM, Rapporteur principal sur les méthodes de statistiques, chargé notamment de l'interpolation spatiale des données.
- Service météorologique hongrois, 1997: *Proceedings of the First Seminar for Homogenization of Surface Climatological Data* (Budapest, 6–12 octobre 1996), Budapest.
-

CHAPITRE 4. CARACTÉRISATION DU CLIMAT À L'AIDE DE JEUX DE DONNÉES

4.1 INTRODUCTION

D'une année à l'autre, les archives climatologiques des SMHN ne cessent de croître. C'est en faisant appel à un ensemble de méthodes statistiques que les climatologues parviennent à extraire toutes les informations nécessaires que contiennent les bases de données, et ce à l'aide d'un nombre relativement faible de valeurs. Par un choix judicieux et une application soignée de processus statistiques, ils peuvent en effet isoler et mettre en lumière l'information pertinente que contiennent les données.

Le présent chapitre est consacré aux statistiques descriptives, à savoir l'outil servant à réduire un volume bien trop grand de données pour en comprendre les propriétés. Pour bon nombre des méthodes décrites dans le chapitre, il y a lieu d'avoir recours à des ordinateurs afin de procéder au traitement et à la visualisation des données. Il convient néanmoins de souligner les dangers que présente l'application trop mécanique des méthodes d'analyse automatisées, car il est facile d'en faire mauvais usage et de mal interpréter les résultats obtenus. Bien que le recours à la machine présente des avantages incontestables, les hypothèses implicites que contiennent la plupart des logiciels d'analyse risquent fort d'être ignorées ou expliquées peu clairement, et produire ainsi des résultats erronés.

Parallèlement au présent chapitre, il y a lieu de se reporter au chapitre 5 qui examine les méthodes statistiques. Dans les deux chapitres, on cherche à décrire des notions fondamentales et non à fournir des détails précis sur des sujets complexes. Pour cela le lecteur se réfèrera aux ouvrages cités dans la bibliographie ou à des manuels théoriques et pratiques de statistique.

4.2 ÉVALUATION DE JEUX DE DONNÉES

Un jeu de données est constitué d'un ensemble d'observations de plusieurs éléments. Une observation correspond à l'estimation d'une quantité. Certaines observations sont simples, comme la lecture d'un thermomètre ou celle du niveau d'eau dans un pluviomètre. D'autres sont plus complexes. Pour obtenir la pression atmosphérique à partir d'un baromètre à mercure par exemple, il faut mesurer à la fois la longueur de la colonne de mercure et la température du baromètre, la mesure de la pression étant considérée néanmoins comme une seule observation.

Certains éléments présentent un caractère continu; il n'y a pas d'interruption dans l'état du phénomène observé. C'est le cas de la température de l'air. D'autres sont discontinus, les précipitations qui se produisent ou non par exemple, et d'autres ne peuvent se traduire par des valeurs quantitatives, mais uniquement par des catégories descriptives, notamment les types de nuages ou le temps présent. Pour un élément, la population, c'est-à-dire l'ensemble statistique, représente toutes les valeurs possibles. Quand un élément est continu, la population est infinie. Quand il est discontinu, la population est constituée de toutes les valeurs bien définies qu'on peut rencontrer pour cet élément, dans des limites fixées par l'analyste.

Un échantillon est un ensemble d'observations prélevées dans une population et destiné à représenter l'ensemble de la population. Les jeux de données sont des échantillons. Plus l'effectif de l'échantillon est grand et plus l'estimation des caractères descriptifs de la population sera précise. Une grande partie de la climatologie porte sur l'étude des échantillons, mais l'analyste doit garder à l'esprit qu'un jeu de données peut être représentatif d'une partie seulement de la population. L'influence d'un manque d'homogénéité, d'une dépendance par rapport au temps et des variations dans l'espace, par exemple, complique l'interprétation de ce que représente le jeu de données.

Avant de décrire ou d'utiliser un jeu de données, il convient de vérifier l'exactitude et la validité des données, à savoir si les valeurs sont justes et si on peut s'en servir dans le but recherché.

L'utilisateur d'un jeu de données ne doit jamais présumer, sans en avoir eu confirmation, que les données qu'il se propose d'utiliser sont exactes et valides, en particulier s'il ne dispose d'aucune information découlant des processus de contrôle de qualité auxquels le jeu de données aurait été soumis lors de sa création. Il importe de savoir comment les données ont été recueillies, traitées et assemblées, et parfois même pourquoi à l'origine elles ont été recueillies. Le chapitre 3, qui porte sur la gestion des données climatologiques, examine l'importance des métadonnées et du contrôle de qualité, respectivement dans les sections 3.3 et 3.4.

4.3 VISUALISATION QUALITATIVE DES DONNÉES

Voici quelques-uns des caractères fondamentaux qui présentent souvent un intérêt: la valeur centrale ou valeur caractéristique, l'étalement ou l'étendue des observations, l'existence d'observations inattendues, la manière dont les observations s'éloignent de part et d'autre de la valeur centrale et la formation de grappes ou groupes d'unités contiguës dans les observations. Sans une organisation systématique, il est difficile d'interpréter de vastes quantités de données pour en extraire ces caractères ou d'autres analogues. Dans l'organisation des données, la première étape consiste à se forger une idée générale de l'ensemble en visualisant la distribution des valeurs observées.

Le climatologue dispose de nombreuses méthodes pour visualiser des données afin d'établir une première estimation qualitative. Une première façon d'organiser les données consiste à classer les observations par ordre croissant ou décroissant. Les observations ainsi classées peuvent être présentées sous la forme d'un graphique ou d'un tableau, ce qui permettra de faire apparaître certains caractères, notamment les valeurs extrêmes et l'étendue.

Une deuxième façon d'organiser le jeu de données consiste à grouper les données en classes ou intervalles. On compte alors le nombre d'observations que contient chaque intervalle. La représentation graphique de l'effectif de chaque intervalle ou du pourcentage de cet effectif par rapport au nombre total des observations fournit immédiatement une indication de la forme de la distribution des valeurs de la population étudiée; c'est ce qu'on appelle une distribution de fréquence dont la représentation est l'histogramme (figure 4.1). Le nombre d'intervalles est arbitraire et l'apparence visuelle de la distribution sur l'histogramme est fonction du nombre des intervalles. En groupant les observations en classes, on perd une partie de l'information que contient le jeu de données. En général, moins le nombre des intervalles est grand et plus la perte est importante. Le choix du nombre d'intervalles devrait donc être un compromis entre l'exactitude, la facilité de communication, ce à quoi l'information doit servir et le test statistique auquel on soumettra les données.

Une troisième approche consiste à former une distribution cumulée, dont la représentation graphique peut être appelée courbe en ogive. Cette courbe se construit en pointant le nombre cumulé des observations, ou le pourcentage des observations, par rapport aux valeurs ordonnées de l'élément (voir la figure 4.2). La courbe en ogive ou des fréquences cumulées est utile, car elle

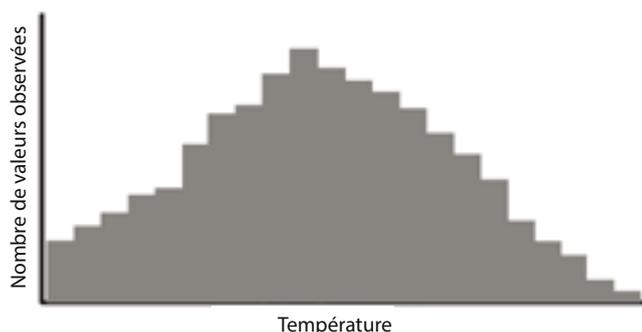


Figure 4.1. Distribution de fréquence (histogramme)

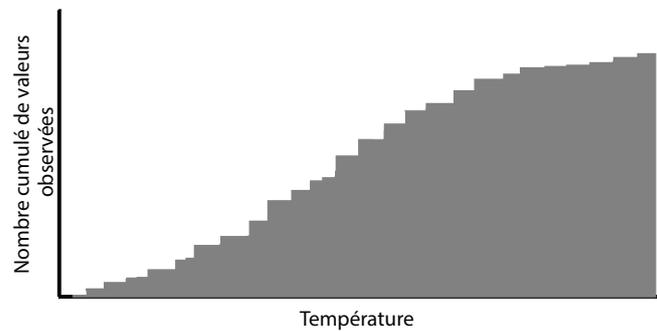


Figure 4.2. Distribution cumulée

permet de déterminer la proportion des données se situant au-dessus ou au-dessous d'une certaine valeur. La proportion des valeurs inférieures ou égales à une certaine valeur, exprimée sous forme de pourcentage, se nomme percentile; 1 % des observations sont plus petites que le premier percentile, 2 % sont plus petites que le deuxième percentile et ainsi de suite. De même, une proportion basée sur des dixièmes se nomme décile; 1/10 des observations se situent au-dessous du premier décile, 2/10 se situent au-dessous du deuxième décile et ainsi de suite. Il s'agit de quartiles quand la population est découpée en quatre classes et de quintiles quand elle est découpée en cinq classes, ce qui présente un intérêt particulier dans le cas des messages CLIMAT (voir la section 4.8.6).

On peut distinguer aussi d'autres formes de représentation, à savoir le diagramme en boîte ou boîte à moustache ou encore diagramme de Tukey (figure 4.3), le diagramme en tiges et feuilles ou tracé en arborescence (figure 4.4) et les arrangements de données (figure 4.5). Si l'ordre des données dans le temps est important, on peut produire des séries chronologiques à l'aide d'une représentation graphique des valeurs observées en fonction du temps (voir la section 4.6). Quand des données combinent deux éléments, la vitesse et la direction du vent par exemple, il est possible de tracer des diagrammes de dispersion en pointant les valeurs du premier élément par rapport aux valeurs du deuxième élément (voir la section 4.5.2). Les roses des vents fournissent un excellent moyen de visualiser les données sur le vent. Les courbes des doubles cumuls, fréquemment employées par les hydrologistes et pour vérifier l'homogénéité des données, sont tracées en pointant les valeurs successives cumulées d'un élément en regard des valeurs cumulées correspondantes d'un autre élément (voir la section 5.2). Dans l'utilisation de techniques de

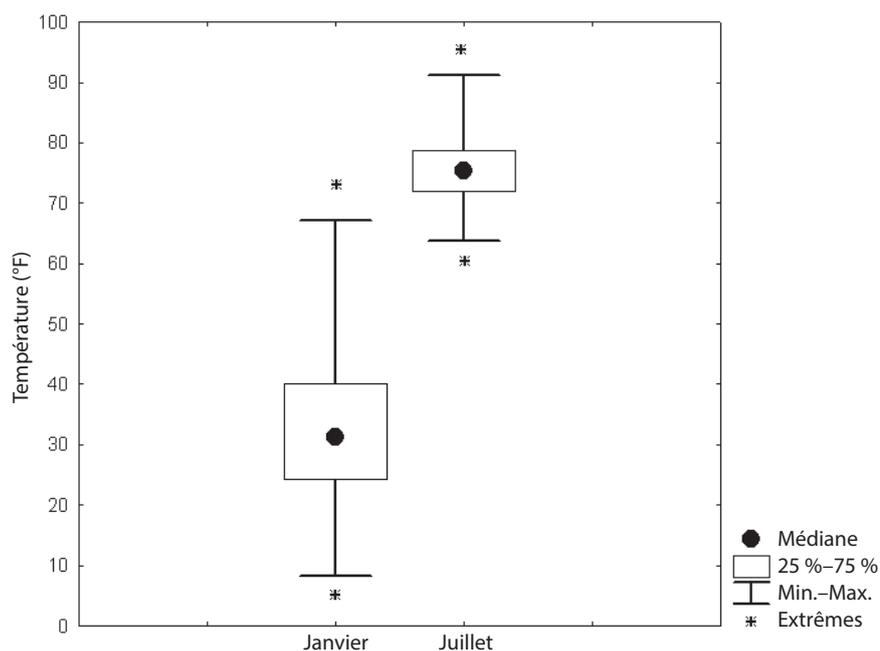


Figure 4.3. Diagramme en boîte

Tiges	Feuilles							
0	5	7	8					
1	2	3	3	7	9			
2	1	3	4	4	5	5	7	8
3	2	2	4	5	6	7	8	9
4	4	5	5	6	6	6	6	7
5	2	3	3	3	4	8	8	
6	1	1	1	3	4	5		
7	3	2	2	5	7			
8	4	6	7	7				

Clé de lecture: 215 signifie 25

Figure 4.4. Exemple de diagramme en tiges et feuilles. La tige représente le premier chiffre du nombre correspondant à la valeur observée, tandis que les feuilles représentent les derniers chiffres de ce nombre. On peut noter par exemple que 25 figure deux fois dans la série.

Année	Mois											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1961	23	33	44	50	59	64	79	76	61	50	44	32
1962	26	31	40	54	60	67	78	73	60	49	40	30
1963	27	35	43	55	58	68	77	72	58	52	43	32
1964	24	37	47	58	57	64	79	74	59	54	46	34
1965	27	32	43	56	57	65	76	74	58	53	47	44
1966	30	38	44	53	58	67	80	75	58	55	46	32
1967	19	35	47	55	61	66	74	73	60	56	43	30
1968	22	33	46	56	60	69	78	70	56	52	45	30
1969	28	37	43	51	56	70	76	72	54	52	44	34
1970	25	34	46	56	58	63	73	71	54	50	43	31

Figure 4.5. Exemple d'arrangement de données

visualisation, l'analyste n'est ainsi limité que par sa propre imagination et, dans tous les cas, il devra trier et classer les données. Quelle que soit la technique choisie, le tracé qui en résulte doit être source d'information et ne pas conduire l'utilisateur à tirer par erreur des conclusions sans fondement.

4.4 DESCRIPTEURS QUANTITATIFS SYNTHÉTIQUES DES DONNÉES

Au lieu de présenter l'intégralité d'un jeu de données pour en illustrer un caractère en particulier, il est souvent utile d'en extraire plusieurs indicateurs synthétiques ou mesures sommaires quantitatifs. Ces indicateurs aident à décrire des modèles de variation des observations. C'est en comprenant ces modèles qu'on approfondit la connaissance des processus physiques sur lesquels reposent les observations et qu'on améliore les déductions qu'on peut en tirer quant aux conditions climatiques passées, actuelles et futures.

Il faut veiller à ce que les valeurs que contient un jeu de données dont on a extrait des indicateurs synthétiques soient bien comparables. Une série de mesures de la température par exemple ne contient des valeurs comparables que si toutes les observations ont été réalisées avec le même

instrument, à la même heure quotidiennement, au même lieu et suivant les mêmes procédures. Si les procédures changent, des variations artificielles sont alors introduites dans le jeu de données (voir les sections 3.3, 3.4 et 5.2). Les descripteurs synthétiques d'un jeu de données font apparaître parfois des variations inattendues; tout schéma de variation inattendu doit être examiné pour déterminer s'il est provoqué artificiellement ou s'il révèle des effets réels du système climatique.

4.4.1 Modèles de données mis en évidence par la distribution de fréquence

Le fait de présenter les données sous forme graphique (voir la section 4.3) permet d'obtenir une vue qualitative de la structure d'une série d'observations. Des formes, schémas et modèles apparaissent. Il est possible de classer les distributions de fréquence suivant leur forme:

- a) Les courbes unimodales symétriques: ces courbes sont fréquemment obtenues dans le cas de distributions de moyennes, notamment la température moyenne annuelle et sur de plus longues périodes. En général plus la période de calcul de la moyenne est longue, plus la distribution est symétrique;
- b) Les courbes unimodales modérément asymétriques: de nombreuses courbes de moyennes sont très fréquemment presque symétriques;
- c) Les courbes unimodales fortement asymétriques: la forme de ces courbes montre un fort degré d'asymétrie; c'est souvent le cas pour les hauteurs de précipitations et les vitesses du vent;
- d) Les courbes en U: ces courbes sont fréquentes pour des éléments présentant des limites bilatérales, tels que la nébulosité (le ciel est le plus souvent principalement dégagé ou principalement couvert).
- e) Courbes multimodales ou complexes: ces courbes correspondent souvent aux éléments observés quotidiennement dans des régions aux contrastes saisonniers bien marqués. Dans un tel cas, la courbe de distribution de fréquence obtenue à l'aide de l'intégralité du jeu de données peut prendre une forme bimodale très caractéristique.

Il sera probablement plus facile de comprendre des jeux de données présentant des distributions de fréquence très complexes si on procède *a priori* à une stratification des données pour faire apparaître les différents processus sous-jacents.

Pour examiner plus d'une série d'observations, on simplifie le problème en examinant la distribution des observations d'une variable lorsque des valeurs précisées de l'autre ou des autres variables sont observées. Il s'agit de distributions conditionnelles de fréquence. Les conditions se fondent souvent sur une connaissance préalable de ce à quoi on s'attend ou sur une information quant à la probabilité d'occurrence de certains phénomènes. L'analyse conditionnelle des fréquences est particulièrement utile pour élaborer des scénarios climatiques et pour déterminer les incidences locales de phénomènes tels que le phénomène El Niño-Oscillation australe (ENSO) et d'autres mécanismes de téléconnexion (fortes corrélations statistiques entre des régimes météorologiques dans différentes parties du globe).

Une méthode pour résumer la distribution d'un jeu de données d'observation consiste à ajuster une loi de probabilité à la série statistique que représentent les observations. Les lois ou distributions de probabilités sont des fonctions aux propriétés mathématiques connues, caractérisées par un petit nombre de paramètres (généralement trois au plus). Les fonctions sont toujours établies de façon à ce que toutes les valeurs soient positives et qu'ainsi les grandeurs relatives des différentes valeurs fassent apparaître les différences de probabilité relative que ces valeurs soient observées. Plusieurs distributions de probabilités couramment utilisées, comme la loi normale (ou de Gauss) ou encore la loi généralisée des valeurs extrêmes, décrivent des situations qu'on rencontre souvent dans la nature. S'il est possible de décrire une distribution de fréquence ou une distribution conditionnelle de fréquence observée grâce à ces densités de probabilités connues, alors on peut exploiter les propriétés et les relations pour analyser les données et effectuer des inférences statistiques et probabilistes. Les figures 4.6 à 4.12 proposent des exemples de densités de probabilités pouvant approcher les distributions de fréquence observées pour des variables continues (variable pour laquelle toutes les valeurs d'un intervalle peuvent être observées).

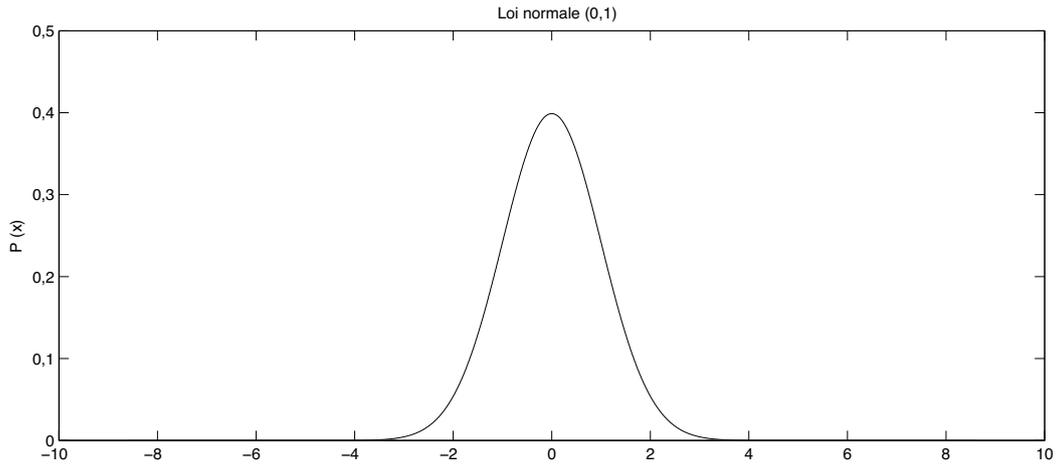


Figure 4.6. Loi normale ou de Gauss: pour le caractère observé, les valeurs du domaine de variation tendent à se grouper uniformément autour d'une seule valeur; c'est notamment le cas des températures moyennes annuelles.

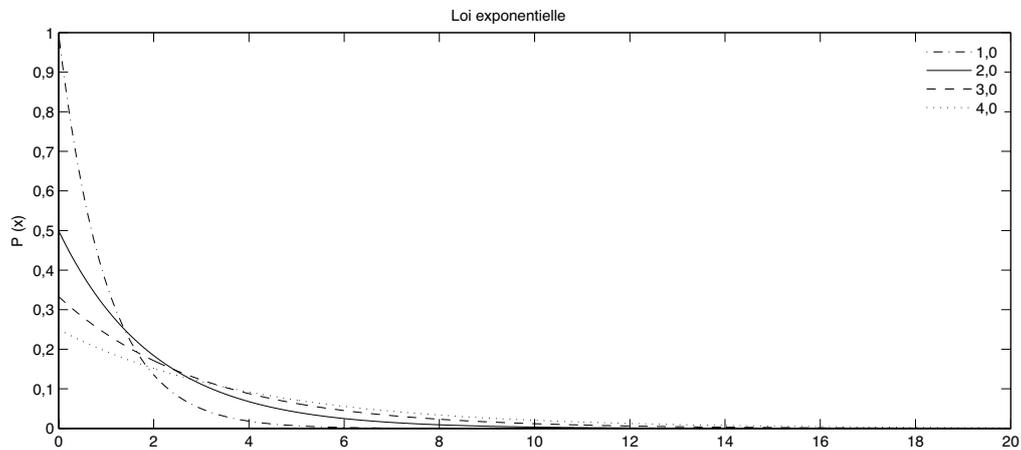


Figure 4.7. Loi exponentielle: elle décrit les intervalles dans le temps qui séparent des phénomènes pouvant se produire de façon continue et indépendante, selon une fréquence moyenne constante; on l'utilise pour l'analyse des hauteurs de précipitations quotidiennes.

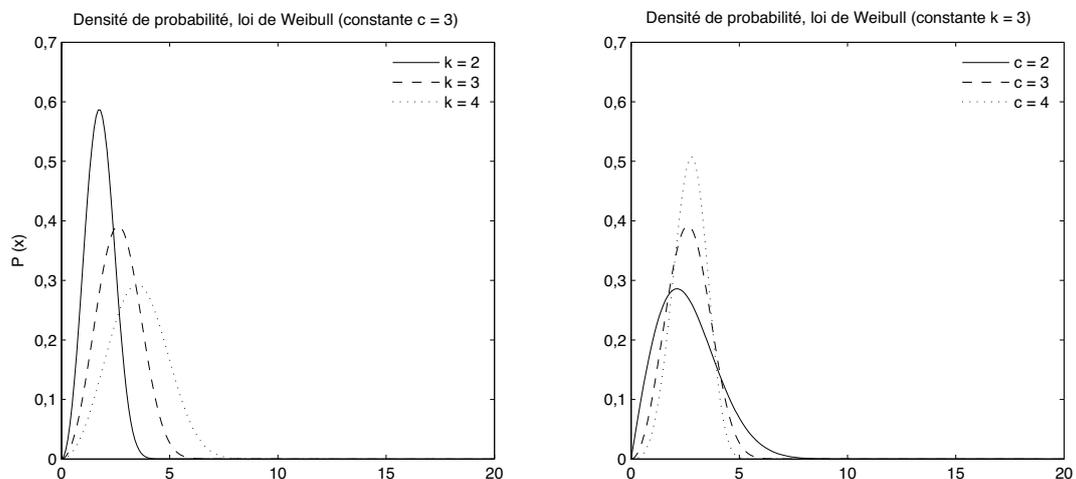


Figure 4.8. Loi de Weibull: elle décrit les intervalles dans le temps qui séparent des phénomènes pouvant se produire de façon continue et indépendante, selon une fréquence variable; on l'utilise pour l'analyse des vitesses de vent.

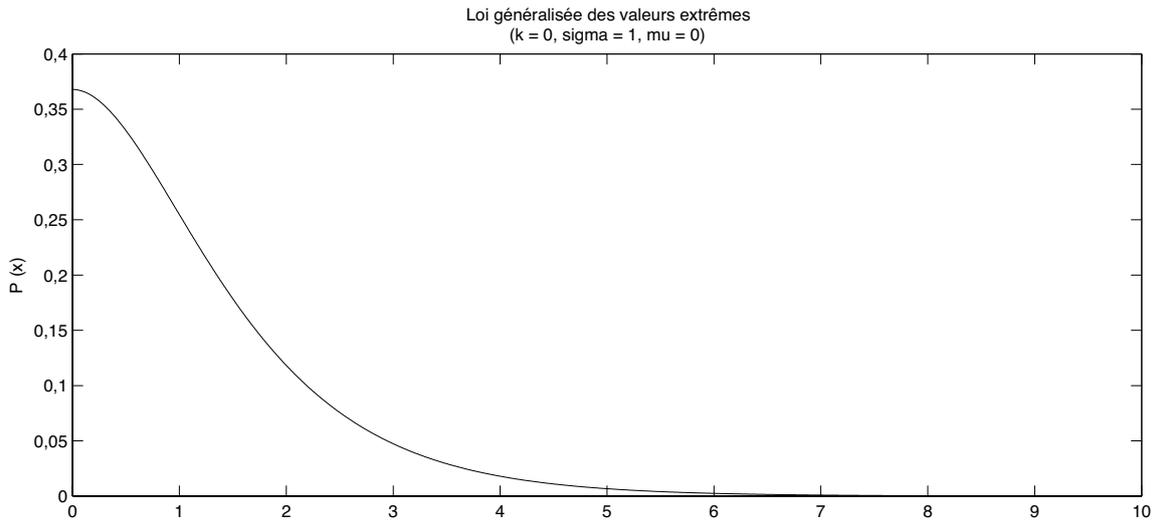


Figure 4.9. Loi généralisée des valeurs extrêmes: elle est utilisée pour simuler des valeurs extrêmes dans une distribution.

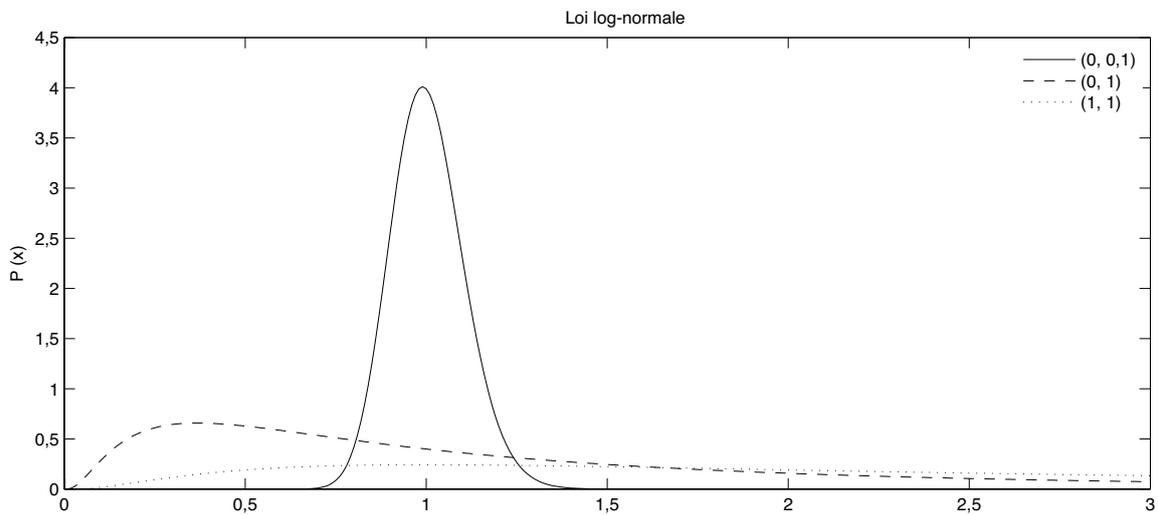


Figure 4.10. Loi log-normale: elle est utilisée quand le logarithme d'une distribution correspond à la loi normale, notamment dans le cas de la distribution des concentrations de particules (pollution de l'air).

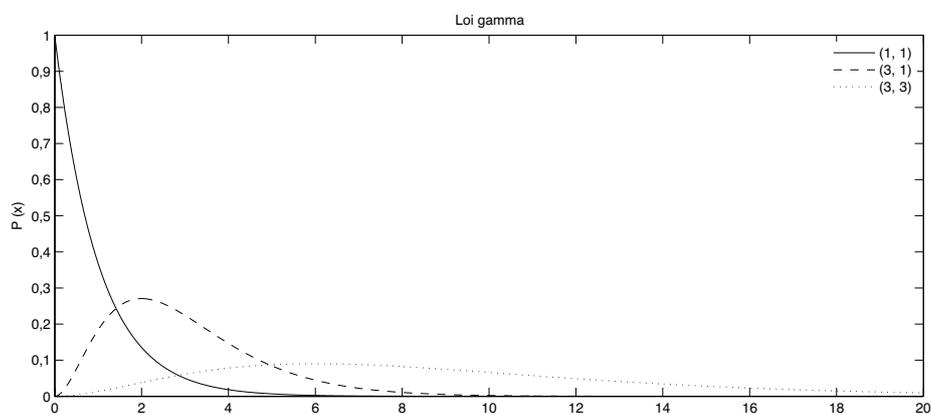


Figure 4.11. Loi gamma: elle décrit des distributions bornées d'un côté et asymétriques, notamment pour les données de précipitations.

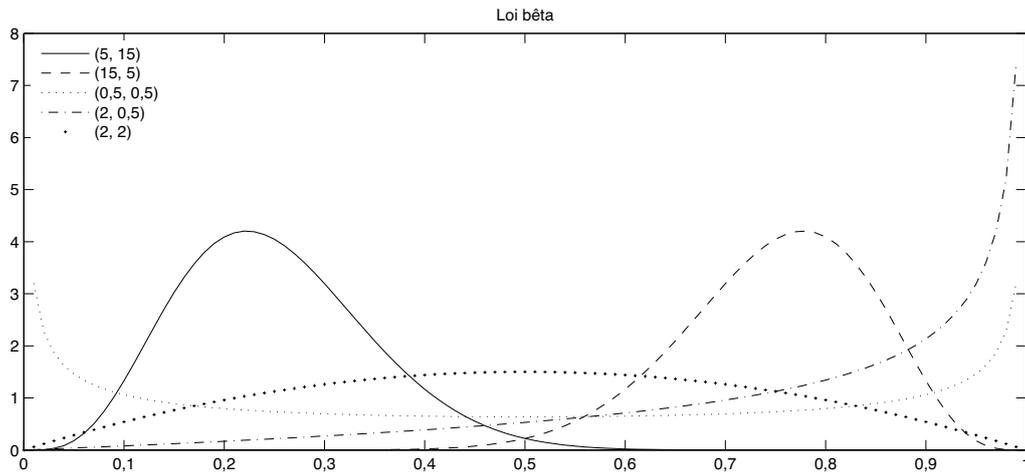


Figure 4.12. Loi bêta: elle décrit des distributions bornées des deux côtés, notamment pour les données sur la nébulosité.

Des distributions de fréquences statistiques sont aussi définies pour décrire des séries de données dont la valeur ne peut atteindre qu'une grandeur discrète bien définie. Le nombre de jours de précipitations dans un mois en est un exemple. Les valeurs possibles ne sont que des nombres entiers et 31 est la valeur maximale. Les figures 4.13 et 4.14 proposent des exemples de distributions de fréquences statistiques qui décrivent des données discrètes.

En observant la représentation graphique qualitative d'une distribution de fréquence, on parvient souvent à décider quelle distribution de fréquence statistique permettra de décrire une série de données. Si une distribution de fréquence statistique dont la fonction de probabilité est connue peut être employée pour décrire la série de données, il sera alors possible d'en tirer des inférences au sujet des données. Des méthodes bien définies permettent d'ajuster les distributions aux observations, notamment la méthode des moments, celle des moments pondérés et celle de vraisemblance maximale. Il y a lieu de bien connaître le raisonnement statistique qui sous-tend une fonction de répartition pour établir des inférences statistiques valides au sujet des données auxquelles cette fonction s'applique.

À toute série d'observations, il est possible d'ajuster des fonctions mathématiques pour en décrire les observations, mais cela nécessite une attention particulière pour différentes raisons. Quand on applique une fonction mathématique, on suppose en général que le jeu de données étudié,

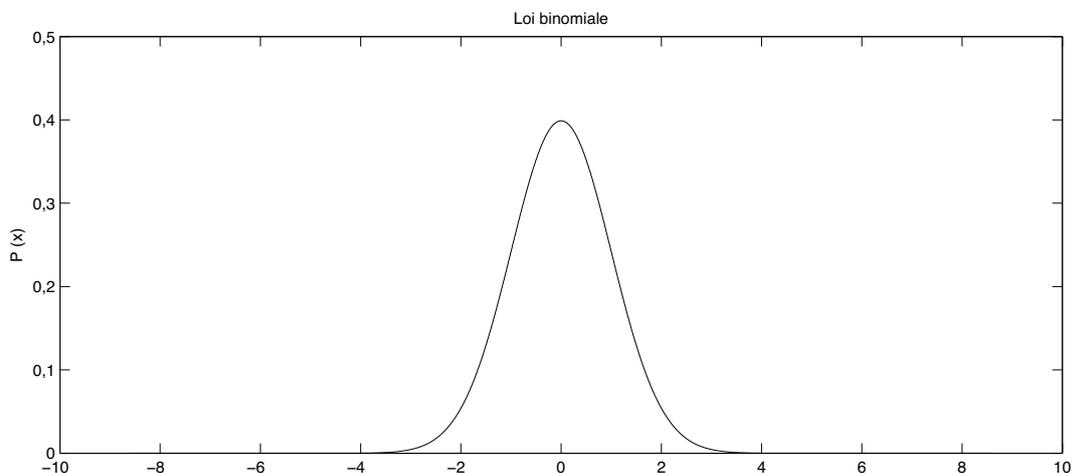


Figure 4.13. Loi binomiale: Elle décrit deux évènements discrets, notamment l'apparition ou non d'un phénomène.

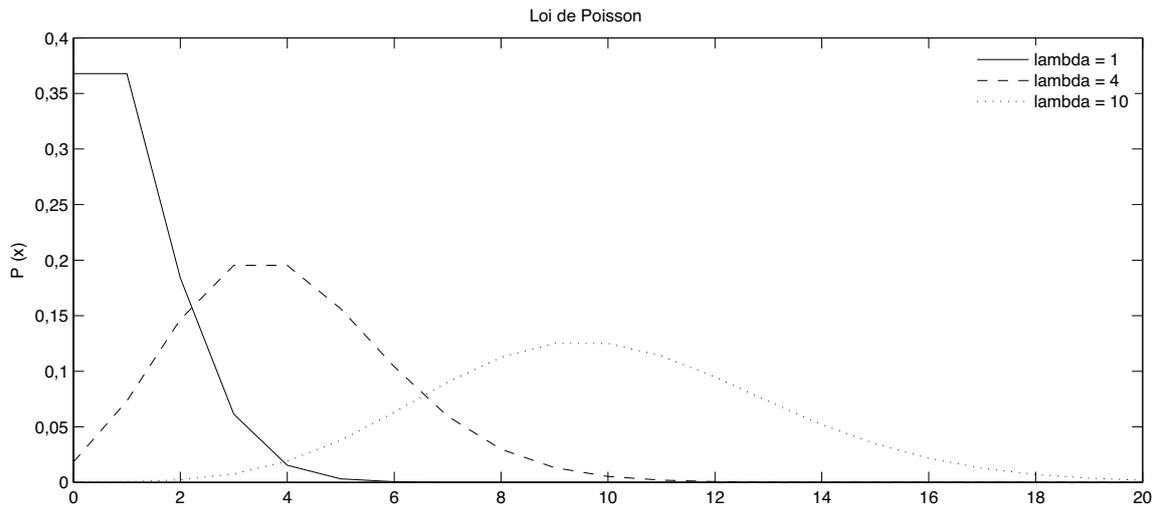


Figure 4.14. Loi de Poisson: elle décrit des évènements rares, notamment la fréquence d'occurrence des tempêtes tropicales.

habituellement un échantillon, est suffisamment représentatif de la population dont il est tiré et que les données ne contiennent pas d'erreur (voir la section 3.4). En ajustant une fonction de répartition à des observations, on cherche à s'approcher de la distribution des données. Si l'ajustement est acceptable, alors grâce à seulement quelques paramètres, la fonction appliquée à l'échantillon fournit une description réaliste des données, qui concorde bien avec les lois de la physique sous-jacentes et qui ignore les erreurs de données. Par l'ajustement d'une fonction, on se donne aussi pour objectif de décrire les données au sein d'un cadre théorique suffisamment simple pour qu'on puisse établir des inférences statistiques. Le surajustement d'un modèle mathématique peut conduire à une description irréaliste des données, trop d'importance étant accordée aux erreurs des données et à des facteurs aléatoires externes aux processus étudiés. Ce sont en général la manière dont on doit utiliser les données et les questions auxquelles le climatologue tente de répondre qui déterminent le degré de lissage à appliquer.

Pour déterminer si la fonction de répartition choisie décrit bien les observations, on peut examiner les différences entre les données observées et les valeurs produites par la fonction. Il convient de procéder à un test objectif de la qualité de l'ajustement. Il est en général possible de modéliser un jeu de données à l'aide de plusieurs fonctions. En comparant les résultats du test, on trouve alors la fonction la plus appropriée ou celle qui s'ajuste le mieux. On utilise souvent pour cela les tests du khi carré ou du khi deux (X^2) et de Kolmogorov-Smirnov. Le test du khi carré d'adéquation concerne des valeurs discrètes et indépendantes (les observations n'ont aucune influence entre elles). Quand la somme des carrés des différences entre les fréquences observées et les fréquences ajustées dépasse un seuil établi en fonction de l'effectif de l'échantillon, l'ajustement est jugé inapproprié. Ce test est sensible au nombre des intervalles choisis. Selon l'hypothèse du test de Kolmogorov-Smirnov, si la différence maximale absolue entre deux fréquences continues cumulatives d'observations indépendantes dépasse une valeur critique, alors les distributions sont probablement différentes. Ce test présente une bonne efficacité quand le jeu de données étudié comprend un grand nombre d'observations.

4.4.2 Paramètres de tendance centrale

Les observations ont souvent tendance à se grouper autour d'une valeur en particulier. Les paramètres de tendance centrale permettent de dégager une valeur centrale autour de laquelle les données tendent à se rassembler. Ces indicateurs ne se substituent pas à toutes les informations détaillées que peut contenir un ensemble complet d'observations. Souvent, le calcul d'un seul paramètre ne parvient pas à décrire la manière selon laquelle les données tendent à se concentrer, car il ne prend pas en compte la variation des observations. Tout paramètre de la

tendance centrale devra donc s'accompagner d'une mesure du degré de variation des valeurs des observations à partir desquelles on dérive la tendance centrale.

La moyenne arithmétique est l'indicateur statistique le plus couramment utilisé en climatologie. Elle est obtenue par le quotient de la somme de toutes les valeurs par l'effectif total. Pour des observations qui tendent à se rassembler autour d'une valeur centrale, elle représente un nombre vers lequel la moyenne d'une très longue série chronologique d'observations ou d'un autre ensemble comprenant de nombreuses données tendra à converger plus le nombre des données augmente. La moyenne arithmétique n'est pas représentative de la tendance centrale de distributions fortement asymétriques.

Une moyenne pondérée s'obtient en attribuant différents degrés d'importance à certaines observations, pour que les valeurs les plus fiables ou les plus représentatives, par exemple, pèsent davantage dans le calcul de la moyenne. Cette pondération peut être obtenue par plusieurs méthodes. La pondération des distances, selon laquelle les coefficients de pondération attribués sont inversement liés à la mesure de la distance, en est un exemple couramment employé. Cette méthode s'applique souvent par exemple quand on veut établir une valeur moyenne représentative d'un lieu en particulier, à partir d'observations relevées dans la région qui entoure ce lieu. Les coefficients de pondération correspondent en général à des relations mathématiques pouvant n'avoir aucun lien inhérent avec les processus physiques étudiés, mais dans la mesure du possible on essaiera de prendre en compte ces facteurs physiques dans le choix de la méthode de calcul de la pondération. D'une façon générale, les méthodes de pondération fournissent de bons résultats quand les propriétés, à la fois physiques et statistiques, présentent des variations continues et relativement lentes dans les dimensions spatiales et temporelles étudiées.

Les moyennes présentent plusieurs avantages: il s'agit de valeurs de référence très pratiques pour analyser les fluctuations des observations (la somme des écarts à la moyenne est toujours nulle); elles se calculent facilement; les moyennes de différents sous-ensembles ne se chevauchant pas et compris dans l'ensemble des observations peuvent se combiner; et l'erreur que peut comporter l'estimation de la moyenne d'un échantillon est inférieure à celle des autres indicateurs de la tendance centrale (*Sur l'analyse statistique des séries d'observations*, OMM-N° 415).

Les moyennes présentent cependant des limites. Quand une seule valeur est utilisée pour décrire une série d'observations, cela peut induire en erreur. Le calcul peut fournir des moyennes très proches pour des jeux de données ou des distributions présentant des structures internes totalement différentes. Par exemple, la moyenne d'une distribution bimodale de la nébulosité peut être la même que la moyenne d'une distribution unimodale, mais l'interprétation de ces deux moyennes sera très différente. La moyenne est assez sensible à la présence de valeurs exceptionnelles et inhabituelles; quelques valeurs extrêmes suffisent pour réduire à néant la représentativité d'une moyenne. La moyenne n'est pas un bon indicateur de la tendance centrale quand les observations ne se rassemblent pas autour d'une valeur centrale (par exemple les données sur la nébulosité qui tendent souvent à se concentrer soit près de 0 octa soit près de 8 octas). Pour qu'elle soit utile, une moyenne ne doit pas se limiter au simple résultat d'un calcul arithmétique, elle doit fixer une signification valide correspondant aux conditions réelles décrites par le jeu de données.

La médiane est la valeur centrale d'une distribution des fréquences cumulées; la moitié des données sont supérieures à la médiane et l'autre moitié lui sont inférieures. Pour l'obtenir, il convient de classer les données et de prendre la valeur centrale. Si le nombre de valeurs est impair, la médiane est la valeur centrale. Si le nombre de valeurs est pair, la médiane se situe entre les deux valeurs centrales et correspond généralement à la moyenne arithmétique ou à la moyenne pondérée de ces deux valeurs. Si ces deux valeurs sont identiques, leur valeur est prise pour médiane.

La médiane est moins sensible que la moyenne aux variations extrêmes, car c'est un indicateur de position. La médiane étant basée sur le nombre d'observations, l'ordre de grandeur des valeurs extrêmes n'a pas d'incidence sur elle. La médiane se révèle particulièrement utile quand les observations tendent à se rassembler autour du centre, mais que quelques-unes en sont aussi très

éloignées dans un sens ou dans l'autre. Comme c'est le cas pour la moyenne, la médiane n'est pas un bon indicateur quand les données ne tendent pas à se grouper autour d'une valeur centrale.

Le mode détermine la valeur la plus fréquente dans un jeu de données. Comme la médiane, il s'agit d'un indicateur de position. Le mode n'est affecté ni par la valeur (comme c'est le cas de la moyenne) ni par la position des autres observations (comme c'est le cas de la médiane). Le mode de petits échantillons ou d'échantillons dans lesquels les observations sont rassemblées en plusieurs nuages ou grappes constitue une estimation peu fiable de la tendance centrale. Dans le cas de plusieurs concentrations d'observations véritablement caractéristiques (distribution multimodale), il est probable que le jeu de données comprend des facteurs dissemblables, chacun ayant une valeur centrale différente autour de laquelle les observations tendent à se rassembler.

Pour un élément de nature circulaire, la direction du vent par exemple, la notion de moyenne peut paraître ambiguë. La valeur du mode, notamment la direction dominante du vent, est souvent un paramètre de tendance centrale plus utile pour les éléments dont on mesure la direction.

Une quantité qui n'est déterminée que par sa grandeur est une grandeur scalaire. Quand une direction est associée à cette grandeur, il s'agit alors d'un vecteur. Le vecteur vent par exemple combine la vitesse et la direction du vent. En mathématique, il est possible de décomposer un vecteur en composantes indépendantes; on peut ensuite calculer les moyennes de ces composantes et les combiner pour obtenir un vecteur moyen résultant. Il est possible par exemple d'exprimer le vent comme une combinaison de deux grandeurs scalaires différentes, la vitesse vers l'est et la vitesse vers le nord, avec les vitesses vers l'ouest et vers le sud prenant des valeurs négatives. La tendance centrale du vecteur vent correspond au vecteur résultant formé à partir des tendances centrales des vitesses vers l'est et vers le nord. Le vecteur résultant obtenu à partir de données de directions opposées et de vitesses égales a un module nul. Ce calcul peut ne pas être significatif dans le contexte de la description du climat. Pour décrire le climat, il sera préférable de calculer une direction scalaire moyenne, en ignorant la vitesse, mais en tenant compte du caractère circulaire de la mesure (par exemple l'angle entre des directions du vent de 355° et de 5° est de 10° et non pas de 350°), et une grandeur scalaire moyenne ignorant la direction. Il est possible aussi de combiner la direction vectorielle résultante avec la grandeur scalaire moyenne.

Quand on se place dans le cas d'une distribution de fréquence unimodale parfaitement symétrique, c'est celui de la loi de Gauss, les valeurs de la moyenne, de la médiane et du mode sont absolument identiques. Quand la distribution de fréquence présente une asymétrie positive, vers les valeurs les plus élevées, la moyenne sera la plus grande, suivie de la médiane puis du mode. Cet ordre s'inverse quand la distribution de fréquence présente une asymétrie négative, vers les valeurs les plus basses. Ces relations (figure 4.15) et les propriétés des paramètres

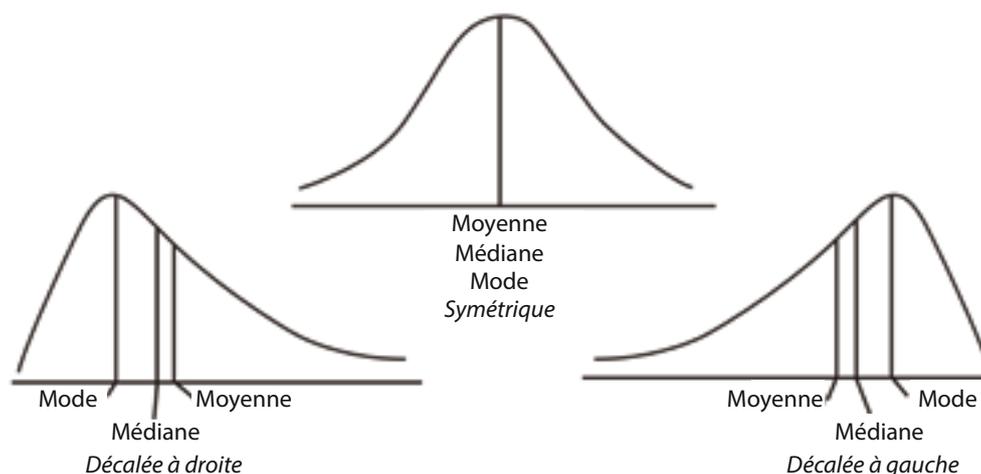


Figure 4.15. Relations entre la moyenne, la médiane et le mode

(tableau 4.1) doivent être prises en compte pour sélectionner un indicateur de la tendance centrale représentatif d'un jeu de données.

Tableau 4.1 Comparatif des propriétés des paramètres de tendance centrale

<i>Propriétés</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Médiane</i>	<i>Mode</i>
Sensibilité aux valeurs aberrantes	Oui	Non	Non
Représentativité de la tendance centrale quand la distribution de fréquence est peu étalée	Oui	Oui	Oui
Représentativité de la tendance centrale quand la distribution de fréquence est très étalée	Non	Possible	Non
Représentativité de la tendance centrale quand les observations se concentrent en plusieurs groupes	Non	Possible	Non
Représentativité de la tendance centrale quand la distribution de fréquence comprenant un nuage de données est asymétrique	Non	Oui	Oui
Facilité de calcul	Calcul le plus facile	Facile à partir de données ordonnées	Facile à partir d'un histogramme
Somme des écarts nulle	Oui	Pas toujours	Pas toujours
Répétition	Non	Non	Oui
Indicateur de variabilité	Non	Non	Uniquement en cas de plusieurs modes

4.4.3 Paramètres de dispersion

Une fois qu'on a réussi à estimer de façon appropriée la tendance centrale, il est possible de mesurer la variabilité des observations individuelles autour de cette valeur. Le paramètre de dispersion ou de variation et son explication revêtent une importance fondamentale. Il y a lieu de noter cependant qu'il est difficile de juger de la variabilité dans une série d'observations ne comportant que peu de relevés.

Il est possible de mesurer la variabilité absolue et la variabilité relative. L'écart entre chaque observation et la tendance centrale peut se réduire à une valeur qui représente et décrit l'ensemble du jeu de données. Cette valeur correspond à la variabilité absolue.

La mesure la plus simple de la variabilité absolue est l'étendue des observations. L'étendue est la différence entre la valeur la plus grande et la valeur la plus petite de la série. Elle est très simple à calculer, mais présente de nombreux inconvénients. Si les valeurs extrêmes sont observées très rarement ou qu'elles sont très éloignées de la masse des observations, l'étendue sera de nature à induire en erreur. L'étendue ne fournit aucune indication quant à la nature de la distribution de fréquence entre les limites extrêmes. Elle ignore presque totalement aussi le degré de concentration des valeurs et ne décrit aucun caractère utile propre à l'ensemble du jeu de données. De plus, on ne peut se fonder sur l'étendue pour juger de la fiabilité de la tendance centrale.

L'écart interquartile est une autre mesure fréquemment utilisée de la variabilité absolue. C'est la différence entre le troisième et le premier quartile. Le premier quartile correspond à la valeur des

observations ordonnées telle que 25 % des valeurs de la série lui sont inférieures et 75 %, supérieures. De même 75 % des valeurs de la série des données ordonnées sont inférieures à celle du troisième quartile et 25 % lui sont supérieures. L'écart interquartile réunit donc les 50 % des valeurs situées au centre de la série. Couplé avec la médiane, cet écart décrit certains des caractères de la distribution de fréquence. Il est possible de calculer d'autres écarts centraux de la même manière. L'écart interdécile, par exemple, est la différence entre le neuvième décile et le premier décile; il contient donc 80 % des observations centrales de la série.

L'écart absolu est la moyenne de la valeur absolue de tous les écarts entre chaque observation et le paramètre choisi pour représenter la tendance centrale. Certes il est possible de calculer les écarts par rapport à la moyenne, la médiane ou le mode, mais il convient théoriquement de choisir la médiane, car la somme des écarts en valeur absolue par rapport à la médiane est inférieure ou égale à la somme calculée à l'aide de la moyenne ou du mode.

L'écart type est la racine carrée de l'écart quadratique moyen ou encore la racine carrée de la moyenne des carrés de tous les écarts à la moyenne. Les écarts sont calculés par rapport à la moyenne et non par rapport à la médiane ou au mode, car la somme des carrés est alors la plus faible. Le fait de mettre au carré les écarts donne davantage de poids aux valeurs extrêmes. L'écart type est employé dans la dérivation de bon nombre de paramètres statistiques. Il est beaucoup utilisé aussi comme grandeur normative pour normaliser différentes distributions à des fins de comparaison.

La variabilité absolue n'est pas une mesure qui facilite les comparaisons. Il n'est possible de procéder à des comparaisons que lorsque les moyennes ayant servi au calcul des écarts sont à peu près égales et quand les unités de mesure sont les mêmes. À titre d'exemple, comparer les écarts types entre un jeu de données de la température et un jeu de données de degrés-jour de chauffe n'a aucun sens.

Il est souvent nécessaire d'établir des comparaisons alors que les moyennes ne sont pas à peu près égales ou que les unités de mesure sont différentes. Il faut donc trouver des paramètres qui prennent en compte les moyennes servant à établir les écarts types et qui tendent à éliminer le problème que soulèvent les différences d'unités de mesure. C'est le cas de la variabilité relative, à savoir la relation entre la variabilité absolue et la grandeur de la tendance centrale. Le coefficient de variation en est un exemple; il est défini comme le rapport de l'écart-type à la moyenne du jeu de données.

4.4.4 Paramètre de symétrie

Le coefficient d'asymétrie évalue le défaut de symétrie d'une distribution. C'est une grandeur relative et sans dimension, ce qui facilite la comparaison entre jeux de données. La différence entre la moyenne et le mode divisée par l'écart type donne une mesure simple de l'asymétrie. L'asymétrie est positive quand la moyenne est supérieure au mode et négative quand c'est l'inverse. On utilise aussi d'autres mesures de l'asymétrie, notamment celle qui se fonde sur l'écart interquartile et la médiane.

Une asymétrie positive est caractéristique de certains jeux de données sur les précipitations dont la limite inférieure est zéro, mais dont les valeurs élevées ne sont pas bornées. Les jeux de données sur la température maximale quotidienne tendent souvent aussi à présenter une asymétrie positive, tandis que les jeux de données sur la température minimale quotidienne présentent plutôt une asymétrie négative.

4.4.5 Paramètre d'aplatissement

Les distributions de fréquences symétriques peuvent présenter différents degrés d'aplatissement dans leur partie centrale. Le coefficient d'aplatissement (le kurtosis) est un quotient sans dimension qui fournit une mesure relative permettant de comparer différents degrés

d'aplatissement. Un coefficient d'aplatissement positif indique une distribution de fréquence présentant un maximum étroit en son centre, avec des fréquences chutant rapidement vers les valeurs basses en s'éloignant de la moyenne. S'il est négatif, la partie centrale de la courbe de distribution sera plus large et plate, c'est en général le cas de nombreuses distributions météorologiques, notamment celle des données sur l'humidité en altitude.

4.4.6 **Indices**

Un indice sert à représenter des conditions complexes sous la forme d'une simple indication numérique qui conserve une signification physique et qu'on peut utiliser pour surveiller un processus précis. L'indice exprime par une valeur unique un rapport entre des conditions observées et des conditions de référence. La référence utilisée correspond souvent, mais pas toujours, aux conditions climatiques moyennes. L'indice de sécheresse de Palmer en est un exemple; il permet de comparer de façon sommaire, un bilan hydrique complexe, composé des précipitations, de l'évaporation, du ruissellement, de l'alimentation des nappes et des propriétés des sols, à des conditions climatiques moyennes. Dans la mise au point d'un indice, on distingue quatre composantes: la sélection des éléments qui composeront l'indice; le choix et le calcul des conditions de référence; la méthode de calcul de l'indice; et la pondération ou l'importance à accorder à chaque élément compris dans l'indice.

L'examen et la sélection des données qui composeront l'indice représentent souvent une tâche plus compliquée que le calcul de l'indice. En ce qui concerne le choix de conditions de référence, il importe de garder à l'esprit que les caractéristiques des observations utilisées pour définir la référence peuvent évoluer dans le temps; il est essentiel d'utiliser des observations homogènes (voir la section 5.2). Il faut aussi veiller à ce que la référence représente des conditions normales, standard ou attendues, car c'est ce que la plupart des utilisateurs d'un indice tiendront pour acquis. Quand il s'agit de choisir une référence, il faut s'attacher aussi à définir de façon explicite ce que l'on doit comparer et dans quel but.

Le choix des coefficients de pondération est déterminant. Il faut veiller à bien évaluer l'importance de chaque élément qui contribue à l'indice par rapport à l'objectif du calcul de cet indice. S'il s'agit d'un indice qui continuera d'être utilisé à l'avenir, il faudra aussi s'attacher à examiner périodiquement la contribution de chaque élément compte tenu, par exemple, de son importance relative, de l'exactitude des données, de méthodes de mesure et du traitement des données.

4.5 **CORRÉLATION**

On a souvent besoin de dégager ou de décrire les relations qui lient les éléments entre eux. Une telle relation peut apparaître directement à l'examen de représentations graphiques des données, mais on fait souvent appel au calcul de paramètres quantitatifs. La corrélation est un paramètre qui quantifie une relation. Quel que soit le coefficient qu'on sera amené à calculer, il importe d'observer qu'une corrélation ne sous-entend pas une relation de cause à effet, mais simplement que les éléments se comportent d'une manière identique. Il apparaît souvent que des facteurs autres que ceux qu'on étudie sont à l'origine de l'association observée; en météorologie et en climatologie, bon nombre de relations apparentes sont généralement trop complexes pour pouvoir être reliées à une cause unique. Qu'elle soit positive ou négative, une corrélation n'est pas nécessairement synonyme de lien de causalité, tout comme on ne peut éliminer ce type de lien quand la corrélation est nulle.

4.5.1 **Tableaux de contingence**

Les tableaux de contingence offrent un moyen simple, mais efficace pour déceler des relations importantes entre différents facteurs, en particulier dans des jeux de données de volume

important. On les établit généralement à partir de descripteurs qualitatifs (faible, modéré ou fort par exemple) ou de variables dichotomiques (un phénomène s'est produit ou ne s'est pas produit). On peut aussi dresser un tableau de contingence à partir d'une fréquence dépendant de deux éléments, notamment la vitesse et la direction du vent ou la distribution diurne de la visibilité. Le tableau 4.2 fournit un exemple de tableau de contingence.

Tableau 4.2. Tableau de contingence – Accidents de la route par rapport aux observations de la visibilité

	<i>Visibilité inférieure à 200 mètres</i>	<i>Visibilité supérieure à 200 mètres</i>	<i>Total</i>
Des accidents se sont produits	16	4	20
Aucun accident ne s'est produit	13	332	345
Total	29	336	365

On évalue souvent l'indépendance entre les éléments d'un tableau de contingence à l'aide du test du khi carré. Quand c'est le cas, l'autocorrélation qu'on observe souvent dans les séries chronologiques climatologiques, selon laquelle il est plus probable qu'une observation soit identique à l'observation précédente que le contraire (voir la section 4.6), va à l'encontre des hypothèses du test, ce qui rend douteuses les conclusions qu'on peut tirer de celui-ci.

4.5.2 Coefficients de corrélation

Un diagramme de dispersion est aussi un outil simple, mais utile pour visualiser des relations. Il peut faire apparaître une relation entre deux éléments ou la tendance d'un élément dans le temps, ou encore s'il existe ou non une relation intéressante. Les figures 4.16 et 4.17 fournissent des exemples de diagrammes de dispersion. Une association entre éléments et schémas temporels peut être résumée parfois par une mesure de la corrélation. Le coefficient de corrélation est la mesure la plus communément utilisée de l'existence d'une relation entre deux grandeurs. On utilise parfois aussi le coefficient de Spearman (corrélation des rangs).

Le coefficient de corrélation est un nombre entre -1 et $+1$. Il mesure la relation linéaire entre deux éléments. Quand il est nul, cela signifie une absence de similarité de comportement entre les éléments étudiés. La figure 4.16 fournit un exemple de dispersion quand deux éléments

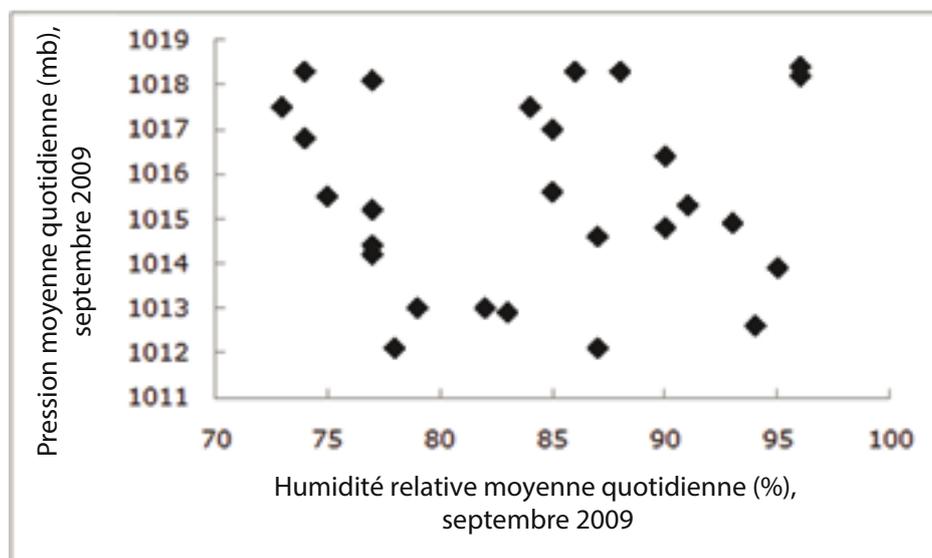


Figure 4.16. Diagramme de dispersion présentant une corrélation faible

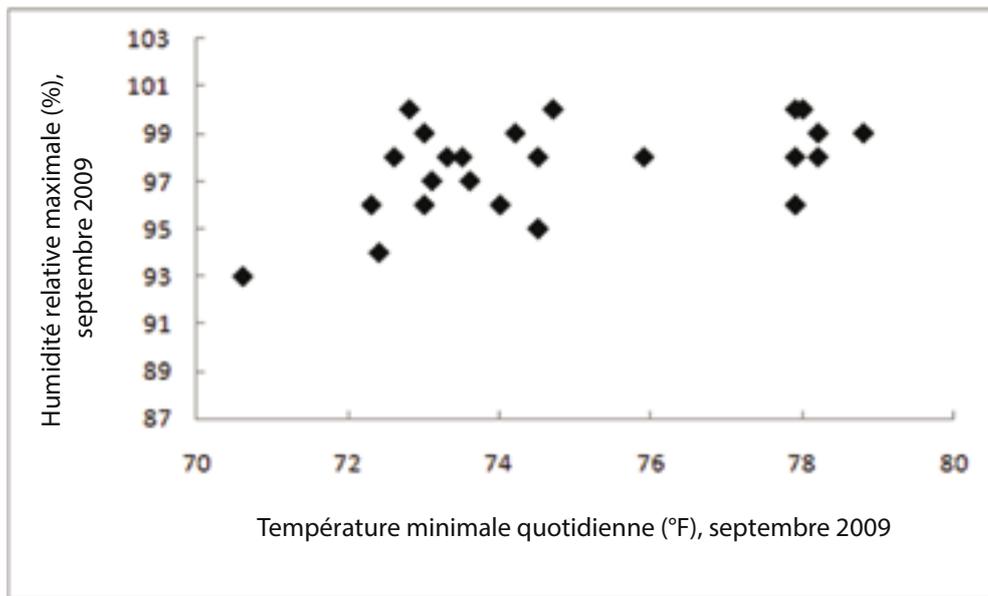


Figure 4.17. Diagramme de dispersion présentant une corrélation positive forte

présentent un très faible degré de corrélation. Quand le coefficient est égal à +1, cela signifie que l'augmentation de la valeur d'un élément est directement proportionnelle à l'augmentation de la valeur de l'autre élément. La figure 4.17 fournit un exemple de configuration lorsque les deux éléments présentent un degré de corrélation positive élevé. Quand le coefficient est égal à -1, cela signifie que si la valeur du premier élément augmente, la valeur de l'autre diminue proportionnellement. Un des inconvénients qu'il faut associer à l'emploi d'un coefficient de corrélation simple, c'est que la relation éventuelle est linéaire. Les éléments météorologiques sont souvent liés par des relations non linéaires; il peut donc falloir transformer le jeu de données (voir la section 5.4) avant de calculer un coefficient de corrélation.

La corrélation des rangs de Spearman mesure une relation entre les rangs ordonnés de deux jeux de données. Le résultat du calcul est un nombre compris de nouveau entre -1 et +1. Quand les observations des deux jeux ne conservent pas le même ordre relatif, le calcul du coefficient donne un résultat faible ou négatif; quand elles présentent un ordre relatif identique, le coefficient est élevé et positif. Le coefficient de Spearman est moins sensible aux extrêmes que le coefficient de corrélation; il mesure une relation linéaire et signale quelquefois une relation non linéaire.

4.6 SÉRIES CHRONOLOGIQUES

Pour obtenir une série chronologique, il suffit de classer les observations en fonction du temps (figure 4.18). La représentation graphique des valeurs observées en fonction du temps constitue un outil qualitatif important pour faire apparaître l'évolution dans le temps. En climatologie, la tendance est une caractéristique intéressante qui résume le comportement d'un élément sur la durée. La plupart du temps, ce sont les tendances linéaires d'une série chronologique qu'on examine, mais parfois il peut se révéler préférable de décrire la tendance selon une forme non linéaire, notamment une courbe ou un changement abrupt de pente vers le haut ou vers le bas. Qu'elles soient linéaires ou pas, les tendances observées dans les séries de données climatologiques s'inscrivent sur une période finie pouvant être relativement longue. Le système climatique a souvent montré des tendances dans une direction qui finissaient par s'inverser. Ce qui peut sembler être une tendance durable observée dans un relevé climatologique sur la période la plus récente pourrait appartenir à une oscillation lente liée à des variations multidécennales qu'on ne peut discerner clairement, car l'intervalle de temps sur lequel apparaît cette tendance ne couvre qu'une partie de l'ensemble de l'oscillation, ou parce qu'on ne sait comment la série évoluera à l'avenir. Le changement climatique d'origine anthropique pose un problème particulièrement ardu à ce sujet, car les décisions humaines seront probablement l'un

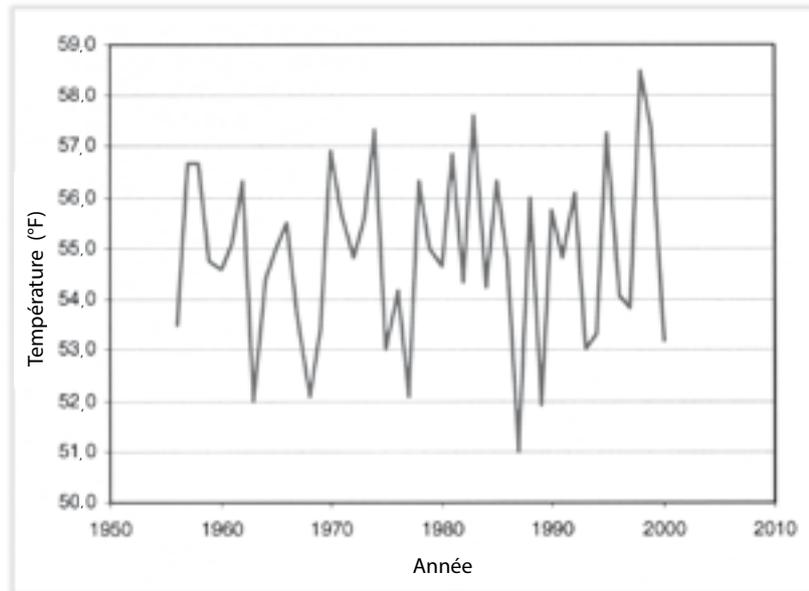


Figure 4.18. Série chronologique des valeurs de la température moyenne mensuelle

des facteurs déterminants, par exemple, dans la durée du réchauffement mondial qu'on observe depuis un siècle. Outre le fait de déterminer les tendances, on complètera l'étude d'une série chronologique en recherchant aussi les oscillations périodiques ou quasi périodiques et les variations irrégulières ou apparemment aléatoires que peuvent faire apparaître les données. L'analyse des séries chronologiques nous sert à comprendre comment les données varient en fonction du temps, suivant l'échelle qu'on s'est donnée.

Généralement, en météorologie et en climatologie, les observations qui se succèdent tendent à être plutôt semblables que dissemblables. Pour mesurer ce caractère selon lequel chaque valeur est corrélée avec celle qui la précède, on utilise le coefficient d'autocorrélation. Le calcul est le même que pour le coefficient de corrélation (voir la section 4.5.2), si ce n'est que la deuxième série de valeurs est la même que la première, mais qu'elle est plus ou moins décalée dans le temps.

Les paramètres qu'on utilise pour représenter les tendances sont fonction du type de tendance qu'on veut isoler. Les tendances linéaires sont représentées par la pente d'une droite. Les tendances non linéaires sont représentées par des coefficients de variables mathématiques qui définissent l'équation d'une courbe, notamment les coefficients d'une fonction polynôme. De même, les caractères propres à la périodicité sont aussi représentés par des coefficients de variables mathématiques qui définissent les oscillations, comme la fréquence, la phase et l'amplitude de fonctions trigonométriques.

4.7 INTERPRÉTATION DES CARACTÉRISTIQUES SYNTHÉTIQUES DU CLIMAT

Bien qu'il soit possible de calculer de nombreux paramètres permettant de résumer le climat, il peut être inapproprié d'utiliser ces paramètres pour décrire les jeux de données. Tous les paramètres qui, par la réduction des données, visent à déceler et décrire le signal climatique ou les relations climatiques se fondent sur des hypothèses. Si ces hypothèses ne sont pas valides, les paramètres qui résument les données risquent alors d'induire en erreur. Avant d'utiliser des paramètres synthétiques, il faut approfondir quatre points: les erreurs de données, le manque d'homogénéité, l'indépendance des observations et l'omission de facteurs importants.

Les erreurs touchant les données sont souvent les suivantes: erreurs d'enregistrement (transposition de chiffres par exemple); dégradation du signal de transmission; mauvaise compréhension des

pratiques de codage par un observateur, erreurs de traitement (erreur de conversion des degrés Fahrenheit en degrés Celsius par exemple); erreurs de logique et de codage des programmes informatiques; ou encore indicateur (lieu ou heure d'observation) incorrect associé à une valeur (voir la section 3.4). Ces types d'erreurs, qui n'ont pas de lien avec les conditions physiques observées, peuvent contaminer les données de telle manière que l'analyse des données conduit à des conclusions inexactes.

L'utilisation de paramètres quantitatifs pour comparer des données qui ne sont pas réellement comparables, notamment quand il s'agit d'observations inhomogènes, conduit souvent à des inférences statistiques erronées. Dans la mesure du possible, il convient de rendre homogène tout jeu de données qu'on se propose d'analyser (voir la section 5.2).

Dans le cas de nombreux jeux de données météorologiques, l'hypothèse d'indépendance n'est pas réalisée. Avant de résumer un jeu de données, il faut veiller à éliminer, si possible, la dépendance entre les observations. À titre d'exemple, l'effet de cycles annuels connus peut être éliminé en grande partie en résumant les écarts par rapport au cycle connu. Dans un autre type d'exemple, quand on sait que la persistance (autocorrélation) altère une série d'observations, comme c'est parfois le cas pour les températures quotidiennes observées au cours d'un anticyclone synoptique en surface, le modèle analytique doit en tenir compte. Si les modèles ne prennent pas en compte les dépendances, un sous-échantillonnage consistant à ne sélectionner qu'une seule observation parmi les observations ayant été effectuées au cours du phénomène persistant éliminerait la persistance que ces dernières présentent. Il faut cependant faire attention de ne pas causer ainsi un repliement (impossibilité de discerner des signaux différents après échantillonnage), ce qui peut conduire à une analyse incorrecte des oscillations sous-jacentes.

On risque aussi d'aboutir à une explication incomplète ou erronée lorsqu'on présente des données quantitatives pour appuyer un seul facteur en omettant d'autres facteurs importants. La comparaison des températures au cours d'une saison froide entre un emplacement côtier et un emplacement continental en est un exemple. Les moyennes peuvent présenter suffisamment de similitudes pour qu'on soit amené à penser que les climats sont les mêmes, mais on n'aurait pas abouti à cette conclusion si on n'avait pas ignoré la variabilité plus importante que présente l'emplacement continental.

Toutes les techniques d'analyse statistique font implicitement appel à des hypothèses statistiques spécifiques portant par exemple sur la cohérence et l'homogénéité des données ou la nature de la dépendance des observations. L'analyste doit bien les discerner et les évaluer pour pouvoir assortir de certaines réserves son interprétation d'un indicateur synthétique suivant que ces hypothèses sont plus ou moins vérifiées. Quand une quelconque de ces hypothèses n'est pas réalisée, il convient de modifier l'interprétation de l'indicateur synthétique en conséquence. Il se peut que l'interprétation normale de l'indicateur ou du paramètre suffise, mais l'analyste doit néanmoins bien faire apparaître que des hypothèses ne sont pas vérifiées ou qu'il a un doute sur la question. Par exemple, si les températures moyennes annuelles sont calculées à partir d'un jeu de données dont on sait, grâce aux métadonnées, qu'il n'est pas homogène, l'hypothèse selon laquelle toutes les données sont comparables n'est pas vérifiée. L'analyste doit donc révéler ce fait et son effet éventuel sur le calcul de la moyenne.

4.8 **NORMALES**

On utilise les normales climatologiques à deux fins principales. Elles servent de référence par rapport à laquelle il est possible de comparer des observations récentes ou actuelles, ce qui permet en outre de disposer d'une base pour de nombreux jeux de données d'anomalies climatiques (par exemple les températures moyennes mondiales). Elles servent largement aussi, implicitement ou explicitement, pour déterminer les conditions auxquelles on peut s'attendre le plus dans un lieu donné.

La pratique consistant à établir des normales climatologiques remonte à la première moitié du XX^e siècle (voir les éditions précédentes du présent Guide (OMM-N° 100), le *Règlement technique* (OMM-N° 49) et la publication intitulée *Handbook on CLIMAT and CLIMAT TEMP Reporting* (WMO/TD-No. 1188)). Il avait été recommandé de faire porter la période de référence sur 30 ans, cette durée étant prise pour norme essentiellement parce qu'on ne disposait que de 30 années d'observations quand cette recommandation générale a été formulée. À l'origine, les normales devaient permettre la comparaison entre les observations du monde entier. Ce n'est que progressivement au cours du XX^e siècle qu'elles furent utilisées en tant que prédicteurs.

La plupart du temps, les normales climatologiques sont essentiellement centrées sur la valeur moyenne d'un élément climatique pour une période donnée. Comme cela a été dit dans la section 4.4.2, la moyenne ne fournit qu'une description incomplète du climat et beaucoup d'applications nécessitent des indications sur d'autres aspects de la distribution de fréquence et du comportement statistique de l'élément en question, tels que la fréquence sur de longues périodes quand une valeur dépasse un certain seuil. Les valeurs extrêmes d'un élément pour une période bien précise et d'autres descripteurs statistiques de la distribution de fréquence (comme l'écart type des valeurs quotidiennes ou mensuelles) sont des indicateurs utiles du climat en un lieu; aussi est-il bon de les faire figurer dans séries de normales.

Bon nombre de SMHN calculent les normales quotidiennes en plus des normales mensuelles et annuelles. Bien qu'elles ne soient pas requises par l'OMM, les normales quotidiennes fournissent une illustration du caractère non aléatoire des variations quotidiennes d'un élément, ce que les normales mensuelles ne permettent pas. On les calcule en établissant la moyenne des valeurs d'un élément pour un jour précis du calendrier sur une période donnée. Les valeurs observées sont habituellement lissées par moyennes mobiles sur trois à sept jours ou à l'aide d'un filtre binomial destiné à réduire les effets d'une variabilité temporelle aléatoire de fréquence élevée correspondant aux systèmes météorologiques. On peut aussi ajuster aux séries de moyennes quotidiennes, calculées à partir des observations, des fonctions de lissage par interpolation (Spline), trigonométriques ou polynomiales, ces séries de données lissées devenant alors les normales quotidiennes (voir la section 5.8).

4.8.1 Période utilisée pour les calculs

Selon le *Règlement technique* de l'OMM, les normales climatologiques standard sont des moyennes de données climatologiques calculées pour les périodes consécutives de 30 ans ci-après: du 1^{er} janvier 1901 au 31 décembre 1930, du 1^{er} janvier 1931 au 31 décembre 1960, etc. Les pays calculent leurs normales climatologiques standard le plus rapidement possible une fois la période standard écoulée. Il est recommandé aussi, dans la mesure du possible, de calculer les anomalies en se basant sur les périodes correspondant aux normales climatologiques standard, afin que soit établie une base uniforme de comparaison. Des normales provisoires (moyennes) peuvent être calculées à n'importe quel moment pour des stations ne disposant pas de données sur une période de 30 ans (voir la section 4.8.4). Des moyennes de courte période sont des moyennes calculées pour toute période d'au moins dix ans commençant le 1^{er} janvier d'une année se terminant par le chiffre 1 (période du 1^{er} janvier 1991 au 31 décembre 2004, par exemple). Bien que cela ne soit pas requis par l'OMM, certains pays calculent ainsi des moyennes pour chaque décennie.

Quand on utilise les normales climatologiques standard à titre de référence, le fait de mettre à jour fréquemment les normales ne présente aucun avantage particulier, à moins que cela permette d'intégrer les données d'un nombre significativement plus grand de stations. Une mise à jour fréquente a pour inconvénient de nécessiter un nouveau calcul des normales elles-mêmes, mais aussi des nombreux jeux de données qui utilisent les normales comme référence. Par exemple, des jeux de données sur la température mondiale ont été calculés en tant qu'anomalies par rapport à une période de référence notamment 1961–1990 (figure 4.19). Le fait d'utiliser une période plus récente pour calculer des moyennes, notamment 1971–2000, fournit des résultats dont le caractère prédictif sera légèrement meilleur pour des éléments qui présentent une tendance séculaire (séries chronologiques caractérisées par une augmentation ou une diminution

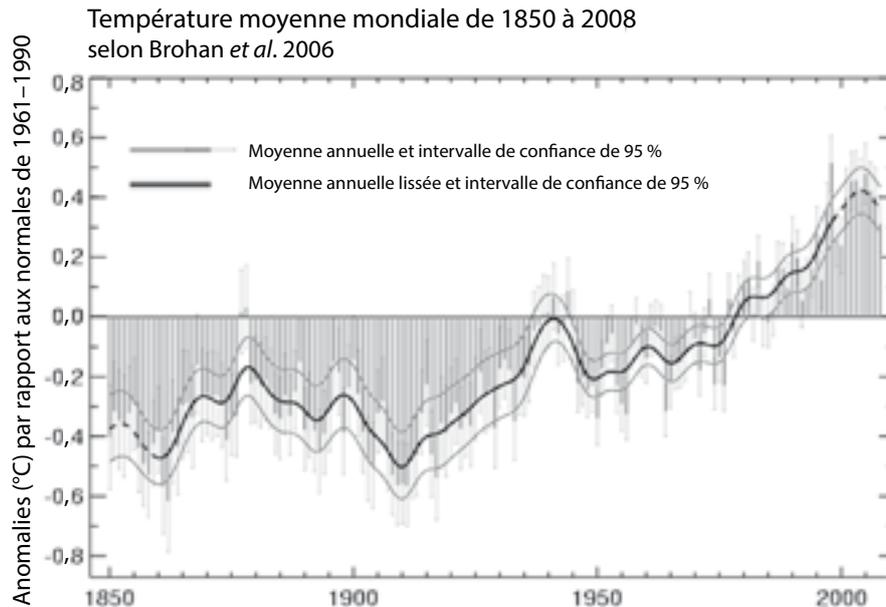


Figure 4.19. Anomalies de la température moyenne mondiale
(avec l'aimable autorisation du Centre Hadley du Service météorologique du Royaume-Uni)

constante des valeurs mesurées sur une longue période). Pour de nombreux utilisateurs, les normales de 1971–2000 apparaîtront naturellement comme plus récentes que celles de 1961–1990. Il est cependant possible d'estimer que les inconvénients qu'il faut associer à une mise à jour fréquente annulent cet avantage quand les normales sont utilisées en tant que référence.

Plusieurs études ont montré que 30 années ne constituent pas en général une période optimale pour calculer des normales utilisées à des fins de prévision. La période optimale pour les températures est souvent bien plus courte que 30 ans, tandis que la période optimale pour les précipitations est souvent bien plus longue que 30 ans. La publication intitulée *The Role of Climatological Normals in a Changing Climate* (WMO/TD-No. 1377) ainsi que d'autres ouvrages indiqués à la fin du présent chapitre fourniront davantage de détails sur l'utilisation des normales de différents éléments à des fins de prévision.

Les tendances séculaires réduisent la représentativité des séries chronologiques en tant que descripteur du climat actuel et probablement futur d'un lieu donné. En outre, la présence d'une variabilité multidécennale propre au système climatique entraîne des différences dans les normales climatologiques d'une période de référence à l'autre, ce qui réduit la représentativité d'une normale quelconque par rapport au climat actuel. À des fins de prévision, on encourage les SMHN à établir des normales provisoires ainsi que des moyennes de courte période. La durée optimale des relevés à utiliser à des fins de prévision varie en fonction de l'élément, de la géographie du lieu et de la variation séculaire. D'une manière générale, une période de cinq à dix ans comprenant les relevés les plus récents a autant de valeur prédictive qu'une série chronologique recueillie sur 30 ans. Par rapport aux périodes de calcul des normales climatologiques standard, des périodes de référence plus courtes permettent de calculer des moyennes en intégrant un bien plus grand nombre de stations. En ce qui concerne les éléments qui présentent une tendance sous-jacente non négligeable (température moyenne par exemple), leur caractère prédictif sera amélioré si les normales provisoires et les moyennes de courte période sont mises à jour fréquemment.

Dans toutes les publications présentant des normales et des moyennes, ainsi que dans toutes celles où on utilise des normales et des moyennes pour analyser et faire apparaître la variabilité du climat, il importe de décrire la période sur laquelle portent les calculs et les méthodes de calcul employées. Les codes CLIMAT et CLIMAT SHIP contiennent des champs permettant de préciser

les années de début et de fin de la période de calcul des normales figurant dans ces types de messages.

4.8.2 **Stations pour lesquelles les normales et les moyennes sont calculées**

Il y a lieu de calculer des normales et des moyennes climatologiques pour un éventail de stations aussi large que possible, à condition que ces stations satisfassent les normes établies quant à la quantité et au caractère complet des données nécessaires. Dans la mesure du possible, il convient d'effectuer ce calcul pour toutes les stations qui diffusent leurs données par le Système mondial de télécommunications (voir le *Règlement technique*, Volume I, partie II, paragraphe 1.3.1.2).

4.8.3 **Homogénéité des données**

Dans la mesure du possible, les données utilisées pour le calcul des normales et moyennes climatologiques doivent être homogènes. La question de l'homogénéité est examinée plus en détail dans la section 5.2. En ce qui concerne les normales et moyennes climatologiques, les problèmes d'homogénéité qui nécessitent une attention particulière sont toutes les modifications apportées aux lieux d'observation, aux procédures d'observation, y compris les changements d'heures, aux types d'instruments utilisés, à l'exposition des instruments dans le temps et au traitement des données.

Dans la pratique, il ne sera pas possible d'établir des jeux de données répondant aux critères d'homogénéité pour de nombreux emplacements. Il peut falloir alors produire des normales à partir d'un ensemble composé de deux parties ou plus d'une série de relevés manquant d'homogénéité. Une solution consiste à apporter des ajustements à la partie la moins récente de la série de relevés afin de la rendre le plus homogène possible par rapport aux données les plus récentes.

4.8.4 **Données manquantes**

Le fait de calculer des normales à partir de jeux de données incomplets peut fausser les résultats. Par exemple, si une année comprise dans la période de calcul a été particulièrement froide et que les normales ont été calculées sans les données de cette année, alors les normales seront plus élevées que si le calcul avait inclus ces données. Comme les données climatologiques se caractérisent souvent par une forte autocorrélation, le fait que des données manquantes touchent des observations consécutives peut avoir une incidence plus élevée sur les normales que si le même nombre de données manquantes avait été réparti de façon aléatoire sur la période de calcul.

Il est conseillé de calculer les normales ou les moyennes de courte période uniquement quand on dispose des valeurs d'au moins 80 % des années de la série de relevés, avec au plus trois années consécutives manquantes. Quand les données manquantes touchent une période relativement longue, mais qu'après cette période les relevés sont jugés suffisamment complets, une autre solution consiste à calculer une moyenne pour cette période à l'aide uniquement des données provenant des années qui suivent l'interruption dans les relevés.

Les normales ou les moyennes annuelles devraient correspondre à la moyenne ou à la somme (suivant le cas) des douze valeurs normales ou moyennes mensuelles, sans tenir compte de la durée variable des mois (voir le *Règlement technique*, Volume I, partie II, paragraphe 1.4.2.4). Le calcul des normales annuelles n'est possible que si aucune normale mensuelle ne manque.

Il est recommandé de ne pas calculer de valeur mensuelle quand plus de dix valeurs quotidiennes sont manquantes ou s'il y a une période de cinq jours successifs à laquelle aucune valeur n'est attribuée. Pour des éléments dont la valeur mensuelle est une somme de valeurs quotidiennes et non une moyenne (notamment pour la hauteur de pluie ou la durée d'insolation), on ne devrait

calculer une valeur mensuelle qu'à condition de disposer de toutes les observations quotidiennes ou alors qu'à condition que tout jour manquant soit inclus dans une observation cumulative, couvrant la période correspondant aux données manquantes, pour le jour où les observations reprennent. Dans la publication intitulée *Calculation of Monthly and Annual 30-Year Standard Normals* (WMO/TD-No. 341), il est recommandé d'appliquer des critères plus stricts au calcul des moyennes, les limites étant de plus de cinq valeurs quotidiennes manquantes ou trois jours successifs manquants.

4.8.5 **Température moyenne quotidienne**

Il existe de nombreuses façons de calculer la température moyenne quotidienne. On peut utiliser la température maximale quotidienne et la température minimale quotidienne, des observations exécutées sur 24 heures, des observations synoptiques ou encore des observations prises à des heures bien précises sur un jour. Pour qu'une moyenne fournisse la meilleure approximation statistique, elle doit se baser sur l'intégration d'observations continues effectuées sur une période de temps donnée; plus la fréquence des observations est élevée et plus la moyenne sera exacte. Pour des raisons pratiques, il est en général impossible de calculer les moyennes quotidiennes à partir d'un grand nombre d'observations réparties de façon équidistante sur une période de 24 heures, car bon nombre de stations d'observation n'assurent pas la mesure en continu d'un élément. À des fins de comparaison, il est souhaitable de fixer une méthode de traitement normalisée applicable à toutes les stations dans le monde, en tentant d'intégrer le maximum de stations.

La température maximale quotidienne et la température minimale quotidienne sont observées à toutes les stations climatologiques ordinaires (voir la section 2.2.1). Aussi la méthode recommandée pour le calcul de la température moyenne quotidienne consiste-t-elle à prendre la moyenne des températures maximale et minimale quotidiennes. Cette méthode n'offre pas la meilleure approximation du point de vue statistique, mais son utilisation systématique satisfait les critères de comparaison des normales. Les SMHN devraient aussi calculer les moyennes quotidiennes à l'aide d'autres méthodes, si cela permet d'améliorer la connaissance du climat national.

4.8.6 **Quintiles des précipitations**

Les quintiles des précipitations servent à établir une relation entre une hauteur totale mensuelle de précipitation observée et la distribution de fréquence des valeurs observées au cours de la période pour laquelle les normales ont été calculées. Il n'existe pas de méthode universellement reconnue pour calculer les limites des quintiles et le choix de la méthode peut avoir une grande incidence sur les valeurs obtenues. Voici cependant la procédure recommandée pour calculer ces limites.

Pour chacun des douze mois de l'année, les 30 valeurs mensuelles de la hauteur des précipitations, tirées de la période normale de 30 ans, sont classées en ordre croissant. La liste ainsi constituée est divisée en cinq groupes (quintiles) comprenant chacun six valeurs. Le premier quintile contient les six valeurs les plus basses qui, pour le mois en question, ont été observées au cours de la période de 30 ans. Les deuxième, troisième et quatrième quintiles contiennent les valeurs intermédiaires en ordre croissant et le cinquième quintile, les six valeurs les plus élevées.

Comme limite entre deux quintiles successifs, il est pris une valeur à mi-chemin entre la valeur la plus élevée du quintile inférieur et la valeur la plus basse du quintile supérieur. À partir des quintiles est établi un indice des précipitations qui correspond au numéro du quintile dans lequel se classe la hauteur mensuelle des précipitations du mois pour lequel le message est établi, les règles spéciales suivantes s'appliquant:

- a) Pour une hauteur de précipitation nulle, l'indice est égal à 0 si l'observation est exécutée en dehors de la période de référence, il est égal à 1 si l'observation est exécutée six fois au

maximum au cours de la période de référence, il est égal à 2 si l'observation est exécutée entre 7 et 12 fois; il est égal à 3 si l'observation est exécutée entre 13 et 18 fois; et ainsi de suite;

- b) Pour une hauteur de précipitation inférieure à la valeur la plus basse de la période de référence, l'indice est égal à 0 (que la hauteur de précipitation soit nulle ou pas);
- c) Pour une hauteur de précipitation supérieure à la valeur la plus élevée de la période de référence, l'indice est égal à 6.

4.8.7 Diffusion des normales

La diffusion internationale des normales climatologiques est assurée essentiellement à l'aide des messages codés CLIMAT (pour les stations terrestres d'observation en surface) et CLIMAT SHIP (pour les observations en surface exécutées à bord de navires), transmis par le Système mondial de télécommunications. Les procédures de codage et de transmission sont décrites dans la publication intitulée *Handbook on CLIMAT and CLIMAT TEMP Reporting* (WMO/TD-No. 1188).

4.9 BIBLIOGRAPHIE

4.9.1 Publications de l'OMM

- Organisation météorologique mondiale, 1988: *Règlement technique*, Vol. I – Pratiques météorologiques générales normalisées et recommandées; Vol. II – Assistance météorologique à la navigation aérienne internationale; Vol. III – Hydrologie (OMM-N° 49), Genève.
- , 1989: *Calculation of Monthly and Annual 30-Year Standard Normals* (WMO/TD-No. 341, WCDP-No. 10), Genève.
- , 1990: *Guide des pratiques climatologiques*, deuxième édition (OMM-N° 100), Genève.
- , 1990: *Sur l'analyse statistique des séries d'observations* (OMM/NT-N° 143, OMM-N° 415), Genève.
- , 1995: *Manuel des codes* (OMM-N° 306), Genève.
- , 1996: *Normales climatologiques (CLINO) pour la période 1961–1990* (OMM-N° 847), Genève.
- , 2004: *Handbook on CLIMAT and CLIMAT TEMP Reporting* (WMO/TD-No. 1188), Genève.
- , 2007: *The Role of Climatological Normals in a Changing Climate* (WMO/TD-No. 1377, WCDMP-No. 61), Genève.

4.9.2 Autres lectures

- Angel, J.R., W.R. Easterling et S.W. Kirtsch, 1993: Towards defining appropriate averaging periods for climate normals. *Clim. Bull.*, 27:29–44.
- Asnani, G.C., 1993: *Tropical Meteorology* (2 vol.), Pune, Sind Society.
- Barnston, A.G. et R.E. Livezey, 1987: Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly Weather Rev.*, 115:1083–1126.
- Bhalme, H.N. et D.A. Mooley, 1980: Large-scale droughts/floods and monsoon circulation. *Monthly Weather Rev.*, 108:1197–1211.
- Bhalme, H.N., D.A. Mooley et S.K. Jadhav, 1984: Large-scale April pressure index connected with the southern oscillation and its potential for prediction of large-scale droughts over India. *Mausam*, 35(3):355–360.
- Brohan, P., J.J. Kennedy, I. Harris, S.F.B. Tett et P.D. Jones, 2006: Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850. *J. Geophysical Research* 111, D12106.
- Dixon, K.W. et M.D. Shulman, 1984: A statistical evaluation of the predictive abilities of climatic averages. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 23:1542–1552.
- Guttman, N.B., 1989: Statistical descriptors of climate. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 70:602–607.

- Huang, J., H.M. van den Dool et A.G. Barnston, 1996: Long-lead seasonal temperature prediction using optimal climate normals. *J. Climate*, 9:809–817.
- Lamb, P.J. et S.A. Changnon, 1981: On the “best” temperature and precipitation normals: the Illinois situation. *J. Appl. Meteorol.*, 20:1383–1390.
- Matheron, G., 1973: The intrinsic random functions and their applications. *Adv. Appl. Prob.*, 5:207–221.
- Rao, G.A., S.V. Datar et H.N. Srivastava, 1992: Study of drought indices in relation to rice crop production over some States of India. *Mausam*, 43(2):169–174.
- Srivastava, A.K., P. Guhathakurta et S.R. Kshirsagar, 2003: Estimation of annual and seasonal temperatures over Indian stations using optimal normals. *Mausam*, 54:615–622.
- Tukey, J.W., 1977: *Exploratory Data Analysis*. Reading, Massachusetts, Addison Wesley.
- Von Storch, H. et F.W. Zwiers, 1999: *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Wilks, D.S., 1995: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. San Diego, Academic Press.
-

CHAPITRE 5. MÉTHODES STATISTIQUES D'ANALYSE DE JEUX DE DONNÉES

5.1 INTRODUCTION

On introduit dans le présent chapitre des concepts et des méthodes statistiques à la disposition des climatologues, sans cependant fournir de détails précis sur les sujets complexes. Certaines méthodes statistiques font donc l'objet d'un simple survol et d'autres ne sont pas traitées du tout. Le lecteur pourra se référer aux publications et manuels de statistiques indiqués à la fin du chapitre pour approfondir le sujet. À cet égard, *Quelques méthodes de l'analyse climatologique* (OMM-N° 199) et *Sur l'analyse statistique des séries d'observations* (OMM-N° 415) sont deux ouvrages que tout climatologue devrait posséder. Il appartient aussi aux climatologues de se tenir au courant des techniques actuelles ayant des applications pratiques dans leur domaine, car des méthodes statistiques et analytiques ne cessent de voir le jour ou de s'améliorer.

L'utilisation des données tirées des observations météorologiques et climatologiques n'a pas pour objectif principal de décrire les données recueillies (voir le chapitre 4), mais d'en déduire à partir d'une représentation restreinte (l'échantillon de données étudié) les éléments physiques complexes qui présentent un intérêt pour les utilisateurs de l'information climatologique. L'interprétation des données climatologiques comprend généralement des comparaisons à la fois spatiale et temporelle portant sur les caractères que présentent les distributions de fréquences. Ces comparaisons sont effectuées pour répondre à des questions courantes du type:

- a) Les températures moyennes relevées au cours d'une période bien précise à des emplacements différents sont-elles identiques?
- b) La variabilité des précipitations est-elle la même à des emplacements différents?
- c) L'amplitude diurne de la température mesurée à un emplacement donné évolue-t-elle avec le temps et, dans ce cas, comment évolue-t-elle?
- d) Quelle est la probabilité pour que des tempêtes tropicales se produisent dans une région donnée?

Les inférences se fondent directement sur la théorie des probabilités et l'emploi de méthodes statistiques pour parvenir à ces déductions relève donc du raisonnement mathématique. La statistique peut être définie comme étant une science pure et appliquée permettant de créer, d'élaborer et d'appliquer un ensemble de techniques destinées à évaluer le caractère incertain des inférences relevant d'une logique inductive. Elle sert à combler le fossé entre les données brutes et l'information utile; on l'emploie pour analyser les données et les modèles du climat et pour prévoir le climat. Grâce aux méthodes statistiques, il est possible d'établir la confiance à accorder à une décision en fonction des procédures appliquées.

La confiance qui peut être accordée à une décision est importante en raison des risques qu'on peut associer au fait de prendre la mauvaise décision. Les données tirées des observations ne fournissent qu'un constat du système physique que représentent le climat et le temps; de plus elles présentent généralement des erreurs. Les conclusions qu'on peut dresser seront exactes ou inexactes. Il est donc nécessaire de rechercher des facteurs quantitatifs qui décrivent la confiance à placer dans les décisions pour utiliser à bon escient l'information que contiennent les jeux de données.

5.2 HOMOGÉNÉISATION

L'analyse des données sur le climat destinée à discerner les variations et les tendances gagne en fiabilité quand les jeux de données utilisés sont homogènes. Par jeu de données homogène, on entend un jeu de données dans lequel toutes les fluctuations de la série chronologique traduisent les variations réelles de l'élément climatique représenté. La plupart des méthodes statistiques partent du principe que les données examinées sont autant que possible exemptes d'erreurs

d'instruments, de codage ou de traitement et d'autres erreurs non météorologiques et non climatologiques. Pourtant, les données météorologiques ou climatologiques ne sont en général ni homogènes ni exemptes d'erreurs. Il s'agit aussi bien d'erreurs systématiques (qui altèrent un ensemble complet d'observations de la même façon, par exemple dans le cas d'erreurs constantes d'étalonnage d'instruments ou de fautes de conversion d'unités) que d'erreurs aléatoires (toute observation pouvant faire l'objet d'une erreur aussi probablement positive que négative, comme dans le cas d'écarts de parallaxe quand des observateurs différents lisent la mesure fournie par un baromètre à mercure).

La meilleure manière de veiller à l'homogénéité des relevés consiste à éviter les modifications en ce qui concerne la collecte, la manipulation, la transmission et le traitement des données. Il est fortement conseillé de modifier le moins possible les pratiques et les instruments d'observation (*Guide to the GCOS Surface and Upper-Air Networks: GSN and GUAN (WMO/TD-No. 1106)*). Malheureusement, la plupart des longues séries climatologiques sont altérées par plusieurs facteurs n'étant pas liés aux phénomènes climatiques de grande échelle. On peut citer notamment les changements de lieux géographiques; les modifications touchant l'affectation et la couverture des sols à l'échelle locale; le remplacement d'un type d'instrument par un autre, les changements d'exposition des instruments, le remplacement de leurs supports ou des abris; les modifications touchant les pratiques d'observation; les changements de méthodes de calcul, de codes et d'unités; ou encore les événements historiques et politiques. Certains changements peuvent entraîner des ruptures soudaines de l'homogénéité (par exemple un changement d'instrument ou d'emplacement), tandis que d'autres, causer une distorsion graduelle (par exemple urbanisation croissante dans le voisinage d'une station). Dans les deux cas, les séries chronologiques touchées perdent leur homogénéité, ce qui peut fausser l'évaluation des tendances climatiques. Il faut noter que les changements d'emplacement n'affectent pas toujours les observations de tous les éléments, et que tous les éléments observés n'ont pas tous la même sensibilité aux changements. L'intérêt de disposer de relevés homogènes découle principalement de la nécessité de bien discerner les variations propres aux phénomènes climatiques à grande échelle. Le fait que des séries de données comprennent certaines «inhomogénéités» présente par contre un intérêt pour les études portant par exemple sur les effets de l'urbanisation sur le climat local ou les effets de la croissance végétale sur le microclimat d'un écosystème.

Pour examiner l'homogénéité d'une série de données, il convient d'utiliser des tests statistiques en tenant compte des métadonnées dont on dispose. Quand on dispose de l'historique détaillé d'une station et que des mesures ont été conduites parallèlement lors d'un changement d'emplacement ou d'instrument, l'homogénéisation pourra se fonder sur ces éléments d'information à la fois qualitatifs et quantitatifs. L'archivage de toutes les métadonnées historiques est donc essentiel pour qu'il soit possible de parvenir à homogénéiser des séries chronologiques de données climatologiques; c'est un élément dont tous les Services météorologiques doivent se préoccuper (voir les chapitres 2 et 3).

Après l'analyse des métadonnées, les tests statistiques peuvent faire apparaître des manques d'homogénéité supplémentaires. Les tests à utiliser sont généralement fonction de l'échelle de temps propre aux données; ils seront différents suivant qu'il s'agit de données quotidiennes, de données mensuelles ou de données relevées suivant d'autres échelles temporelles. Il faut ensuite vérifier les résultats de ce type de procédures d'homogénéisation statistiques à l'aide des métadonnées à disposition. En principe, il est possible d'utiliser tout test statistique permettant de comparer un paramètre statistique entre deux échantillons de données. Toutefois, on a en général recours à des tests spéciaux d'homogénéité qui vérifient en une fois l'intégralité de la série chronologique. Les tests aussi bien non paramétriques (selon lesquels aucune hypothèse n'est formulée au sujet des distributions statistiques) que paramétriques (selon lesquels la distribution de fréquence est connue ou correctement supposée) donnent de bons résultats.

Pour choisir un test d'homogénéité, il importe avant tout de se fier à la forme de la distribution de fréquence des données. Pour certains jeux de données, il s'agira d'une distribution en cloche (normale ou gaussienne); une méthode paramétrique donne alors de bons résultats. Dans d'autres cas (notamment des données de précipitations provenant d'un lieu où la variabilité interannuelle est marquée), la courbe de distribution prend une autre forme et les tests non

paramétriques portant sur les rangs peuvent se révéler plus appropriés. Pour évaluer le degré de confiance qu'on peut accorder aux résultats d'un test donné, il y a lieu de tenir compte aussi des effets de l'autocorrélation, du nombre de points d'inflexion potentiels dans une série (signalés ou non par les métadonnées), des tendances et des oscillations, et des périodes courtes de relevés pouvant constituer des anomalies.

De nombreuses méthodes se fondent sur la comparaison des données à homogénéiser (la série à traiter) avec celles d'une série de référence. Théoriquement, cette série de référence doit refléter le même ensemble d'influences climatiques de grande échelle que la série à traiter, sans avoir pu subir cependant les mêmes erreurs potentielles et artificielles. Si la série à traiter est homogène et qu'on soumet les deux séries à une comparaison par différence (cas d'éléments mesurés à l'aide d'une échelle d'intervalle, comme la température) ou par calcul de rapports ou du logarithme des rapports (cas d'éléments mesurés à l'aide d'une échelle proportionnelle, comme les précipitations), la série chronologique résultante ne fera apparaître aucun changement brusque ni aucune tendance, mais elle oscillera autour d'une valeur constante. Toutefois si la série à traiter contient une ou plusieurs ruptures d'homogénéité, celles-ci apparaîtront dans les séries découlant de l'un ou l'autre type de comparaison. La figure 5.1 fournit un exemple de courbe présentant une série à traiter et une série de référence, tandis que la figure 5.2 propose une série résultant d'une comparaison par différence faisant apparaître une rupture d'homogénéité dans la série à traiter.

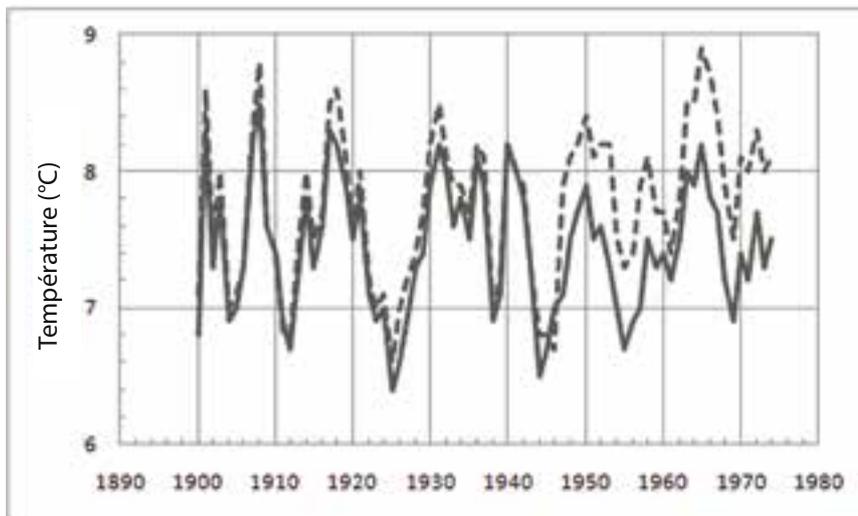


Figure 5.1. Exemple de courbes juxtaposées d'une série à traiter (ligne tiretée) comparée à une série de référence (ligne continue)



Figure 5.2. Exemple de courbe de différence

Le recours à une série chronologique de référence fonctionne bien quand le jeu de données comprend des valeurs en nombre suffisamment grand pour que la relation climatologique s'ajuste bien entre les emplacements dont les séries sont à traiter et les emplacements dont les séries servent à établir la série de référence, et quand toutes les stations ou les valeurs dont on dispose, ou en tous cas la plupart d'entre elles, ne présentent pas de problèmes d'homogénéité. En général, plus la variabilité spatiale de l'élément climatique ou du type de climat est grande et plus le réseau d'observation doit être dense (par exemple il faut davantage de points de données pour les précipitations que pour la température, et davantage aussi pour homogénéiser des précipitations quand les conditions de température sont très variables que quand c'est l'inverse). Quand les instruments ont tous été remplacés à peu près au même moment au sein d'un réseau, établir une série de référence est inutile, puisque tous les points de données montreront les mêmes variations. S'il est impossible d'établir une série de référence, il faut alors évaluer des points d'inflexion et des facteurs de correction éventuels sans avoir recours aux données des stations voisines.

Les courbes des doubles cumuls sont souvent employées en hydrométéorologie pour vérifier entre elles les mesures des précipitations et de l'écoulement, mais on peut aussi se servir de cette méthode pour d'autres éléments. Il s'agit de pointer sur un graphique les valeurs successives cumulées de la série à traiter en regard des valeurs cumulées correspondantes de la série de référence pour chaque période. Si le rapport entre la série étudiée et la série de référence demeure constant dans le temps, la courbe des doubles cumuls présente alors une pente constante. Toute variation importante de la pente ou de la forme de la courbe indique un changement dans le rapport entre les deux séries. Étant donné que de telles variations peuvent se produire naturellement, il est conseillé de vérifier si les changements apparents de la pente s'opèrent sur une période continue et bien définie d'au moins cinq ans et qu'ils sont confirmés par des événements signalés par les métadonnées de la station avant de conclure à un manque d'homogénéité. La figure 5.3 reprend les données déjà utilisées dans les figures 5.1 et 5.2 présentées sous la forme d'une courbe des doubles cumuls. Comme il est souvent difficile de déterminer à quel endroit la pente d'une courbe des doubles cumuls présente une cassure, on construit une courbe de résidus à partir des différences cumulées entre les données de la station étudiée et celles de la station témoin sur une échelle de temps (figure 5.4). La courbe des résidus montre plus clairement la rupture de pente. Il est possible d'utiliser la courbe des doubles cumuls pour faire apparaître des changements de proportionnalité survenant plus d'une fois pendant la période considérée. Quand une courbe des doubles cumuls révèle une rupture de pente, il est possible de calculer des facteurs de correction en formant le rapport des deux pentes avant et après le point d'inflexion.

Il existe plusieurs tests de stationnarité (hypothèse selon laquelle les caractères d'une série chronologique ne varient pas avec le temps). Le test des suites (ou séquences) en est un qui

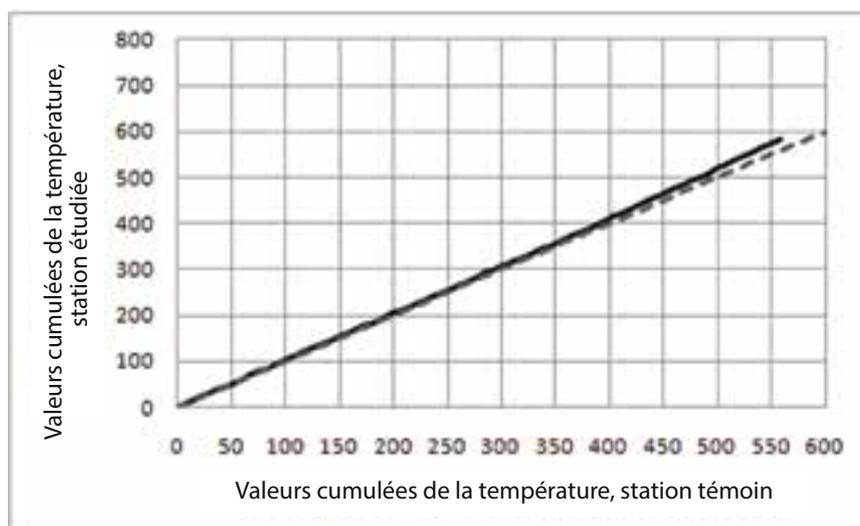


Figure 5.3. Exemple de courbe des doubles cumuls, la pente tirée étant égale à 1



Figure 5.4. Exemple de courbe de cumul des résidus

prend pour hypothèse que les tendances et autres formes de persistance propres à une série d'observations se produisent de façon aléatoire. Il se fonde sur l'observation, dans les valeurs consécutives de la variable, du nombre total des suites affectées d'un signe ou de l'autre. Un nombre trop faible de ces suites indique une persistance ou une tendance, tandis qu'un nombre trop élevé indique des oscillations. Le caractère stationnaire des tendances centrales et de la variabilité entre les parties de la série est important. Les techniques visant à examiner ces caractères comprennent des méthodes paramétriques et des méthodes non paramétriques.

Quand les données présentent une résolution inférieure au mois, notamment dans les séries d'observations quotidiennes ou horaires, l'homogénéisation des extrêmes pose problème. Peu importe comment on les définit, les extrêmes sont des données qu'on enregistre rarement, mais qui traduisent souvent le fait qu'un ensemble de conditions atmosphériques particulières se sont produites. Quand les points de données extrêmes sont relativement peu nombreux pour l'analyse, il peut se révéler difficile de déterminer comment ajuster ces données pour homogénéiser ces conditions uniques. Il faut considérer que les extrêmes font partie intégrante du jeu de données et qu'il ne faut donc pas les homogénéiser séparément. Alors que les techniques utilisées pour homogénéiser les données de la température mensuelle, saisonnière ou annuelle donnent en général satisfaction, l'homogénéisation des données et extrêmes quotidiens demeure complexe.

Certes il existe de nombreuses techniques objectives pour déceler les problèmes d'homogénéité et ajuster les données en conséquence, mais l'application de telles techniques n'en demeure pas moins subjective. La décision même d'appliquer ou non une de ces techniques est déjà subjective. Il en découle que des tentatives indépendantes d'homogénéisation pourront aisément aboutir à des données complètement différentes. Il importe donc de bien consigner tous les détails de chacune des étapes franchies et décisions prises au cours du processus. Il ne faudrait pas considérer qu'une fois ajustées, les données sont nécessairement «correctes», ni penser que les données originales sont systématiquement «fausses». Il faut veiller à toujours conserver ces données originales.

Les techniques d'évaluation de l'homogénéité et d'ajustement des données sont un domaine dans lequel les outils, tant théoriques que pratiques, ne cessent d'évoluer. L'analyste devra donc s'efforcer de se tenir au courant de cette évolution.

5.2.1 Évaluation de données homogénéisées

L'évaluation des résultats du repérage et de l'ajustement des données non homogènes demande du temps, mais elle est incontournable, quelle que soit la méthode qui a été employée. Il importe

de bien comprendre les facteurs d'ajustement qui ont été appliqués aux données pour améliorer la fiabilité de la série chronologique et rendre les mesures comparables sur toute l'étendue de celle-ci. Il faudra parfois faire appel à des techniques conçues pour un autre ensemble de circonstances (un autre climat, un autre élément météorologique ou climatologique, une autre densité de réseau, etc.), aussi importe-t-il d'analyser dans quelle mesure l'homogénéisation a bien fonctionné. À titre d'exemple, la plupart des techniques utilisées pour homogénéiser les données mensuelles ou annuelles des précipitations ont été conçues et validées pour des climats pluvieux présentant des précipitations tout au long de l'année. Elles pourraient donc révéler de graves faiblesses, si on les appliquait à des données recueillies sous des climats comprenant des saisons très sèches.

Pour évaluer les corrections apportées, il sera possible de comparer les données corrigées et celles qui ne l'ont pas été avec une information indépendante, notamment des données provenant de pays voisins, des jeux de données aux points de grille, ou encore des relevés indirects comme ceux issus d'études phénologiques, les registres d'observation ou les dates de gel et de dégel. Quand on utilise de telles techniques, il ne faut pas oublier cependant qu'elles aussi présentent des limites. Dans le cas des données aux points de grille, par exemple, le jeu de données peut être altéré par des variations du nombre de stations au fil du temps; il se peut aussi qu'un point de la grille présente une mauvaise corrélation avec les données originales d'une station située sur le lieu même ou à proximité.

Une autre méthode consiste à examiner, dans une série chronologique de moyennes par zones à l'échelle d'un pays, les données corrigées et celles qui ne l'ont pas été pour voir si la procédure d'homogénéisation a modifié les tendances prévues, compte tenu de ce qu'on sait du réseau de stations. Quand par exemple des observations exécutées l'après-midi ont été remplacées à grande échelle par des observations exécutées le matin, la série chronologique des données sur la température non corrigées comporte une erreur qui tend à abaisser les valeurs, puisque les observations effectuées le matin donnent en général des températures inférieures à celles relevées l'après-midi. Une fois la série corrigée pour tenir compte de la différence de l'heure d'observation, l'examen du jeu de données révélera, comme cela était prévisible, un réchauffement progressif plus important que celui du jeu de données non corrigé.

On trouvera des descriptions bien plus complètes de tests largement utilisés, dans la publication intitulée *Guidelines on Climate Metadata and Homogenization* (WMO/TD-No. 1186) et dans plusieurs autres ouvrages cités à la fin du présent chapitre. Une fois les résultats de l'homogénéisation validés, la nouvelle série chronologique obtenue fournira dans son ensemble une description des variations temporelles de l'élément analysé, de meilleure qualité que les données originales l'auraient fait. Certaines valeurs isolées pourront cependant demeurer fausses ou, pire encore, l'erreur qu'elles comportent pourra avoir été aggravée par l'homogénéisation.

5.3 AJUSTEMENT DE MODÈLES POUR ÉVALUER LES DISTRIBUTIONS DE DONNÉES

Une fois qu'on a pu corriger les jeux de données pour éliminer les erreurs et tout manque d'homogénéité qu'on y a décelés, il convient de faire coïncider aux distributions de fréquences observées des modèles de distributions statistiques décrits dans la section 4.4.1, de manière à pouvoir en tirer parti à l'aide de méthodes statistiques. Il est possible en effet d'ajuster une distribution de fréquence théorique aux données en y insérant les estimations des paramètres de la distribution, ces estimations étant calculées à partir d'échantillons des données d'observation. Les estimations peuvent se fonder sur des quantités variables d'informations ou de données. Le degré de liberté désigne le nombre d'éléments d'information ou de données indépendants qui sont utilisés dans l'estimation des paramètres d'une distribution. En général plus le nombre de degrés de liberté est grand et meilleure sera l'estimation. En pointant les données sur la courbe théorique lissée, on peut procéder à une évaluation graphique du degré de concordance entre la courbe et les données.

L'examen des résidus est un outil performant pour comprendre les données et proposer les modifications qu'il convient d'apporter au modèle ou aux données. Le résidu est la différence entre la valeur observée et la valeur correspondante du modèle. Il n'est pas synonyme de valeur anormale. Une valeur anormale est une valeur atypique, inhabituelle ou unique figurant dans la série des données originales. Il est utile de représenter les résidus sur un graphique, pour faire apparaître des schémas de répartition particuliers. Si l'on découvre de tels schémas, par exemple des oscillations, des grappes ou des tendances, c'est en général que le modèle n'est pas bien adapté aux données. Les valeurs aberrantes (quelques résidus s'écartant fortement de la majorité des autres valeurs résiduelles) représentent des indicateurs de données qui peuvent être douteuses ou erronées. Dans les analyses qui suivront, elles seront considérées habituellement comme des extrêmes. Quand aucun schéma n'apparaît et que les points des résidus semblent répartis de façon aléatoire, on peut alors accepter le fait que le modèle s'ajuste bien aux données.

Quand il s'agit d'ajuster un modèle statistique à la distribution de fréquence d'une série d'observations, la validité des hypothèses sur lesquelles reposent le modèle et le processus d'ajustement doit être avérée. Pour la plupart des modèles, on part de l'hypothèse que les données sont indépendantes (une observation n'est pas tributaire d'une autre quelconque observation). La plupart des tests comparatifs qui vérifient l'ajustement d'un modèle posent comme hypothèse que les erreurs sont réparties de façon aléatoire et indépendante. Si les hypothèses ne sont pas exactes, alors toute déduction issue de l'analyse risque d'être fautive.

Une fois qu'on est parvenu à trouver une distribution de fréquence statistique qui s'ajuste bien aux données étudiées, en satisfaisant tous les critères d'échantillonnage indispensables (indépendance, caractère aléatoire, etc.), et que l'ajustement a été validé (voir la section 4.4), il est alors possible d'utiliser le modèle pour représenter les données. Les mathématiques permettent alors de procéder par inférence. Le modèle fournit une estimation de la tendance centrale, de la dispersion et des propriétés d'ordre supérieur de la distribution (asymétrie ou aplatissement, par exemple). Il est possible aussi de déterminer la confiance qui peut être accordée au fait que ces estimations portant sur un échantillon offrent une bonne représentation des conditions physiques réelles. En appliquant des techniques de probabilité et de statistique à la distribution de fréquence modélisée, il est possible d'obtenir des estimations relatives à d'autres caractéristiques encore, notamment la probabilité qu'une observation dépasse une valeur donnée. Toutes ces opérations se révèlent bien plus difficiles, voire impossibles à réaliser quand on se sert des données originales et non de la distribution de fréquence qu'on a pu y ajuster.

5.4 TRANSFORMATION DE DONNÉES

On utilise beaucoup la loi normale ou de Gauss, car elle a fait l'objet de nombreuses études en statistiques. Quand la distribution des données n'est pas conforme à la loi normale, il est intéressant de transformer les données pour que leur distribution s'approche de cette loi, compte tenu des nombreuses possibilités d'inférence qu'offre celle-ci. Il faut procéder avec circonspection pour qu'une fois transformées les données continuent bien de représenter les mêmes processus physiques que les données originales et qu'on puisse ainsi en tirer des conclusions fondées.

Il existe plusieurs façons de savoir si une distribution s'éloigne de la loi normale. Il est relativement facile d'examiner une représentation graphique, notamment un histogramme, un diagramme de dispersion, un diagramme probabilité-probabilité (P-P) ou un diagramme quantile-quantile (Q-Q). Pour rechercher davantage d'objectivité dans l'évaluation, les techniques à employer vont du simple examen de l'asymétrie et de l'aplatissement (voir la section 4.4) d'une courbe de distribution à des tests de normalité proposant des inférences.

Avant de procéder à une transformation, l'analyste doit s'assurer qu'il existe une raison valable pour laquelle la distribution des données ne correspond pas à la loi normale. Des raisons non valables sont par exemple des erreurs dans la saisie des données ou des valeurs manquantes qui n'ont pas été signalées. La présence de valeurs aberrantes peut aussi constituer une raison non

valable, puisqu'elles peuvent très bien représenter une partie correspondant à la réalité dans une distribution normale.

Les transformations les plus usuelles visant à normaliser les données sont les suivantes: la racine carrée, la racine cubique, la transformation logarithmique et la transformation inverse. La racine carrée rend les valeurs inférieures à 1 relativement plus grandes et les valeurs supérieures à 1 relativement plus petites. Quand les valeurs peuvent être soit positives soit négatives, il faut y ajouter une constante pour qu'elles soient toutes supérieures ou égales à 0 avant d'en calculer la racine carrée. La racine cubique a un effet analogue, mais ne nécessite pas de décaler les données pour éliminer les valeurs négatives. Les transformations logarithmiques compriment l'étendue des valeurs en diminuant les valeurs relativement élevées et en augmentant les valeurs relativement basses. Il faut d'abord ajouter une constante aux valeurs, si certaines sont inférieures ou égales à 0. Par une transformation inverse, les valeurs les plus faibles deviennent très grandes et inversement; il faut aussi éviter les valeurs nulles.

Ces transformations sont décrites dans l'ordre relatif de leur puissance, de la plus faible à la plus forte. Le mieux consiste à parvenir à normaliser les données en les transformant le moins possible. Quand un élément météorologique ou climatique se caractérise intrinsèquement par une distribution de fréquence très éloignée de la loi normale, notamment la distribution en U des données sur la nébulosité ou sur l'insolation, il n'existe pas de transformation simple qui puisse normaliser les données.

Toutes les transformations compriment davantage le côté droit d'une distribution que son côté gauche; elles réduisent davantage les valeurs élevées qu'elles ne haussent les valeurs basses. Elles donnent donc de bons résultats avec les distributions qui présentent une asymétrie positive, notamment dans le cas de données sur les précipitations et sur la vitesse du vent. Quand une distribution présente une asymétrie négative, on inverse l'asymétrie (les valeurs sont multipliées par -1 et on y ajoute une constante pour que toutes les valeurs soient supérieures à 0) avant d'appliquer la transformation, puis on l'inverse de nouveau pour retrouver l'ordre d'origine des données sur l'élément étudié.

Les transformations de données présentent de nombreux avantages, mais il convient d'y avoir recours à bon escient et d'une manière éclairée. Toutes les transformations décrites ci-devant ont pour but de normaliser les données en réduisant leur espacement relatif à la droite de la distribution davantage qu'à la gauche de la distribution. Le fait même d'altérer les distances relatives entre les points de données, ce que ces transformations visent pour normaliser les données, soulève cependant des questions quant à l'interprétation des données. Tous les points de données demeurent dans l'ordre relatif qui était le leur avant la transformation, ce qui permet une interprétation des résultats portant sur l'accroissement des valeurs de l'élément. Il est cependant probable que les distributions transformées se révéleront plus complexes à interpréter du point de vue physique, compte tenu de la nature curviligne des transformations. C'est donc avec discernement que l'analyste devra interpréter des résultats fondés sur des données transformées.

5.5 ANALYSE DE SÉRIES CHRONOLOGIQUES

Les mêmes principes régissent l'ajustement de modèles (voir la section 5.3) et l'analyse de séries chronologiques. Un modèle est ajusté à la série de données; il peut s'agir d'un modèle linéaire, curviligne, exponentiel, périodique ou de toute autre fonction mathématique. C'est en général en se servant de la méthode des moindres carrés (qui consiste à minimiser la somme des carrés des distances des points par rapport à la courbe d'ajustement) qu'on obtient le meilleur ajustement (celui qui minimise les différences entre les données de la série étudiée et le modèle choisi). On examine les résidus de l'ajustement pour en tirer des configurations spatiales particulières et si c'est le cas, le modèle est ajusté pour en tenir compte.

Pour analyser les séries chronologiques en climatologie, on a principalement recours à l'analyse harmonique et à l'analyse spectrale qui décomposent les séries en leurs composantes en fonction du temps ou de la fréquence. La stationnarité (caractère d'une série dont la moyenne et la variance ne varient pas sur toute son étendue) constitue une hypothèse de première importance pour ces modèles. C'est une condition à laquelle les données climatologiques ne se conforment pas en général, même quand elles sont homogènes (voir la section 5.2).

Les analyses de Gabor et par ondelettes sont des prolongements de l'analyse spectrale classique. En modélisant des sous-intervalles des séries chronologiques suivant différentes échelles ou résolutions, on lève partiellement la condition de stationnarité. Ces types d'analyses réussissent particulièrement bien à représenter des séries chronologiques dont les sous-intervalles présentent des caractères différents. Les analyses par ondelettes donnent de bons résultats sur des séries chronologiques présentant des pics et des ruptures marquées. À comparer aux techniques classiques, elles sont particulièrement bien adaptées aux signaux dont l'amplitude et la fréquence varient dans le temps. Parmi leurs principaux avantages, ces analyses «locales» offrent la possibilité de présenter les séries chronologiques des processus climatologiques suivant les coordonnées que sont la fréquence et le temps, et donc d'étudier et de visualiser l'évolution de divers modes de variabilité sur une longue période. On s'en sert non seulement pour mettre en évidence les échelles non stationnaires des variations, mais aussi comme outil d'analyse des données pour fournir une première interprétation concernant un jeu de données. Ces méthodes ont connu de nombreuses applications en climatologie, notamment dans les études du phénomène El Niño-Oscillation australe (ENSO), de l'oscillation de l'Atlantique Nord, de la turbulence atmosphérique, des relations spatiotemporelles touchant les précipitations et des caractéristiques des vagues océaniques.

Ces méthodes présentent aussi certains inconvénients. En ce qui concerne l'analyse par ondelettes, la difficulté principale réside dans le fait qu'on peut se baser sur une multitude de fonctions d'ondelettes et que les résultats varient souvent en fonction de l'ondelette qu'on aura sélectionnée. L'interprétation des résultats est donc délicate, puisqu'il est possible, à partir d'un même jeu de données, de parvenir à des conclusions différentes compte tenu de la fonction mathématique sélectionnée. Il importe, dans la sélection de la fonction d'ondelette, d'établir un lien plausible entre la fonction choisie et la réalité physique. Les analyses de Gabor et par ondelettes sont des champs d'études récents, et bien que le raisonnement mathématique soit bien défini, il se peut qu'on parvienne à l'avenir à perfectionner ces techniques et leurs méthodes d'application pour en atténuer les inconvénients.

L'autorégression et la moyenne mobile sont d'autres techniques usuelles d'analyse des séries chronologiques. Par autorégression, on entend la régression linéaire d'une valeur appartenant à une série chronologique par rapport à une ou plusieurs valeurs antérieures de cette série (autocorrélation). La méthode des moyennes mobiles exprime une série d'observations sous la forme d'une fonction d'une série aléatoire. Le modèle autorégressif à moyenne mobile (ARMA) combine ces deux méthodes. Un modèle ARMA qui accepte un manque de stationnarité est un modèle autorégressif à moyenne mobile intégrée (ARIMA). Ces modèles de régression peuvent se révéler d'une complexité dépassant le besoin et se traduire par un surapprentissage. On parle de surapprentissage quand un modèle épouse de trop près (différences minimales entre le modèle et les données) l'échantillon d'apprentissage censé représenter un processus physique. Il peut se révéler plus judicieux de conserver un ajustement plus lâche, mais qui corresponde mieux à la réalité du processus. D'autres problèmes émanent de la non-stationnarité des paramètres utilisés pour définir le modèle, de résidus non aléatoires (indiquant un modèle incorrect) et de la périodicité inhérente aux données, mais qui n'est pas modélisée. Un moyen efficace de déceler un surapprentissage consiste à procéder à une validation du modèle par partition, c'est-à-dire à ne prendre qu'une partie des données disponibles pour la phase d'apprentissage du modèle, puis de valider le modèle sur les données restantes qui n'ont pas servi à son élaboration.

Une fois qu'une courbe d'une forme acceptable modélise les données de la série chronologique et que l'ajustement est validé, les propriétés mathématiques qui y correspondent peuvent servir à faire des estimations auxquelles on ne pourrait parvenir à l'aide des données originales. On peut

ainsi mesurer les tendances, l'évolution cyclique ou l'autocorrélation et la persistance, ou encore évaluer le degré de confiance de ces mesures.

5.6 ANALYSE À PLUSIEURS VARIABLES

Les jeux de données à plusieurs variables regroupent des observations de plusieurs éléments ou d'un seul élément à différents emplacements. On étudie souvent ce type de jeux de données pour de multiples raisons. Les principales sont les suivantes: voir si un jeu de données complexe peut être représenté par un moyen relativement simple, si les observations peuvent être rangées en groupes et être classées, s'il est possible de regrouper aussi les éléments et si divers éléments présentent une interdépendance. Ces jeux de données servent aussi à tester des hypothèses au sujet des données. L'ordre chronologique des observations n'entre en général pas en ligne de compte; les séries chronologiques de plus d'un élément sont habituellement considérées comme un sujet d'analyse à part entière, notamment avec des techniques comme l'analyse spectrale croisée.

L'analyse en composantes principales, qu'on appelle parfois analyse des fonctions orthogonales empiriques, est une technique qui permet de réduire les dimensions des données à plusieurs variables. Ce processus, largement utilisé dans l'analyse des données climatologiques, simplifie les jeux de données complexes. Grâce à cette méthode, on décompose plusieurs observations corrélées en un nouvel ensemble de fonctions (orthogonales) sans corrélation qui contiennent la variance originale des données. Ces fonctions orthogonales empiriques, qu'on appelle donc aussi composantes principales, sont ordonnées de manière à ce que la première composante soit celle qui explique le mieux la variance, la deuxième expliquant la deuxième portion la plus grande de la variance et ainsi de suite. Comme il suffit de quelques composantes en général pour expliquer la variance, la méthode réduit efficacement le «bruit» émanant d'un champ d'observation. Souvent, chaque composante peut être reliée à un élément météorologique ou climatologique en particulier. On utilise ainsi cette méthode pour analyser une diversité de champs, notamment les températures de surface de la mer, les régimes de température et de précipitations à la surface des terres émergées, à l'échelle régionale, les chronologies des cernes de croissance des arbres, la pression au niveau de la mer, les polluants atmosphériques, les propriétés radiatives de l'atmosphère et les scénarios climatiques. On s'est aussi servi des composantes principales en tant qu'outil de reconstruction du climat, notamment pour représenter un élément climatique suivant une grille spatiale à l'aide de données indirectes quand on ne dispose pas d'observations pour cet élément.

L'analyse factorielle réduit un grand ensemble d'observations à un ensemble plus petit de facteurs. Dans les publications portant sur la météorologie et sur la climatologie, on parle aussi d'analyse en composantes principales avec rotation des axes. La différence par rapport à l'analyse en composantes principales, c'est que les facteurs ne sont pas sans corrélation. Étant donné qu'un facteur peut représenter les observations de plus d'un élément, son interprétation se révèle souvent ardue du point de vue météorologique ou climatologique. La méthode est surtout utilisée dans les études de climatologie synoptique.

L'analyse de groupements ou analyse typologique consiste à répartir les observations en groupes dont les caractères sont analogues. Pour former de tels groupes, on dispose de nombreuses méthodes et différentes méthodes s'appliquent suivant le schéma de répartition des points. La plupart des méthodes se basent cependant sur la mesure dans laquelle la distance entre les moyennes de deux groupes est plus grande que la distance moyenne au sein d'un groupe. Il peut ne pas s'agir d'une distance euclidienne, mais elle doit obéir à certains critères. Un premier critère est celui selon lequel la distance entre le point A et le point B est égale à la distance entre le point B et le point A (symétrie). Un deuxième critère indique que la distance doit avoir une valeur positive (non-négativité). Un troisième critère détermine que pour trois points formant un triangle, la longueur d'un des côtés du triangle doit être inférieure ou égale à la somme des longueurs des deux autres côtés (inégalité triangulaire). Un quatrième critère précise que si la distance entre A et B est nulle, alors A et B représentent le même point (détermination).

La plupart des techniques répartissent de façon itérative les données en un nombre de groupes de plus en plus grand, si bien que l'analyste doit donc déterminer à quel moment le nombre de groupes est suffisant. Il n'existe malheureusement aucune règle objective pour l'aider à prendre cette décision. L'analyste doit donc se fonder sur ses connaissances et sa propre expérience pour décider du moment où il aura obtenu un nombre de groupes satisfaisant sur le plan météorologique ou climatologique. L'analyse de groupements est utilisée à diverses fins, notamment pour former des régions homogènes par rapport aux précipitations, pour analyser des climatologies synoptiques et pour prévoir la qualité de l'air en milieu urbain.

L'analyse des corrélations canoniques vise à déterminer l'interdépendance entre deux groupes d'éléments. La méthode recherche une combinaison linéaire de la distribution du premier élément qui produise une corrélation avec la distribution du second. Cette combinaison linéaire est extraite du jeu de données et le processus est répété sur les résidus, avec pour contrainte qu'il n'y ait pas de corrélation entre la deuxième combinaison linéaire et la première. Le processus se répète jusqu'à ce que la combinaison linéaire ne soit plus significative. Cette analyse sert par exemple à établir des prévisions basées sur des téléconnexions, à procéder à une réduction d'échelle statistique (voir la section 6.7.5), à déterminer des régions homogènes pour la prévision des crues dans un bassin non jaugé ou à reconstruire une répartition spatiale du vent à partir de champs de pression.

Toutes ces méthodes sont basées sur des hypothèses et comportent des inconvénients. L'interprétation des résultats obtenus repose beaucoup sur le fait que les hypothèses se vérifient et sur l'expérience de l'analyste. D'autres méthodes, comme la régression multiple ou l'analyse de covariance, présentent encore plus de restrictions pour les données météorologiques ou climatologiques. L'analyse à plusieurs variables est complexe; les résultats possibles étant nombreux il y a lieu de l'appliquer avec prudence.

5.7 ANALYSE COMPARATIVE

En adaptant la fonction d'un modèle aux données, qu'il s'agisse d'une distribution de fréquence ou d'une série chronologique, il est possible de se fonder sur les caractères du modèle pour poursuivre l'analyse. Comme en général les propriétés des caractères du modèle ont déjà été vérifiées, il est possible d'en tirer toute une série de conclusions. Quand les caractères du modèle n'ont pas été approfondis, il peut être utile d'avoir recours au *bootstrap* (méthode d'autoamorçage). Le *bootstrap* est une méthode statistique permettant d'estimer les caractères d'un modèle à partir d'un grand nombre d'échantillons tirés de façon aléatoire de la série des observations originales. On l'utilise en remplacement d'inférences tirées d'hypothèses paramétriques, quand on a des doutes sur les hypothèses, quand l'inférence paramétrique se révèle impossible ou quand l'inférence paramétrique exige le recours à des formules très complexes. Cette technique est simple à appliquer, mais elle peut dissimuler sa propre série d'hypothèses que d'autres méthodes mettraient en avant.

Il existe en particulier bon nombre de tests qui permettent de comparer les caractères de deux modèles et de déterminer ainsi quelle confiance on peut accorder dans le fait que les deux jeux de données modélisés partagent ces caractères. Quand on compare deux modèles, la première étape consiste à sélectionner les caractères sur lesquels la comparaison va porter. La comparaison peut ainsi porter sur la moyenne, la médiane, la variance ou la probabilité d'un événement dans une distribution, ou encore la phase ou la fréquence si l'on prend en considération une série chronologique. En principe, tout caractère des modèles qu'il est possible de calculer peut faire l'objet d'une comparaison, mais il convient de se fonder sur une raison plausible (arguments physiques) pour procéder à une telle comparaison.

L'étape suivante consiste à formuler l'hypothèse nulle, c'est-à-dire une hypothèse jugée vraie avant de commencer un test quel qu'il soit et, dans ce cas, il s'agit généralement de l'hypothèse selon laquelle les caractères des modèles sont les mêmes. La contre-hypothèse est l'inverse: les caractères modélisés sont différents.

Il faut ensuite sélectionner un test bien adapté pour comparer les caractéristiques des deux modèles. Certains tests sont des tests paramétriques; ils reposent sur des hypothèses portant sur la distribution, notamment quant à sa normalité. Les tests paramétriques comprennent le test de Student (de comparaison des moyennes) et le test de Fisher (de comparaison des variances). Il existe aussi des tests non paramétriques qui ne posent pas d'hypothèses quant à la distribution. Ils comprennent les tests des signes (de comparaison des médianes) et le test de Kolmogorov-Smirnov (de comparaison des distributions). Les tests paramétriques sont en général plus fiables quant aux conclusions qu'on peut en tirer, à condition toutefois que les hypothèses relatives aux distributions se vérifient.

Le rejet d'une hypothèse vraie (ou l'acceptation d'une hypothèse fausse) s'exprime en fonction de sa vraisemblance par un niveau de confiance ou de probabilité. Le test sélectionné doit montrer si l'hypothèse nulle peut être acceptée pour un niveau de confiance requis. Certains tests font apparaître à quel niveau de confiance l'hypothèse nulle peut être acceptée. Si l'hypothèse nulle est rejetée, la contre-hypothèse doit être acceptée. En appliquant ce processus, l'analyste sera probablement en mesure de déclarer par exemple que les moyennes de deux jeux d'observations sont égales selon un niveau de confiance de 99 % et qu'il n'y a donc que 1 % de chances pour que les moyennes soient différentes.

Quelle que soit l'hypothèse acceptée, qu'il s'agisse de l'hypothèse nulle ou de la contre-hypothèse, la conclusion peut se révéler erronée. On appelle erreur de première espèce, l'erreur consistant à rejeter l'hypothèse nulle alors qu'elle est vraie. On appelle erreur de seconde espèce, l'erreur consistant à accepter l'hypothèse nulle alors qu'elle est fausse. Malheureusement, en réduisant le risque de première espèce, on augmente celui de seconde espèce, si bien qu'il est nécessaire de trouver un équilibre entre ces deux types d'erreurs. Cet équilibre devrait se baser sur la vraisemblance de l'un ou l'autre des deux types d'erreurs. Dans tous les cas, il est possible de calculer selon quelle probabilité la conclusion est plausible, ce qu'il y a lieu de consigner avec ladite conclusion.

5.8 LISSAGE

Les méthodes de lissage servent de trait d'union entre la méthode non paramétrique, selon laquelle aucune hypothèse n'est posée se fondant sur une structure explicite des données d'observation, et la méthode paramétrique, selon laquelle des hypothèses solides sont posées. En partant de l'hypothèse faible qu'une courbe lissée peut représenter la vraie distribution des données, l'analyste se donne la possibilité de faire apparaître un schéma de répartition sous-jacent. Le lissage augmente les signaux de régimes climatiques tout en réduisant le bruit découlant de fluctuations aléatoires. On utilise cette technique notamment pour procéder à une analyse exploratoire des données, pour construire des modèles, pour vérifier le bon ajustement d'une courbe (lissée) représentative par rapport aux données, pour procéder à une estimation paramétrique ou pour apporter des modifications à des méthodes normalisées.

L'estimation par noyau est une méthode de lissage (exemple: lissage par les moyennes mobiles, lissage gaussien ou lissage binomial). Les paramètres de lissage fournissent une estimation de la valeur en un point donné en associant les valeurs observées dans le voisinage de ce point. Pour cela, on a souvent recours à une moyenne pondérée, le coefficient de pondération étant fonction de la distance par rapport au point en question. On parle de fenêtre pour désigner l'étendue du voisinage, et plus cette fenêtre est large, plus le lissage est important. Les estimateurs à noyau d'une densité donnée sont simples, mais ils présentent des inconvénients. L'estimation peut être faussée quand la région de définition des données est bornée, notamment près du début et de la fin d'une série chronologique. En utilisant la même fenêtre pour l'ensemble de la courbe, c'est un degré de lissage constant qui est appliqué. L'estimation tend aussi à aplatir les pics et les creux de la courbe de distribution des données. Pour améliorer cette méthode d'estimation par noyau, il est notamment possible de corriger les erreurs aux bornes en utilisant des noyaux particuliers uniquement près des bornes et en faisant varier les fenêtres dans les différentes parties de la

distribution de données. Les transformations de données (voir la section 5.4) peuvent aussi apporter des améliorations.

Les estimateurs splines s'ajustent à une distribution de fréquence par segmentation en sous-intervalles de cette distribution à l'aide de polynômes de degrés variables. Le nombre et l'emplacement des sous-intervalles ont ici aussi un effet sur le degré de lissage. L'estimation au voisinage des bornes pose aussi problème. Les valeurs aberrantes ont un effet particulièrement néfaste sur une estimation spline, en particulier dans les régions pour lesquelles on ne dispose que de peu d'observations.

Il existe aussi divers paramètres de lissage, plus perfectionnés, souvent de nature non paramétrique, notamment l'estimation par maximum de vraisemblance local, particulièrement utile quand une connaissance préalable du comportement du jeu de données peut conduire à une bonne «première approximation» du type de courbe qu'on prendra pour modèle. Ces estimateurs sont parfois difficiles à interpréter de façon théorique.

Avec des données multidimensionnelles, le lissage devient plus complexe, compte tenu du nombre de possibilités à envisager et du nombre de paramètres de lissage qu'il faut choisir. Ainsi plus le nombre d'éléments augmente, plus le lissage gagne progressivement en complexité. La plupart des diagrammes se résument à deux dimensions seulement, ce qui restreint l'inspection visuelle pour le choix d'un paramètre de lissage. Il est possible d'utiliser la densité des noyaux pour lisser des données multidimensionnelles, mais les problèmes que posent l'estimation aux bornes et l'utilisation d'une fenêtre fixe peuvent être encore plus délicats à résoudre que dans le cas des données unidimensionnelles.

Un espace multidimensionnel présente généralement de vastes régions vides à moins que le nombre de valeurs soit très grand. Réduire le nombre de dimensions des données, par exemple par une analyse des composantes principales, constitue une technique de lissage. Cette réduction des dimensions doit avoir pour but de préserver, dans les données de moindres dimensions, toute structure où signal intéressant figurant dans les données originales, tout en éliminant les attributs ne présentant pas d'intérêt ou les bruits.

La régression est un des outils de lissage les plus employés. Les modèles de régression, tant linéaires que non linéaires, sont des outils puissants pour modéliser un élément cible sous la forme d'une fonction d'un ensemble de prédicteurs, ce qui permet d'en décrire les relations et d'établir des tests concernant la robustesse de ces relations. Ces modèles peuvent cependant poser les mêmes problèmes que tout autre modèle paramétrique, à savoir que les hypothèses de départ influent sur la validité des inférences et des prévisions.

Les modèles de régression se heurtent aussi à des problèmes aux bornes des séries considérées et de lissage irréaliste de sous-intervalles sur l'étendue des données. Il est possible de résoudre ces problèmes en pondérant les sous-intervalles du domaine des données à l'aide de fenêtres variables et en ayant recours à une estimation polynomiale près des bornes. Les estimations par régression, fondées sur une estimation par la méthode des moindres carrés, subissent aussi l'influence des observations présentant des valeurs inhabituelles (valeurs aberrantes). Quand une valeur s'écarte grandement de la majorité des autres données, la courbe lissée tend à se rapprocher, plus que ce qui paraît justifié, de la valeur aberrante. Quand on fait appel à un lissage non paramétrique ajusté, il est souvent difficile de déterminer sans ambiguïté qu'une valeur est aberrante, puisque l'intention est de lisser toutes les observations. Une valeur aberrante peut soit correspondre à une variation naturelle sur le plan météorologique ou climatologique, soit constituer une valeur qu'il faudrait rejeter. Il est donc nécessaire d'examiner plus avant les valeurs aberrantes pour en garantir la validité. Les estimations par régression sont aussi perturbées par la corrélation. Les estimations se fondent sur l'hypothèse selon laquelle toutes les erreurs sont statistiquement indépendantes les unes des autres; une corrélation peut mettre à mal les propriétés asymptotiques des estimateurs et le comportement des fenêtres déterminées à partir des données.

5.9 ESTIMATION DE DONNÉES

Une des principales applications des statistiques à la climatologie concerne l'estimation des valeurs des éléments climatiques quand on ne dispose pas de données d'observation ou que de trop peu de ces données ou alors quand les données normalement attendues viennent à manquer. Dans de nombreux cas, les utilisateurs ne pourront pas attendre, pour planifier et exécuter leurs projets, que le nombre d'observations météorologiques ou climatologiques soit suffisant. On utilise alors l'estimation pour élargir les jeux de données nécessaires. L'estimation joue aussi un rôle dans le domaine du contrôle de la qualité; on peut ainsi comparer les valeurs observées à d'autres valeurs qui l'entourent aussi bien dans le temps que dans l'espace. Les techniques d'estimation des données représentent essentiellement des applications des statistiques, mais elles doivent aussi tenir compte des propriétés physiques du système étudié. Dans tous les cas, il est essentiel que les valeurs estimées de façon statistique soient réalistes et coïncident avec la réalité physique des éléments.

L'interpolation utilise les données qui se situent avant et après une valeur manquante (interpolation temporelle) ou qui entoure la valeur manquante (interpolation spatiale), pour fournir une estimation de la valeur manquante. Dans certains cas, l'estimation de la valeur manquante fait appel à un processus simple, par exemple le calcul de la moyenne des valeurs observées de part et d'autre de la valeur manquante. On utilise aussi des méthodes d'estimation complexes qui tiennent compte de corrélations avec d'autres éléments. Il s'agit notamment des moyennes pondérées, des fonctions splines, des régressions linéaires et du krigeage. Ces méthodes peuvent reposer uniquement sur les observations d'un élément ou prendre en compte d'autres informations, telles que la topographie ou des sorties de modèles numériques. On peut employer les fonctions splines quand les variations spatiales sont régulières. La régression linéaire permet d'utiliser toutes sortes d'informations. Le krigeage est une méthode géostatistique qui nécessite l'estimation des covariances du champ étudié. Le cokrigeage renforce le krigeage en y ajoutant l'information apportée par un deuxième élément indépendant.

L'extrapolation élargit l'étendue des données disponibles. Les valeurs extrapolées présentent des risques d'erreur plus importants, car on se sert de relations dérivées d'un ensemble de données pour les appliquer en dehors du domaine de ces données. Même si les relations empiriques mises en évidence pour un emplacement donné ou une période de temps donnée semblent justes, il faut faire preuve de prudence quand on les applique à un autre emplacement ou une autre période de temps, car les propriétés physiques sous-jacentes risquent d'être différentes. L'extrapolation fait appel aux mêmes méthodes que l'interpolation.

5.9.1 Méthodes mathématiques d'estimation

Les méthodes mathématiques reposent uniquement sur les caractères géométriques ou polynomiaux d'un ensemble de valeurs ponctuelles pour créer une surface continue. La pondération par l'inverse de la distance et l'ajustement de courbes, notamment les fonctions splines, en sont des exemples. Ces méthodes sont des interpolateurs exacts; les valeurs observées sont conservées à l'emplacement où elles ont été mesurées.

La pondération par l'inverse de la distance se fonde sur la distance qui sépare l'emplacement pour lequel il faut interpoler une valeur et les emplacements où les observations ont été exécutées. Par opposition à la méthode simple qui consiste à choisir l'observation de l'emplacement le plus proche, la méthode de la pondération par l'inverse de la distance combine des observations provenant de plusieurs emplacements voisins. Les observations sont pondérées en fonction de la distance qui les sépare du lieu cible; les stations les plus proches ont davantage de poids que celles qui sont plus éloignées. On applique souvent un seuil soit pour limiter la distance des emplacements dont on va utiliser les observations, soit pour limiter le nombre des observations à prendre en compte. On utilise souvent aussi la pondération par l'inverse du carré de la distance, ce qui donne davantage de poids encore aux emplacements les plus proches. Cette méthode s'affranchit de tout raisonnement physique: on part du principe que plus l'emplacement de l'observation est proche de l'emplacement cible pour lequel la donnée est estimée, meilleure est

l'estimation. Il y a lieu de valider cette hypothèse avec prudence, car il se peut qu'elle ne trouve aucun fondement météorologique ou climatologique.

Les estimateurs splines présentent les mêmes inconvénients que la pondération par l'inverse de la distance. Le champ qui en résulte repose sur l'hypothèse que les processus physiques peuvent être représentés par la fonction spline et il est rare que cette hypothèse trouve un fondement intrinsèque. Les deux méthodes sont surtout efficaces sur des surfaces lisses, si bien qu'elles peuvent ne pas proposer de représentations adéquates sur des surfaces présentant des fluctuations marquées.

5.9.2 Estimation fondée sur des relations physiques

On peut se fonder sur la cohérence qui existe du point de vue physique entre différents éléments pour établir des estimations. En cas de besoin, il est possible par exemple d'utiliser des éléments comme la durée d'insolation et la nébulosité pour estimer une valeur manquante relative au rayonnement global. On peut aussi se servir de données indirectes pour étayer une estimation. En comparant des valeurs mesurées simultanément à deux stations proches l'une de l'autre, on s'aperçoit parfois que la différence ou le quotient de ces valeurs est à peu près constant. Cela est plus souvent vrai pour des valeurs synthétisées (données mensuelles ou annuelles) que pour des valeurs portant sur des intervalles de temps plus courts (données quotidiennes, notamment). Il est alors possible d'utiliser cette différence ou ce quotient constant pour estimer les données. Pour que ces méthodes donnent des résultats significatifs, les séries à comparer doivent être suffisamment corrélées. Le choix de la méthode est alors fonction de la structure temporelle des deux séries. On peut se servir de la différence lorsque l'élément météorologique ou climatologique présente des variations relativement semblables d'une station à l'autre. La méthode du quotient peut s'appliquer lorsque les variations temporelles des deux séries ne sont pas semblables, mais néanmoins proportionnelles (c'est en général le cas des séries dont la valeur minimale est zéro, comme pour les précipitations ou la vitesse du vent par exemple). Quand les hypothèses ne sont pas vérifiées, il ne faut pas avoir recours à ces techniques, en particulier l'emploi des différences alors que les variances des séries aux deux stations ne sont pas égales. La régression, l'analyse discriminante (occurrence du phénomène) et l'analyse des composantes principales sont des outils plus complexes basés sur la cohérence physique.

Les méthodes déterministes se fondent sur une relation connue entre une valeur *in situ* (le prédicand) et les valeurs d'autres éléments (les prédicteurs). Cette relation se base souvent sur une connaissance empirique du prédicand et du prédicteur. La relation empirique peut être mise en évidence par une analyse soit physique soit statistique; c'est fréquemment une combinaison dans laquelle la relation statistique est dérivée à partir de valeurs représentant un processus physique connu. On se sert souvent de méthodes statistiques comme la régression pour établir de telles relations. La méthode déterministe étant stationnaire dans le temps et l'espace, il faut la considérer comme une méthode globale faisant apparaître les propriétés de la totalité de l'échantillon étudié. Les prédicteurs peuvent être d'autres éléments observés ou encore des paramètres géographiques, comme l'altitude, la pente ou la distance par rapport à la mer.

5.9.3 Méthodes d'estimation spatiale

L'interpolation spatiale est une procédure visant à estimer des propriétés en des lieux pour lesquels on ne dispose pas d'échantillons, mais qui se situent dans une région pour laquelle on dispose d'observations. La probabilité pour que des stations mesurent des valeurs voisines est en effet plus grande pour des stations proches que pour des stations éloignées (cohérence spatiale). Toutes les méthodes d'interpolation spatiale se fondent sur des considérations, des hypothèses et des conditions théoriques qui doivent être remplies pour qu'il soit possible d'utiliser correctement la méthode. Par conséquent, quand il s'agit de choisir un algorithme d'interpolation spatiale, il faut d'abord examiner l'objet de l'interpolation, les caractères du phénomène sur lequel l'interpolation doit porter, ainsi que les contraintes que présente la méthode.

Les méthodes stochastiques d'interpolation spatiale sont souvent appelées méthodes géostatistiques. Elles font en général appel à une fonction qui modélise une relation spatiale pour décrire, par rapport à la distance qui sépare les emplacements, la corrélation entre les valeurs recueillies à ces différents emplacements. L'interpolation elle-même est étroitement liée à la régression. Ces méthodes exigent que certaines hypothèses statistiques soient vérifiées, par exemple que le processus applique la loi normale, qu'il soit stationnaire dans l'espace ou qu'il soit constant dans toutes les directions.

Bien qu'elle ne soit pas nettement meilleure que d'autres techniques, celle du krigeage est une méthode d'interpolation spatiale qu'on utilise souvent pour l'interpolation d'éléments tels que la température de l'air et du sol, les précipitations, les polluants atmosphériques, le rayonnement solaire et le vent. Cette technique se fonde sur l'accroissement de la variance en fonction de la distance qui sépare les points pris en considération, ce qui s'exprime sous la forme d'un variogramme. Le variogramme fait apparaître comment la différence moyenne entre les valeurs des différents points évolue en fonction de la distance et de la direction entre les points. Pour établir un variogramme, il est nécessaire de poser des hypothèses quant à la nature de la variation observée à la surface. Certaines de ces hypothèses portent sur la constance des moyennes sur l'intégralité de la surface considérée, l'existence de tendances sous-jacentes et le caractère aléatoire et indépendant des variations. Le but recherché est d'établir une relation entre toutes les variations et la distance. Il est possible de choisir un modèle de variogramme qui corresponde au processus physique étudié (par exemple sphérique, exponentiel, gaussien ou linéaire).

Parmi les inconvénients que présente le krigeage, citons la puissance de calcul que nécessitent les grands jeux de données, la complexité de l'estimation d'un variogramme et le caractère déterminant des hypothèses qu'il faut poser quand à la nature statistique de la variation. Ce dernier problème est le plus épineux. Bien que les nombreuses variantes du krigeage procurent une certaine souplesse à cette méthode, celle-ci a été mise au point initialement pour des applications dans lesquelles les distances entre les emplacements d'observation sont faibles. Dans le cas des données climatologiques, les stations d'observation sont généralement éloignées les unes des autres, si bien que l'hypothèse de variation progressive des champs entre les points manque souvent de réalisme.

Étant donné que les champs météorologiques ou climatologiques, notamment les précipitations, sont fortement influencés par la topographie, certaines méthodes incorporent la topographie dans l'interpolation de données climatologiques en combinant l'analyse des composantes principales, la régression linéaire multiple et le krigeage, à savoir notamment la méthode AURELHY (Analyse Utilisant le RELief pour l'HYdrométéorologie) et le modèle PRISM (*Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model*) d'interpolation prenant en compte l'altitude et la pente. Selon la méthode utilisée, la topographie est décrite par l'altitude, la pente et l'orientation de la pente, en général sous forme de moyenne pour une zone donnée. Les caractéristiques topographiques sont en général de résolution spatiale plus fine que les données climatologiques.

Parmi les méthodes les plus perfectionnées reposant sur des bases physiques, il faut aussi citer celles qui s'attachent à décrire la dynamique du système climatique. En prévision météorologique et modélisation du climat, il est pratique courante d'employer ce type de modèles (voir la section 6.7). La puissance de calcul et la capacité de stockage qui leur sont indispensables devenant plus facilement accessibles, ces modèles sont employés de plus en plus dans le domaine de la surveillance du climat et, en particulier, pour l'estimation des valeurs des éléments climatiques dans les régions isolées pour lesquelles on ne dispose pas d'observation (voir la section 5.13 sur la réanalyse).

5.9.4 Estimation de séries chronologiques

Grâce à l'estimation, il est possible de combler les données manquantes que présentent souvent des séries chronologiques; il est possible aussi de calculer des valeurs à des échelles temporelles plus fines que celles des observations. La qualité de l'estimation est meilleure quand elle ne porte

que sur une ou quelques observations et non sur une longue période continue d'observations manquantes. En règle générale, plus la période à estimer est longue et plus le degré de confiance que l'on peut accorder aux estimations est faible.

Quand il s'agit d'analyser les données d'une seule station, pour remplacer une ou deux valeurs manquantes consécutives, on fait en général appel à des approximations simples par fonctions linéaires, polynomiales ou splines que l'on ajuste sur les observations effectuées juste avant et après la période à estimer. On prend donc pour hypothèse de départ que les conditions au cours de la période à estimer sont analogues à celles qui se sont produites juste avant et après celle-ci; il faut évidemment vérifier que cette hypothèse est vraie. Ce ne peut être le cas par exemple si l'opération porte sur des températures horaires et qu'un front très froid est passé au cours de la période à estimer. Pour ce qui est d'une estimation portant sur des périodes plus longues, on a recours en général à des techniques d'analyse de séries chronologiques (voir la section 5.5) appliquées à des parties de la série ne comportant pas de données manquantes. La modélisation sert ensuite à déterminer les périodes manquantes. Comme c'est le cas pour l'interpolation spatiale, il y a lieu de veiller à ce que les valeurs estimées par une interpolation temporelle soient plausibles. Les métadonnées ou d'autres corollaires concernant les séries chronologiques sont utiles à cet effet.

5.9.5 Validation

Pour procéder à une estimation, on se base sur une structure sous-jacente ou un raisonnement physique. Il est par conséquent très important de vérifier que les hypothèses émises au cours du processus d'estimation se vérifient. Dans le cas contraire, les valeurs estimées risquent fort d'être erronées. L'erreur peut de surcroît être grave et conduire à des conclusions incorrectes. L'analyse climatologique repose souvent sur des hypothèses de modélisation qui ne se vérifient pas. Prenons l'exemple d'une analyse spatiale. Pour pouvoir exécuter une interpolation entre des stations très éloignées, il faut connaître et pouvoir modéliser les régimes climatologiques entre ces stations. En réalité, de nombreux facteurs (notamment la topographie, des particularités locales ou la présence d'étendues d'eau) influent sur le climat d'une région. Si le modèle spatial ne prend pas en compte ces facteurs, les valeurs interpolées risquent d'être erronées. S'il s'agit d'une analyse temporelle, une interpolation visant à combler un manque de données important nécessite qu'on puisse utiliser les valeurs représentant les conditions antérieures et postérieures à la période à estimer. En réalité, plus la variabilité des régimes météorologiques que connaît l'emplacement étudié est importante, et plus il sera difficile de remplir cette condition; il se pourrait alors que les valeurs interpolées soient erronées.

C'est en fonction de ce à quoi doivent servir les données qu'on peut mesurer la gravité d'une erreur d'interpolation. Des jugements ou des conclusions se fondant sur des informations détaillées à micro-échelle pour un lieu relativement restreint sont beaucoup plus sujets à erreurs que s'ils reposaient sur des informations générales à macro-échelle pour une vaste région. Quand on procède à une estimation, il convient donc de bien prendre en considération la sensibilité des résultats à l'usage qui est fait des données.

La validation est un élément essentiel de l'interpolation spatiale. La validation par partition est une technique simple et efficace. Un échantillon relativement important du jeu de données sert à mettre au point les procédures d'estimation et un sous-ensemble plus petit de ce jeu de données est réservé pour tester le mode d'estimation retenu. Les données de ce petit sous-ensemble sont estimées à l'aide des procédures mises au point pour le grand échantillon, et le résultat obtenu est comparé aux valeurs observées. La validation croisée est également un outil simple et efficace permettant de comparer diverses hypothèses portant soit sur les modèles (notamment le modèle de variogramme et ses paramètres, ou l'étendue du voisinage utilisé pour le krigeage) soit sur les données, à l'aide uniquement de l'information comprise dans l'échantillon du jeu de données étudié. Pour procéder à une validation croisée, on retire une observation de l'échantillon de données, puis on procède à l'estimation de la valeur retirée en se basant sur le reste des observations. L'opération est répétée par le retrait d'une observation différente et ainsi de suite pour que chaque observation soit retirée successivement. Il est ensuite possible d'examiner plus

avant les résidus entre les valeurs observées et les valeurs estimées, soit par une analyse statistique soit par une analyse graphique. La validation croisée fournit aussi des indications quantitatives sur les performances des méthodes d'estimation. L'analyse spatiale des résidus permet souvent d'apporter des améliorations au modèle d'estimation.

5.10 ANALYSE DES VALEURS EXTRÊMES

La pratique de la climatologie exige des connaissances sur le comportement des valeurs extrêmes de certains éléments. Cela est vrai en particulier dans le domaine de la conception technique de structures sensibles aux conditions météorologiques ou climatologiques extrêmes (valeurs les plus élevées ou les plus basses). Les fortes précipitations par exemple, avec la hausse des débits qui en découle, mettent à mal les réseaux d'égouts, les barrages, les réservoirs et les ponts. Les vents forts augmentent la charge sur les bâtiments, les ponts, les grues, les arbres et les lignes électriques. Les toits doivent être construits pour résister à la surcharge que représentent les fortes chutes de neige. Les pouvoirs publics et les assurances peuvent être amenés à fixer des seuils au-delà desquels les dégâts occasionnés par des conditions extrêmes pourraient être pris en charge dans le cadre de plans de secours.

La période ou durée de retour, à savoir la moyenne de temps séparant un événement de grandeur donnée d'un second événement d'une grandeur égale ou supérieure, est une valeur qu'on utilise souvent comme critère de conception. Cette notion permet d'éviter d'adopter des mesures de sécurité élevée très coûteuses, mais aussi d'éviter que les équipements et structures concernés subissent des dégâts importants causés par les phénomènes extrêmes qui risquent de se produire au cours de leur durée de vie utile. Comme il se peut que les équipements et structures en question soient conçus pour durer plusieurs années voire des siècles, l'estimation de ces périodes de retour exige de la précision en tant que facteur déterminant de la conception. Il est possible aussi de prendre pour critère de conception le nombre d'occurrences prévues d'un phénomène dont la grandeur dépasse un seuil fixé.

5.10.1 Méthode de la période de retour

Les approches classiques de l'analyse des valeurs extrêmes modélisent le comportement des extrêmes en ajustant à la distribution des valeurs observées une distribution de probabilité qui lui coïncide. On associe aux distributions de valeurs extrêmes des hypothèses telles la stationnarité et l'indépendance des valeurs (voir le chapitre 4). Les trois distributions de valeurs extrêmes les plus connues sont les lois de Gumbel, de Fréchet et de Weibull. La loi généralisée des valeurs extrêmes (GEV) combine ces trois lois sous une seule formulation qui se caractérise par un paramètre de forme.

Les données auxquelles on adapte un modèle de distribution de valeurs extrêmes sont des valeurs maximales ou minimales observées au cours d'un intervalle de temps défini. Par exemple, si des températures quotidiennes sont observées pendant de nombreuses années, l'ensemble des valeurs maximales annuelles peut être représenté par une loi des valeurs extrêmes. Pour pouvoir construire et modéliser de façon appropriée un tel ensemble de données maximales ou minimales à partir de sous-intervalles du jeu de données complet, il faut disposer d'un volume de données important, ce qui limite fortement l'emploi de la méthode quand l'échantillon de données ne couvre qu'une période restreinte. Une autre solution consiste à sélectionner des valeurs supérieures à un seuil donné. La loi de Pareto généralisée est d'ordinaire utile pour un ajustement à des données dépassant un certain seuil.

Une fois qu'on a trouvé la loi qui modélise l'échantillon de valeurs extrêmes, on peut calculer les périodes de retour. Une période de retour correspond à la fréquence moyenne à laquelle on s'attend à ce qu'une valeur soit égalee ou dépassée (une fois tous les vingt ans par exemple). Bien qu'il soit possible par le calcul mathématique d'établir des périodes de retour particulièrement longues, on ne pourra accorder que peu de confiance à de tels résultats. En règle générale, la

confiance accordée à une période de retour décroît rapidement quand sa valeur dépasse environ le double de la durée du jeu de données original.

Compte tenu des graves conséquences que les phénomènes climatiques extrêmes peuvent avoir aussi bien sur les systèmes naturels que sur les activités humaines, il importe de savoir si les extrêmes climatiques évoluent et de quelle manière. Certains types d'infrastructures disposent à présent de peu de marge pour résister aux incidences des changements climatiques. L'élévation du niveau de la mer menace par exemple de nombreux groupes de populations établis dans des zones côtières de faible altitude, partout dans le monde. Les stratégies d'adaptation aux extrêmes climatiques non stationnaires devraient prendre en compte les changements climatiques observés à l'échelle décennale au cours d'un passé récent, mais aussi les changements futurs prévus par les modèles climatiques. Les derniers modèles statistiques mis au point, tels les modèles généralisés non stationnaires de valeurs extrêmes, visent à lever certains des inconvénients qu'on associe aux distributions plus classiques. Au fur et à mesure que les modèles continueront d'évoluer et qu'on parviendra à mieux cerner leurs propriétés, les méthodes d'analyse des extrêmes les plus courantes seront probablement remplacées. Les lecteurs trouveront dans la publication intitulée *Guidelines on Analysis of Extremes in a Changing Climate in Support of Informed Decisions for Adaptation* (WMO/TD-No. 1500) de plus amples informations sur la façon dont on peut tenir compte de l'évolution du climat dans l'évaluation des extrêmes.

5.10.2 Précipitations maximales probables

On définit la précipitation maximale probable comme étant la hauteur maximale théorique d'une précipitation d'une durée déterminée, pouvant être recueillie sur une zone de perturbation donnée, compte tenu de conditions géographiques particulières à une certaine époque de l'année. Ce concept est largement appliqué à la conception de barrages et d'autres ouvrages hydrauliques de grande ampleur, pour lesquels un phénomène très rare peut avoir des conséquences désastreuses.

L'estimation des précipitations maximales probables fait en général appel à des approches heuristiques comprenant les étapes suivantes:

- a) Utiliser un modèle d'orage conceptuel pour représenter les processus des précipitations par des éléments physiques, comme le point de rosée à la surface, la hauteur pour une cellule orageuse, le débit entrant et le débit sortant;
- b) Étalonner le modèle à l'aide d'observations de la hauteur pour une cellule orageuse et de mesures associées de l'humidité présente dans l'atmosphère;
- c) Utiliser le modèle étalonné pour évaluer ce qui aurait pu se passer si l'humidité avait atteint son maximum dans l'atmosphère;
- d) Utiliser les caractéristiques de l'orage découlant des valeurs recueillies à des emplacements de jaugeage pour estimer la valeur correspondant à un emplacement cible, en apportant des ajustements en fonction des effets de la topographie, de la continentalité et d'autres conditions analogues non météorologiques et non climatologiques.

5.11 MÉTHODES ROBUSTES EN STATISTIQUE

Les techniques statistiques robustes produisent des estimateurs qui restent relativement insensibles aux effets des petits écarts par rapport aux hypothèses de la modélisation. Les inférences statistiques se fondent sur des observations ainsi que sur des hypothèses sous-jacentes (caractère aléatoire, indépendance, bon ajustement du modèle). Avec des données climatologiques, bon nombre de ces hypothèses ne peuvent être vérifiées en raison de la dépendance temporelle et spatiale des observations, du manque d'homogénéité des données, des erreurs qui entachent les données et d'autres facteurs encore.

Il convient d'évaluer la validité des conclusions pour déterminer quantitativement si possible, mais au moins de manière qualitative, l'effet des hypothèses sur les résultats des analyses. Il importe aussi de bien tenir compte de l'objet de l'analyse. Des conclusions générales se fondant sur des processus à grande échelle temporelle ou spatiale comprenant de nombreux calculs de moyennes à partir d'un jeu de données important sont souvent moins sensibles à des écarts par rapport aux hypothèses que des conclusions qui seraient plus spécifiques. Les techniques statistiques robustes sont souvent appliquées à la régression.

Si les résultats sont sensibles à une violation des hypothèses, l'analyste doit communiquer ce fait quand il diffuse les résultats aux utilisateurs. On peut aussi avoir recours à d'autres méthodes d'analyse qui ne sont pas sensibles au non-respect des hypothèses ou qui ne posent pas d'hypothèses au sujet des facteurs auxquels les résultats sont sensibles. Étant donné que les méthodes paramétriques posent davantage de conditions que les méthodes non paramétriques, il peut se révéler possible de réanalyser les données à l'aide de techniques non paramétriques. On utiliserait par exemple la médiane ou l'écart interquartile au lieu de la moyenne ou de l'écart type afin de diminuer la sensibilité aux valeurs aberrantes ou aux erreurs grossières que comportent les données d'observation.

5.12 **PROGICIELS DE STATISTIQUE**

Comme le traitement et l'analyse climatologiques reposent en grande partie sur des méthodes statistiques universelles, les progiciels de statistique sont des outils informatiques présentant un intérêt pour les climatologues. Il existe plusieurs logiciels d'analyse statistique générale pour différentes plates-formes informatiques.

Les progiciels de statistique se composent de nombreux utilitaires pour la gestion des données, leur analyse et la création de rapports. Le progiciel choisi devra posséder tous les outils nécessaires à la gestion, au traitement et à l'analyse des données, sans être surchargé d'outils inutiles, sources d'inefficacité. On trouve souvent une partie des utilitaires élémentaires dans un système de gestion des données climatologiques (voir la section 3.3).

Les outils de base pour la gestion de données permettent d'effectuer toute une série d'opérations destinées à faciliter le traitement et l'analyse des données. Il s'agit notamment du tri, de l'ajout de données, de la séparation des données en sous-ensembles, de la transposition de matrices, de calculs arithmétiques et de la fusion des données. Les outils de base pour le traitement statistique comprennent les opérations de statistique descriptive d'échantillons, le calcul des corrélations, la création de tables de fréquence, les tests d'hypothèses. Les outils d'analyse couvrent en général une grande partie des besoins de l'analyse climatologique, notamment l'analyse de variance, l'analyse de régression, l'analyse discriminante, l'analyse de groupes, l'analyse multidimensionnelle et l'analyse des séries chronologiques. Les résultats découlant des analyses sont habituellement regroupés en jeux de données résultants et peuvent normalement être sauvegardés, exportés ou transformés et par conséquent être soumis à d'autres opérations plus poussées d'analyse et de traitement.

Les outils graphiques que proposent les progiciels de statistique comprennent la création de diagrammes en deux et trois dimensions, la possibilité de modifier des diagrammes, la possibilité de sauvegarder des diagrammes sous des formats propres aux progiciels eux-mêmes ou dans d'autres formats graphiques standard. La plupart des progiciels permettent de créer des diagrammes de dispersion (à deux ou trois dimensions); des diagrammes à bulles; des tracés linéaires, des histogrammes, des courbes interpolées (lissées); des diagrammes en barres verticales, des diagrammes en barres horizontales et des graphiques en secteurs ou camemberts; des diagrammes en boîte ou boîte à moustache; et des graphiques spatiaux tridimensionnels, y compris des isogrammes. Certains progiciels proposent aussi des utilitaires pour afficher les valeurs de certains éléments sur des cartes, sans pour autant remplacer un système d'information géographique (SIG). Un SIG intègre le matériel, le logiciel et les données pour capturer, gérer, analyser et afficher toutes formes d'informations référencées géographiquement. Certains

programmes de SIG offrent des possibilités d'interpolation géographique, notamment des outils de cokrigage et de régression géographiquement pondérée.

Les outils d'analyse interactive combinent la puissance de l'analyse statistique et la capacité de contrôler visuellement les conditions d'une analyse statistique en particulier. Ils permettent de sélectionner visuellement les valeurs à inclure dans une analyse ou à exclure d'une analyse, et offrent la possibilité de refaire les calculs en fonction d'une nouvelle sélection. Une telle souplesse se révèle utile par exemple dans les calculs de tendances, quand les séries de données climatologiques contiennent des valeurs aberrantes et d'autres points douteux. Il est possible d'exclure ces points de l'analyse de façon interactive à partir d'une représentation graphique de la série, puis de recalculer automatiquement les tendances. Ces outils peuvent souvent permettre aussi d'analyser et de représenter graphiquement des sous-groupes de données.

5.13 FOUILLE DE DONNÉES

La fouille de données, également appelée exploration de données, forage de données ou prospection de données, est un processus analytique qui consiste à rechercher dans de gros volumes de données des schémas de répartition cohérents ou des relations systématiques entre éléments, puis de valider les résultats en appliquant les schémas décelés à de nouveaux sous-ensembles de données. On estime qu'elle relève à la fois de la statistique, de l'intelligence artificielle et de la recherche d'informations dans les bases de données. C'est un champ d'application qui progresse rapidement du point de vue tant théorique que pratique. L'intérêt de la fouille de données, c'est qu'elle s'applique aux problèmes climatologiques quand le volume des données est important et que le moyen de trouver des relations significatives parmi les éléments climatiques ne paraît pas évident, en particulier en début d'analyse.

Comme l'analyse exploratoire de données, la fouille de données vise à rechercher d'éventuelles relations parmi les éléments dans des situations où celles-ci n'apparaissent pas clairement. La fouille de données n'a pas pour objet de déterminer spécifiquement les relations qui lient des éléments étudiés. Elle est davantage axée sur le fait de produire une solution qui puisse engendrer des prévisions utiles. En matière d'exploration de données ou de découverte de connaissances, elle fonctionne sur le principe de la «boîte noire» et fait appel non seulement aux techniques classiques d'analyse exploratoire des données, mais aussi à des techniques comme les réseaux neuronaux, qui peuvent produire des prévisions valables sans pour autant mettre le doigt sur la nature précise des relations qui lient les éléments, sur lesquelles les prévisions se fondent.

5.14 BIBLIOGRAPHIE

5.14.1 Publications de l'OMM

- Organisation météorologique mondiale, 1972: *Quelques méthodes de l'analyse climatologique* (OMM/NT-N° 81, OMM-N° 199), Genève.
- , 1981: *Selection of Distribution Types for Extremes of Precipitation* (OHR-No. 15, WMO-No. 560), Genève.
- , 1986: *Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation* (OHR-No. 1, WMO-No. 332), Genève.
- , 1990: *Extremes and Design Values in Climatology* (WCAP-No. 14, WMO/TD-No. 386), Genève.
- , 1990: *Sur l'analyse statistique des séries d'observations* (OMM/NT-N° 143, OMM-N° 415), Genève.
- , 1994: *Guide des applications de la climatologie maritime* (OMM-N° 781), Genève.
- , 1997: *Progress Reports to CCI on Statistical Methods* (WCDMP-No. 32, WMO/TD-No. 834), Genève.

- , 1999: *Proceedings of the Second Seminar for Homogenization of Surface Climatological Data* (Budapest, Hongrie, 9–13 novembre 1998) (WCDMP-No. 41, WMO/TD-No. 962), Genève.
- , 2002: *Guide to the GCOS Surface and Upper-Air Networks: GSN and GUAN* (GCOS-No. 73, WMO/TD-No. 1106), Genève.
- , 2003: *Guidelines on Climate Metadata and Homogenization* (WCDMP-No. 53, WMO/TD-No. 1186), Genève.
- , 2008: Deficiencies and Constraints in the DARE Mission over the Eastern Mediterranean. In *MEDARE Workshop Proceedings* (WCDMP-No. 67, WMO/TD-No. 1432), Genève.
- , 2009: *Guidelines on Analysis of Extremes in a Changing Climate in Support of Informed Decisions for Adaptation* (WCDMP-No. 72, WMO/TD-No. 1500), Genève.

5.14.2 **Autres lectures**

- Alexandersson, H., 1986: A homogeneity test applied to precipitation data. *Int. J. Climatol.*, 6:661–675.
- Angel, J.R., W.R. Easterling et S.W. Kirtsch, 1993: Towards defining appropriate averaging periods for climate normals. *Climatol. Bull.*, 27:29–44.
- Bénichou, P. et O. Le Breton, 1987: Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques. *La Météorologie*, 7(19):23–34.
- Burrough, P.A., 1986: *Principles of Geographical Information Systems for Land Resource Assessment*. Monographs on Soil and Resources Survey No. 12. Oxford, Oxford University Press.
- Cook, E.R., K.R. Briffa et P.D. Jones, 1994: Spatial regression methods in dendroclimatology: A review and comparison of two techniques. *Int. J. Climatol.*, 14:379–402.
- Daley, R., 1993: *Atmospheric Data Analysis*. New York, Cambridge University Press.
- Dalgaard, P., 2002: *Introductory Statistics with R*. New York, Springer.
- Daly, C., R.P. Neilson et D.L. Phillips, 1994: A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain. *J. Appl. Meteorol.*, 33:140–158.
- Della-Marta, P.M. et H. Wanner, 2006: Method of homogenizing the extremes and mean of daily temperature measurements. *J. Climate*, 19:4179–4197.
- Deutsch, C.V. et A.G. Journel, 1998: *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*. Second edition. Oxford, Oxford University Press.
- Dixon, K.W. et M.D. Shulman, 1984: A statistical evaluation of the predictive abilities of climatic averages. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 23:1542–1552.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI), 2008: *ArcGIS Geographical Information System*. Redlands, ESRI.
- Fisher, R.A. et L.H.C. Tippett, 1928. Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample. *Proc. Cambridge Philos. Soc.*, 24:180–190.
- Frich, P., L.V. Alexander, P. Della-Marta, B. Gleason, M. Haylock, A.M.G. Klein Tank et T. Peterson, 2002: Global changes in climatic extreme events during the second half of the 20th century. *Climate Res.*, 19:193–212.
- Gabor, D, 1946: Theory of communication. *J. IEEE*, 93:429–457.
- Gandin, L., 1963: *Objective Analysis of Meteorological Fields*. Leningrad, Hydrometeoizdat, en Russe (Traduction anglaise: Israel Program for Scientific Translation, Jérusalem, 1965).
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), 1997: *Introduction aux modèles climatiques simples employés dans le Deuxième Rapport d'évaluation du GIEC: Document technique II du GIEC* (publié sous la direction de J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, D.J. Griggs et K. Maskell). Genève, GIEC.
- Haylock, M.R., N. Hofstra, A.M.G. Klein Tank, E.J. Klok, P.D. Jones et M. New, 2008: A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation for 1950–2006. *J. Geophys. Res.*, 113: D20119, DOI:10.1029/2008JD010201.
- Heino, R., 1994: *Climate in Finland During the Period of Meteorological Observations*. Contributions, No. 12. Helsinki, Institut météorologique finlandais.
- International ad hoc Detection and Attribution Group (IDAG), 2005: Detecting and attributing external influences on the climate system: A review of recent advances. *J. Climate*, 18:1291–1314.
- Jenkinson, A.F., 1955: The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 81:158–171.

- Jones, P.D., E.B. Horton, C.K. Folland, M. Hulme et D.E. Parker, 1999: The use of indices to identify changes in climatic extremes. *Climatic Change*, 42:131–149.
- Jones, P.D., S.C.B. Raper, B. Santer, B.S.G. Cherry, C. Goodess, P.M. Kelly, T.M.L. Wigley, R.S. Bradeley et H.F. Diaz, 1985: *A Grid Point Surface Air Temperature Data Set for the Northern Hemisphere*, DOE/EV/10098-2. Washington, DC, United States Department of Energy.
- Jureckova, J. et J. Picek, 2006: *Robust Statistical Methods with R*. Boca Raton, Chapman and Hall/CRC.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deavan, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woolen, Y. Zhu, A. Leetmaa, R. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K.C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, R. Jenne et D. Joseph, 1996: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 77:437–471.
- Kaplan, A., Y. Kushnir, M. Cane et M. Blumenthal, 1997: Reduced space optimal analysis for historical datasets: 136 years of Atlantic sea surface temperatures. *J. Geophys. Res.*, 102:27835–27860.
- Karl, T.R., C.N. Williams Jr et P.J. Young, 1986: A model to estimate the time of observation bias associated with monthly mean maximum, minimum, and mean temperatures for the United States. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 25:145–160.
- Kharin, V.V. et F.W. Zwiers, 2005: Estimating extremes in transient climate change simulations. *J. Climate*, 18:1156–1173.
- Kohler, M.A., 1949: Double-mass analysis for testing the consistency of records for making adjustments. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 30:188–189.
- Mann, M. E., 2004: On smoothing potentially non-stationary climate time series. *Geophys. Res. Lett.*, 31: L07214, DOI:10.1029/2004GL019569.
- National Climatic Data Center (NCDC), 2006: *Second Workshop on Climate Data Homogenization*, National Climatic Data Center (Asheville, Caroline du Nord, 28–30 mars 2006). Atelier organisé conjointement avec la Direction de la recherche climatologique, Environnement Canada; NOAA. Asheville, NCDC.
- Peterson, T.C., D.R. Easterling, T.R. Karl, P. Groisman, N. Nicholls, N. Plummer, S. Torok, I. Auer, R. Boehm, D. Gullett, L. Vincent, R. Heino, H. Tuomenvirta, O. Mestre, T. Szentimrey, J. Salinger, E.J. Forland, I. Hanssen-Bauer, H. Alexandersson, P. Jones et D. Parker, 1998: Homogeneity adjustments of in situ atmospheric climate data: a review. *Int. J. Climatol.*, 18:1493–1517.
- Peterson, T.C., C. Folland, G. Gruza, W. Hogg, A. Mokssit et N. Plummer, 2001: *Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Reporters 1998–2001*. International CLIVAR Project Office (ICPO) Publication Series, 48. Southampton, Royaume-Uni, ICPO.
- Palus, M. et D. Novotna, 2006. Quasi-biennial oscillations extracted from the monthly NAO index and temperature records are phase-synchronized. *Nonlin. Process. Geophys.*, 13:287–296.
- Peterson, T. C. *et al.*, 2002. Recent changes in climate extremes in the Caribbean Region. *J. Geophys. Res.*, 107(D21):4601.
- Philipp, A., P.M. Della-Marta, J. Jacobeit, D.R. Fereday, P.D. Jones, A. Moberg et H. Wanner, 2007: Long-term variability of daily North Atlantic–European pressure patterns since 1850 classified by simulated annealing clustering. *J. Climate*, 20:4065–4095.
- Sen, P.K., 1968: Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *J. Amer. Stat. Assoc.*, 63:1379–1389.
- Sensoy, S., T.C. Peterson, L.V. Alexander et X. Zhang, 2007: Enhancing Middle East climate change monitoring and indices. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 88:1249–1254.
- Shabbar, A. et A.G. Barnston, 1996: Skill of seasonal climate forecasts in Canada using canonical correlation analysis. *Monthly Weather Rev.*, 124(10):2370–2385.
- Torrence, C. et G.P. Compo, 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 79:61–78.
- Ulbrich, U. et M. Christoph, 1999. A shift of the NAO and increasing storm track activity over Europe due to anthropogenic greenhouse gas forcing. *Climate Dynamics*, 15:551–559.
- Uppala, S.M. P.W. Kållberg, A.J. Simmons, U. Andrae, V. da Costa Bechtold, M. Fiorino, J.K. Gibson, J. Haseler, A. Hernandez, G.A. Kelly, X. Li, K. Onogi, S. Saarinen, N. Sokka, R.P. Allan, E. Andersson, K. Arpe, M.A. Balmaseda, A.C.M. Beljaars, L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, S. Caires, F. Chevallier, A. Dethof, M. Dragosavac, M. Fisher, M. Fuentes,

- S. Hagemann, E. Hólm, B.J. Hoskins, L. Isaksen, P.A.E.M. Janssen, R. Jenne, A.P. McNally, J.-F. Mahfouf, J.-J. Morcrette, N.A. Rayner, R.W. Saunders, P. Simon, A. Sterl, K.E. Trenberth, A. Untch, D. Vasiljevic, P. Viterbo et J. Woollen, 2005: The ERA-40 reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 131:2961–3012.
- Vincent, L.A., X. Zhang, B.R. Bonsal et W.D. Hogg, 2002: Homogenization of daily temperatures over Canada. *J. Climate*, 15:1322–1334.
- von Storch, H. et F.W. Zwiers, 1999: *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Wackernagel, H., 1998: Kriging, cokriging and external drift. In: *Workshop on Dealing with Spatialisation* (B. Gozzini and M. Hims, eds). Toulouse, Action COST 79, Union européenne.
- Wahba, G. et J. Wendelberger, 1980: Some new mathematical methods for variational objective analysis using splines and cross-validation. *Monthly Weather Rev.*, 108:36–57.
- Wang, X.L. et V. R. Swail, 2001: Changes of extreme wave heights in Northern Hemisphere oceans and related atmospheric circulation regimes. *J. Climate*, 14:2204–2221.
- Wang, X.L., 2008: Accounting for autocorrelation in detecting mean shifts in climate data series using the penalized maximal t or F test. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 47:2423–2444.
- Wilks, D.S., 2002: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Deuxième édition. New York, Academic Press.
- Yue, S., P. Pilon et G. Cavadias, 2002: Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *J. Hydrol.*, 259:254–271.
- Zhang, X., E. Aguilar, S. Sensoy, H. Melkonyan, U. Tagiyeva, N. Ahmed, N. Kutaladze, F. Rahimzadeh, A. Taghipour, T.H. Hantosh, P. Albert, M. Semawi, M. Karam Ali, M. Halal Said Al-Shabibi, Z. Al-Oulan, Taha Zatari, I. Al Dean Khelet, S. Hammoud, M. Demircan, M. Eken, M. Adiguzel, L. Alexander, T. Peterson et Trevor Wallis, 2005: Trends in Middle East climate extremes indices during 1930–2003. *J. Geophys. Res.*, 110: D22104, DOI:10.1029/2005JD006181.
-

CHAPITRE 6. SERVICES ET PRODUITS

6.1 INTRODUCTION

Par services climatologiques, on entend la diffusion de l'information climatologique aussi bien au public qu'à un utilisateur en particulier. Ces services se fondent sur des relations étroites de partenariat entre les SMHN et les parties prenantes que sont les organismes publics, les sociétés privées et les universités, qui œuvrent en faveur de l'interprétation de l'information sur le climat passé pour qu'elle facilite la prise de décision et contribue au développement durable, mais aussi à l'amélioration des produits et des prévisions climatologiques, et des perspectives d'évolution du climat. Les partenariats avec le secteur public et le secteur privé favorisent la coordination des services climatologiques à l'échelle locale, nationale ou internationale. Les rôles des différents partenaires étant clairement définis, les produits doivent être fournis aux utilisateurs dans des délais impartis et de manière efficace. L'information climatologique doit être axée sur les intérêts sociaux et économiques de l'utilisateur visé, et doit en outre permettre d'éduquer le public en général sur les diverses utilisations possibles des données et produits climatologiques et sur les avantages que ceux-ci procurent. Les partenariats favorisent aussi la coordination de la recherche appliquée, de la surveillance et de la prévision en climatologie, à l'échelle nationale, régionale et mondiale.

La fourniture de services climatologiques repose sur trois principes fondamentaux:

- a) Connaître l'utilisateur et comprendre ses besoins, à savoir notamment les éléments climatiques qui présentent un intérêt pour l'utilisateur, le moyen par lequel l'utilisateur souhaite recevoir l'information, l'interprétation probable que l'utilisateur donnera à l'information, le but dans lequel l'information sera utilisée, le processus de décision propre à l'utilisateur et comment l'information fournie peut améliorer les processus de prise de décision;
- b) Rendre l'information simple et accessible, et faire en sorte qu'elle soit communiquée en temps voulu, à savoir notamment fournir des produits qu'il est possible de comprendre et que l'utilisateur pourra facilement mettre en application, en offrant à ce dernier la possibilité de demander conseil auprès d'un expert;
- c) Veiller à la qualité de l'information, à savoir notamment fournir des produits qu'on a élaborés en fonction de leurs applications possibles et grâce à des techniques d'analyse pertinentes, avec la documentation adéquate et qui reposent sur une connaissance poussée de la disponibilité et des caractéristiques des données les plus récentes.

Ces trois principes, ainsi que la commercialisation des services, sont examinés plus avant dans le présent chapitre.

6.2 UTILISATEURS ET UTILISATIONS DE L'INFORMATION CLIMATOLOGIQUE

De l'écolier au dirigeant ou décideur sur le plan mondial, les utilisateurs des services climatologiques sont nombreux et divers. Ces services s'adressent à des groupes d'activités très variés: les médias et le domaine de l'information du public, les agriculteurs, les forces armées, les services ministériels, le monde des affaires et de l'industrie, les responsables de l'eau et de l'énergie, les consommateurs, les touristes, les spécialistes du droit, les autorités de la santé, les organisations humanitaires et de secours ou encore les Services météorologiques. Les besoins des utilisateurs varient tout autant: un simple intérêt vis-à-vis du temps et du climat, un projet scolaire, la conception d'un bâtiment, des travaux agricoles, la gestion de l'eau, le fonctionnement d'un système de climatisation ou d'un grand barrage, la planification de la production et de la distribution de l'énergie, ou encore la prévention et l'intervention en matière de pénuries alimentaires et d'eau.

Compte tenu de l'intérêt que suscitent actuellement les changements climatiques et leurs répercussions, la demande en information climatologique a augmenté. Auparavant, les produits climatologiques se limitaient surtout à une information portant sur les caractéristiques physiques de l'atmosphère proche de la surface terrestre. Aujourd'hui, les demandes des utilisateurs englobent de nombreux aspects du climat et du système planétaire au sens large (masses continentales, atmosphère, océans, biosphère et surface terrestre, et cryosphère). Les données ayant trait au climat servent à présent à décrire, caractériser et prévoir à la fois le comportement du système climatique dans son ensemble (y compris les incidences des activités humaines sur le climat) et les relations entre le climat et d'autres éléments du monde naturel et de la société humaine. Ces demandes se sont traduites par le besoin accru de surveiller et de décrire le climat en détail, à la fois dans l'espace et le temps, tout en situant les phénomènes actuels dans leur contexte historique. Ainsi établit-on des jeux de données climatologiques de grande qualité pour servir de référence, ce pour quoi des techniques statistiques complexes d'assurance de la qualité ont été mises au point. Pour compiler les données, on fait appel à des processus visant à déceler les valeurs aberrantes, et à les corriger dans la mesure du possible, et à prendre en compte les ruptures d'homogénéité que peuvent causer les remplacements d'instruments ou le changement d'emplacement de stations d'observation. Les chercheurs et d'autres spécialistes qui utilisent les produits climatologiques portent aussi un vif intérêt aux métadonnées qui aident à interpréter et à analyser l'homogénéité et la qualité des données.

Il est possible de classer les utilisations de l'information climatologie sous deux grandes catégories, en distinguant un emploi stratégique d'un emploi tactique. Les utilisations stratégiques regroupent les produits qui contribuent à la planification et à la conception générales de groupes de projets et de politiques à long terme. Pour de telles utilisations, on se sert habituellement d'analyses probabilistes et d'évaluations de risques portant sur l'occurrence de phénomènes météorologiques, pour établir des critères et des règles de conception, de résumés des conditions climatiques passées en tant qu'information historique, et de scénarios climatiques en tant qu'indicateurs des conditions auxquelles on peut s'attendre à l'avenir. Réaliser une étude des données climatologiques pour concevoir un barrage constitue un exemple d'utilisation stratégique. Les utilisations tactiques regroupent les produits et les données qui contribuent à la résolution de problèmes singuliers, immédiats ou à court terme. On se sert normalement pour cela de copies d'observations officielles portant sur l'occurrence d'un phénomène météorologique en particulier, de résumés de données historiques ou de la description d'un phénomène dans un contexte historique. L'analyse de données d'observation récentes visant à aider à contrôler l'usage de l'eau au cours d'une sécheresse est un exemple d'utilisation tactique. Ces deux catégories d'utilisation peuvent se rejoindre dans certains cas. Par exemple, un même calcul de probabilités portant sur la vitesse et la direction du déplacement de tempêtes tropicales à partir de données historiques sert aussi bien à des fins stratégiques qu'à des fins tactiques, notamment dans ce dernier cas quand il sert à prévoir le déplacement d'une tempête en cours.

Voici une liste non exhaustive de formes d'utilisation de l'information climatologique:

- a) Suivi d'activités induites par les conditions météorologiques (ex: consommation de carburant pour le chauffage ou la climatisation, dépassement de seuils établis relatifs aux concentrations de polluants atmosphériques, variabilité des ventes de marchandises, inflation sur les marchés des produits de base en cas de sécheresse);
- b) Prévision du comportement de systèmes sectoriels en réaction à des phénomènes météorologiques, compte tenu de la connaissance des temps de réaction et des incidences de phénomènes météorologiques et climatiques observés dans un passé récent (ex: production et consommation d'énergie, anticipation pour la reconstitution des stocks, production agricole, maladies des cultures, systèmes d'alerte de vagues de chaleur dans le cadre d'une veille sanitaire, sécurité alimentaire, approvisionnement et demande en eau);
- c) Attestation de l'occurrence de phénomènes météorologiques, comme les orages, les vents violents, le gel ou la sécheresse, dans le domaine de l'assurance et à d'autres fins;
- d) Surveillance destinée à établir les caractéristiques d'un phénomène ou d'une période en particulier, notamment des écarts par rapport aux conditions normales (ex: intensité de pluies ou de périodes de sécheresse extrêmes);

- e) Conception d'équipements exigeant la connaissance du climat local pour en garantir l'efficacité et la viabilité (ex: ouvrages de génie civil, systèmes de climatisation, réseaux d'irrigation et de drainage);
- f) Étude d'impact, nécessitant la connaissance des conditions initiales pour pouvoir évaluer par exemple les incidences sur la qualité d'air de l'installation d'une centrale électrique ou d'une usine;
- g) Étude de l'influence des conditions météorologiques sur les secteurs économiques, notamment les transports publics et le tourisme;
- h) Planification et gestion des risques pour la mise en place de services publics (ex: eau, énergie, préparation aux situations d'urgence et organisation des secours).

L'information climatologique peut être présentée de différentes façons, notamment sous la forme de fichiers de données, de séries chronologiques, de tableaux, de diagrammes, de déclarations ou de cartes. Pour la diffuser, on peut faire appel à différents modes de communication, allant du téléphone, du télécopieur ou du courrier postal au service FTP (protocole de transfert de fichiers) par l'internet, au courrier électronique ou à un accès par site Web. Compte tenu de la multitude de formes de présentation et de moyens de communication possibles, il faut déterminer, dès le début de l'élaboration d'un service climatologique, les besoins des utilisateurs en la matière. Ainsi a-t-on souvent recours à des enquêtes auprès des utilisateurs et à l'analyse de leurs demandes pour établir quelles sont leurs exigences. Ce sont habituellement les demandes des utilisateurs qui déterminent le niveau de service et la nature des produits à mettre au point. Voici ce qu'il convient de prendre en considération en ce qui concerne l'élaboration de produits et services climatologiques:

- a) Fournir les meilleurs services au meilleur coût;
- b) Garantir la diffusion des produits en temps voulu;
- c) Sensibiliser les utilisateurs aux produits et services climatologiques mis à leur disposition;
- d) Encourager les utilisateurs à communiquer leurs remarques et exploiter ces remarques pour améliorer les produits;
- e) Se conformer aux principes de gestion de la qualité;
- f) Garantir la sécurité de l'information;
- g) Mettre à disposition la documentation et les métadonnées appropriées;
- h) Veiller à la transparence en ce qui concerne la fiabilité et l'incertitude associées aux produits;
- i) Se conformer aux résolutions 40 et 25 adoptées respectivement par le Douzième et le Treizième Congrès météorologique mondial au sujet de l'échange des données et produits (voir la section 3.5);
- j) Se conformer aux lois et traités de portée locale, nationale et internationale.

Il importe de préparer une documentation complète au sujet du système d'accès à l'information et des produits. Grâce au temps investi dans la préparation d'une documentation adéquate, on réalisera des économies de ressources plus tard, quand il s'agira de répondre aux questions soulevées par les utilisateurs, on réduira autant que possible l'utilisation inappropriée des produits et on favorisera la maintenance et la mise à jour régulières du système.

Chaque produit doit s'accompagner d'une déclaration au sujet du degré de confiance qu'il convient d'accorder à son contenu et de conseils au sujet des contraintes qu'il faut y associer, pour que tous les utilisateurs, et en particulier ceux qui ont le moins l'habitude de servir de produits climatologiques, puissent évaluer dans quelle mesure un produit répond adéquatement à leurs besoins et prendre en compte le degré d'incertitude associé au produit, dans leur propre processus de prise de décisions.

6.3 INTERACTION AVEC LES UTILISATEURS

L'enseignement et la communication peuvent tenir une place importante dans le cadre de la fourniture de services climatologiques. Parmi les utilisateurs éventuels de données climatologiques, nombreux sont ceux dont les connaissances en météorologie et dans des

disciplines connexes sont relativement restreintes, et qui peuvent par conséquent ne pas savoir de quelle information ils ont réellement besoin ou quelle est la meilleure façon d'utiliser cette information. Beaucoup d'utilisateurs de l'information sous forme numérique ne savent probablement même pas comment importer l'information sur leur propre système informatique.

Un Service climatologique doit s'assurer que l'information demandée par un utilisateur est réellement l'information dont celui-ci a besoin pour apporter une solution au problème qu'il veut résoudre. Il est fréquent que les utilisateurs demandent des produits simplement parce qu'ils savent qu'ils existent. Le Service climatologique doit s'informer auprès des utilisateurs des problèmes qu'ils peuvent avoir à résoudre, examiner avec eux le type d'information qui peut les aider dans cette tâche et leur recommander les produits les plus appropriés.

Un Service climatologique doit s'assurer qu'il dispose des compétences voulues dans le domaine de la communication, de l'interprétation et de l'utilisation de l'information climatologique. C'est au personnel du Service climatologique qu'il appartient d'aider les utilisateurs de l'information, qui peuvent ne pas maîtriser le domaine technique, à appréhender les spécificités des données, analyses et scénarios climatologiques. C'est à lui aussi qu'il incombe de répondre aux demandes de données accompagnées de questions complémentaires au sujet notamment des stations et des instruments d'observation, des éléments observés, des définitions mathématiques de différents paramètres, des différents aspects concernant les pratiques d'observation et de la météorologie et de la climatologie en général. Le personnel d'un Service climatologique doit donc pouvoir développer un large éventail de compétences et d'expertise ou avoir accès à des spécialistes dans différents domaines.

Il arrive que des utilisateurs organisent des réunions ou d'autres activités auxquelles le personnel du Service climatologique est convié. Le fait de donner une réponse positive à ce type d'invitation tend à renforcer les relations et offre au personnel du Service climatologique l'occasion d'écouter les utilisateurs pour s'informer à leur sujet et sur leurs besoins. Outre le fait que cela soit très valorisant, il importe de prendre part aux activités des utilisateurs dans toute la mesure du possible. En effet, les remarques qu'on peut recueillir auprès de ceux-ci permettent en général d'améliorer les produits, de créer de nouvelles applications et de rendre la diffusion de l'information climatologique plus efficace pour n'oublier personne. Il est essentiel d'entretenir une communication permanente ou fréquente avec les utilisateurs pour veiller à ce que les produits existants continuent de répondre à leurs besoins et pour pouvoir déterminer les modifications qu'il convient d'apporter aux produits pour continuer à satisfaire les utilisateurs.

Le personnel du service à la clientèle doit avoir un vif intérêt pour les rapports avec le public. Ses membres doivent être courtois, avoir du tact et être conscients de l'importance que revêt le respect des délais (les besoins des utilisateurs peuvent revêtir un caractère d'urgence pour de nombreuses raisons). La communication doit idéalement faire partie des forces d'un Service climatologique, qui doit disposer des moyens techniques et de formation nécessaires destinés à l'appui au personnel du service à la clientèle. Les membres du personnel chargés de fournir les services climatologiques sont les personnes avec lesquelles le public interagit directement et grâce auxquelles le Service climatologique acquiert sa réputation. Le public doit pouvoir trouver aisément à qui s'adresser selon le mode de communication qu'il envisage d'utiliser (téléphone, télécopieur, courrier électronique, courrier postal ou encore visite en personne) ainsi que des renseignements sur les services disponibles, notamment les heures de fonctionnement ou encore quels sont les délais pour obtenir une réponse par courrier électronique, par téléphone ou par lettre.

Il importe de pouvoir diffuser l'information à l'aide des différents modes de communication existants. Le prestataire de services peut disposer d'un système moderne et puissant dont il peut se servir notamment à cette fin, mais pour beaucoup d'utilisateurs, ce n'est pas le cas. Les techniques modernes de communication, et notamment l'internet (courrier électronique, FTP ou Web), permettent à présent de communiquer et de diffuser très rapidement les données et les produits, mais dans la plupart des pays, des utilisateurs n'ont pas directement accès à ce type d'installation. Dans de nombreux pays, il faudra donc disposer d'autres moyens de diffusion, ce que les SMHN doivent prendre en considération. Un Service climatologique étant doté, pour

réaliser des prestations, d'un système parmi les plus avancés du point de vue de la technique et de la conception, doit néanmoins demeurer sensible aux besoins des utilisateurs locaux et à l'évolution de ces besoins, en ce qui concerne les méthodes de diffusion et les produits à diffuser.

Un SMHN étant souvent composé de plusieurs services, il se peut que des incohérences apparaissent entre ceux-ci concernant les normes appliquées, les formats utilisés voire les produits diffusés. Il est indispensable que ces services communiquent fréquemment entre eux; il est conseillé d'organiser régulièrement, et au moins une fois par an, des réunions au cours desquelles le personnel est présent physiquement. Il est utile aussi pour veiller à la cohérence entre services de mettre en place des procédures opérationnelles communes et une base de données de référence, mais aussi de veiller à disposer d'une documentation, de normes de qualité, de directives et de manuels bien rédigés.

Lorsque l'information est facturée aux utilisateurs, le prix à payer, si ceux-ci jugent qu'il est trop élevé ou qu'il n'est pas appliqué avec cohérence, peut devenir un sujet particulièrement sensible ainsi qu'une cause d'insatisfaction et de critique. Il importe donc de mettre en place une politique de tarification claire et transparente, et de communiquer des instructions explicites quant à son application. Il peut s'agir par exemple d'une politique officielle s'appuyant sur une série de principes et une liste de tarifs applicables directement par ceux qui fournissent les services sur le plan opérationnel. La politique en question doit être mise à la disposition de toutes les personnes chargées de fournir les services, mais aussi de tous les utilisateurs.

Les relations avec les utilisateurs doivent s'inscrire dans un cadre de gestion de la qualité sur lequel repose l'organisation de la gestion d'un Service climatologique prenant en considération les besoins de sa clientèle. Il y a lieu d'appliquer les principes de gestion de la qualité adoptés par l'Équipe spéciale intercommissions chargée d'élaborer un cadre de référence pour la gestion de la qualité (OMM, 2008) et par plusieurs SMHN.

6.4 **DIFFUSION DE L'INFORMATION**

La qualité de l'interprétation par un utilisateur d'une série d'informations climatologiques est en grande partie fonction de la façon dont l'information est présentée. Dans la mesure du possible, les faits saillants devraient être présentés sous une forme graphique et s'accompagner d'un texte explicatif destiné à les mettre en exergue. La présentation doit être logique, claire, concise et adaptée à l'utilisateur visé et au but recherché. Par exemple, le style qui sera utilisé pour communiquer une information climatologique à un chercheur sera différent de celui d'un article paraître dans un journal ou un magazine de vulgarisation.

Les méthodes utilisées pour résumer les données qui composent un bulletin climatologique mensuel régulier, destiné à un large éventail d'utilisateurs, techniques ou non, doivent être différentes de celles utilisées pour préparer un rapport d'interprétation consacré à un problème précis de climatologie appliquée. L'information technique destinée à des utilisateurs ne possédant que des connaissances restreintes dans le domaine des sciences atmosphériques doit revêtir une présentation simple et explicite, tout en demeurant scientifiquement exacte. Les utilisateurs possédant davantage de connaissances seront mieux en mesure de comprendre une information et des présentations complexes, une certaine préparation de l'information technique demeurant néanmoins souhaitable la plupart du temps. Un Service climatologique doit par conséquent disposer des capacités voulues pour anticiper, étudier et comprendre les exigences des pouvoirs publics, des intérêts industriels et commerciaux et du grand public. Il faudra donc qu'on veille notamment à ce que le personnel du service à la clientèle puisse se tenir informé des connaissances actuelles et dispose des compétences voulues pour être en mesure de comprendre les domaines qu'il devra aborder et les questions qui lui seront posées.

L'information relative aux états passé, actuel et prévu du climat est un élément important à prendre en compte dans l'élaboration de politiques et de stratégies nationales. Pour produire une

information pertinente pouvant servir à la préparation et à la mise en œuvre de politiques et stratégies nationales, le personnel chargé de cette tâche doit répondre à plusieurs exigences:

- a) L'information historique doit être recueillie, soumise au contrôle de qualité, archivée, puis mise à disposition en temps voulu;
- b) Les évaluations des données et de l'information climatologiques doivent être établies en fonction des besoins des décideurs et des responsables de la mise en œuvre des décisions;
- c) Les interprétations et les présentations des données et de l'information climatologiques, et des scénarios climatiques, ainsi que le degré de confiance à accorder aux interprétations doivent être communiqués de façon explicite aux utilisateurs, qui n'ont pas tous une connaissance technique du climat;
- d) La coordination avec d'autres services publics, des instituts universitaires et des groupes d'intérêt et des programmes privés se révèle souvent nécessaire, si on veut répondre aux questions pluridisciplinaires que soulève la vulnérabilité de la société, à l'échelle d'un pays, d'un secteur ou d'une communauté, par rapport à la variabilité et à l'évolution du climat.

Ce travail nécessite des relations officielles et une véritable communication avec d'autres ministères qui s'occupent de climatologie, ainsi qu'avec les organismes internationaux s'intéressant à cette discipline.

Produire les meilleures prévisions possibles quant au climat futur en partant de l'information dont on dispose correspond à la mission que s'est donnée le Programme des services d'information et de prévision climatologiques (CLIPS) relevant de l'OMM, une mission dont le détail figure dans la publication intitulée *Report from the Meeting of Experts on Climate Information and Prediction Services (CLIPS)* (WMO/TD-No. 680). Le Programme CLIPS met l'accent sur des applications que l'on a conçues et mises en œuvre compte tenu du point de vue des utilisateurs, en ciblant des services climatologiques destinés à certains secteurs: la gestion des ressources en eau, la production alimentaire, la santé, les zones urbanisées, la production d'énergie et le tourisme. Il a pour axes principaux les services climatologiques en faveur du développement durable, les études d'évaluation des incidences du climat et les stratégies d'intervention visant à réduire la vulnérabilité, les nouvelles frontières de la science et de la prévision du climat et les observations spécialisées du système climatique.

Conformément à ces axes, les objectifs suivants sont assignés au Programme CLIPS:

- a) Établir un cadre international pour améliorer et promouvoir les avantages économiques, environnementaux et sociaux que procurent les informations et les prévisions climatiques;
- b) Favoriser le développement d'un réseau mondial de centres climatologiques régionaux et nationaux, ainsi que celui des forums régionaux sur l'évolution probable du climat, afin de parvenir, en faisant aussi appel à la communication et à la formation, à un consensus quant à l'évolution probable du climat régional, ce réseau centralisant en outre la prestation de services d'information et de prévision climatologiques;
- c) Mettre en lumière l'intérêt et les avantages socio-économiques que présentent en définitive les services d'information et de prévision climatologiques, ainsi que la relation qui existe entre ces avantages et l'observation, la surveillance, la prévision et les applications à l'échelle mondiale;
- d) Encourager la mise au point de prévisions climatiques à caractère opérationnel, adaptées aux champs d'application des utilisateurs, pour des échelles temporelles et spatiales réalistes.

Les SMHN ont la possibilité de mettre sur pied et d'exploiter leurs systèmes de diffusion de l'information climatologique en s'inspirant directement du cadre du Programme CLIPS et aussi en faisant appel de façon optimale aux entités mondiales et régionales existantes. Il est souhaitable qu'ils favorisent le développement des forums nationaux sur l'évolution probable du climat auxquels participent les représentants des grands secteurs d'activité sensibles au climat, qui permettent d'interpréter l'information mondiale et régionale dans un contexte national et qui renforcent les échanges avec les groupes d'utilisateurs.

6.5 COMMERCIALISATION DES SERVICES ET DES PRODUITS

Comme cela est examiné dans la publication intitulée *Operational Climatology – Climate Applications: On Operational Climate Services and Marketing, Information and Publicity* (WMO/TD-No. 525), la commercialisation ne se résume pas simplement à la publicité et à la vente; elle permet aussi aux utilisateurs éventuels de savoir quels sont les services et les produits mis à leur disposition, de prendre conscience de l'utilité de ces services et produits, et de mieux saisir l'intérêt que présente l'information climatologique. Le succès de la plupart des services climatologiques repose pour une part essentielle sur les activités de commercialisation, de relations publiques, de publicité, de promotion et de diffusion de l'information climatologique. L'information climatologique ne se suffit probablement pas à elle-même, mais elle est souvent décisive quand il s'agit d'évaluer la viabilité de projets dans le domaine de l'alimentation, de l'eau et de l'économie. Elle revêt un intérêt social et économique, et la réussite de sa commercialisation est, dans une large mesure, fonction de la qualité des processus de promotion et de diffusion mis en place. Ce n'est pas le produit qu'il faut vendre, mais bien les avantages qu'il procure.

Il est fréquent que l'intérêt que présente l'information climatologique n'apparaisse pas clairement à ceux qui peuvent tirer profit des produits proposés ou à ceux qui décident du financement des programmes climatologiques. Il faut donc parvenir à montrer qu'il est avantageux et utile d'utiliser les produits en question en termes explicites du domaine social et économique. Il faut réaliser des études pour évaluer l'utilité des applications climatologiques. Ces études ne doivent pas relever uniquement de la responsabilité des climatologues spécialistes des applications, mais bien davantage être entreprises de concert avec des économistes, des statisticiens du domaine social et des spécialistes des champs d'application de la climatologie. Pour montrer l'efficacité d'un produit, on peut notamment s'attacher à en établir l'intérêt auprès des utilisateurs. Une analyse du coût d'un produit ou d'un service doit prendre en compte, outre les coûts directs, ce que coûterait le fait de ne pas disposer du produit ou du service en question.

Dans le cadre d'une stratégie commerciale, il y a lieu d'inclure une mesure de la satisfaction des utilisateurs. Les enquêtes menées auprès des utilisateurs permettent aux SMHN d'évaluer dans quelle mesure les services fournis répondent bien aux besoins et de vérifier si les utilisateurs se servent effectivement de l'information mise à leur disposition. Les résultats des enquêtes permettent aussi de voir si les services fournis présentent un intérêt et s'ils sont utiles et adéquats et, le cas échéant, de parfaire les services existants et de perfectionner la conception de nouveaux services. Ils constituent une base d'information sur laquelle les responsables des services peuvent s'appuyer pour prendre des décisions touchant le domaine financier, les investissements, les principes et les programmes. Il convient d'organiser de telles enquêtes au moins tous les trois ans. Il faudra dégager des ressources pour concevoir ces enquêtes, pour en analyser les résultats, et aussi pour mettre au point de nouveaux produits ou apporter des modifications aux produits existants en fonction des indications en découlant. Avant de distribuer le questionnaire d'une enquête à tous les destinataires prévus ou de le diffuser plus largement via l'internet, il faudrait toujours réaliser un essai sur un échantillon de référence.

Il appartient à un Service climatologique de faire la promotion de son personnel en mettant en avant les connaissances et compétences professionnelles qui sont les siennes. Pour acheter un service, les utilisateurs se basent fréquemment sur la confiance que leur inspire le jugement professionnel du prestataire. Les utilisateurs n'ont souvent qu'une idée approximative de la qualité des services qu'ils reçoivent, parfois même ils ne savent pas exactement ce qu'ils reçoivent ou alors ils ne sont pas certains que l'information reçue réponde à leurs besoins. Le fait de savoir définir les forces du personnel spécialisé sur lequel repose l'élaboration d'un service et de mettre celles-ci en avant auprès des utilisateurs constitue un élément important de la démarche de commercialisation.

Voici donc les caractéristiques qui sont celles d'un programme de commercialisation efficace:

- a) Dégager les besoins des utilisateurs en cherchant à comprendre clairement quels sont leurs problèmes et exigences et comment ils se servent de l'information climatologique;

- b) Former le personnel du service à la clientèle pour qu'il demeure attentif aux besoins et aux exigences de la clientèle;
- c) Cibler un marché;
- d) Promouvoir les avantages que les services et produits climatologiques représentent pour le secteur ciblé;
- e) Mettre au point un produit ou un service pour répondre au besoin de l'utilisateur et faire valoir auprès de ce dernier que l'utilisation de ce produit ou service l'aidera à résoudre ses problèmes;
- f) Mettre en valeur les compétences professionnelles du personnel du Service climatologique;
- g) Fixer les modes d'accès ou de diffusion pour un produit donné en prévoyant cependant d'autres possibilités suivant l'utilisateur;
- h) Évaluer les aspects économiques des produits et des services;
- i) Tenir les utilisateurs informés par des activités de promotion et de relations publiques;
- j) Contrôler le degré de satisfaction des utilisateurs et évaluer l'efficacité des prestations et des activités de commercialisation;
- k) Veiller à la crédibilité des services climatologiques en indiquant clairement la fiabilité et les défauts des produits et services proposés.

6.6 **PRODUITS**

Les produits climatologiques regroupent des informations sous forme de données, de résumés, de tableaux, de graphiques, de cartes, de rapports et d'analyses. Ils peuvent présenter des distributions spatiales sous forme de cartes. Les produits plus complexes, comme les atlas ou les analyses climatologiques, peuvent combiner différents types de représentations graphiques accompagnées de textes descriptifs. Il peut s'agir aussi de bases de données associées à des outils logiciels permettant à des clients en ligne de produire des données statistiques et des graphiques en fonction de leurs propres besoins.

6.6.1 **Directives générales**

Les produits et les données sur lesquelles ils reposent doivent être de la meilleure qualité possible compte tenu des contraintes de temps relatives à la fourniture de l'information. On constate une demande de plus en plus grande en faveur de produits climatologiques diffusés le plus rapidement possible après la période au cours de laquelle les données sont rassemblées. Veiller à la qualité de ces produits est devenu un sujet de préoccupation. Le temps qui s'écoule entre le moment où les observations sont exécutées et celui où le produit est livré à l'utilisateur est tellement court qu'il ne suffit pas à l'exécution du processus complet du contrôle de qualité, si bien que seule la partie automatisée du contrôle est appliquée. Il faudrait au moins pouvoir procéder à des vérifications de base à la réception des données (voir le chapitre 3). Il faut alerter les utilisateurs sur les risques qu'il convient d'associer à ce type de produits et comme il s'agit habituellement de produits diffusés automatiquement, une remarque à cet effet doit être inscrite sur le produit. Un système d'assurance de la qualité efficace permet de traiter aussi ce type d'information.

Les produits portant sur des données historiques devraient être de meilleure qualité que ceux dressés à partir de données très récentes. Toutes les données qui entrent dans l'élaboration des relevés climatologiques doivent faire l'objet de vérifications portant sur les erreurs aléatoires et systématiques, l'homogénéité, la représentativité spatiale et les parties manquantes des séries chronologiques. Pour les produits, tels les atlas climatiques ou les règlements techniques, les données utilisées doivent être celles des périodes de référence standards (voir la section 4.8). Il faut éviter les révisions fréquentes basées sur de nouvelles périodes de relevés. Quand une partie du contenu d'un produit ne présente pas une bonne stabilité sur une longue période, il faut y indiquer, à l'aide d'un supplément d'information, la nature de la variabilité ou de l'évolution.

Il est généralement très utile d'accompagner les tables de données historiques et statistiques d'un texte explicatif qui aide l'utilisateur à interpréter les données et fait ressortir les éléments climatiques les plus importants. Toutes les publications climatologiques doivent donner suffisamment d'information sur l'emplacement et l'altitude des stations d'observation, l'homogénéité des données de toutes les stations, les périodes des relevés et les méthodes statistiques et d'analyse employées.

Il convient de vérifier avec soin tous les éléments graphiques des produits, avant de mettre ceux-ci à la disposition des utilisateurs éventuels. Il faut par exemple veiller à bien concevoir les cartes climatologiques en choisissant avec soin les couleurs et les échelles, en y adjoignant des titres explicites et y indiquant l'objet de l'analyse, la période des relevés ainsi que les organisations d'où émanent les données. Pour qu'elles soient faciles à comparer, les cartes doivent présenter une certaine cohérence en ce qui concerne le choix des couleurs, de la présentation et des données.

Il y a lieu d'œuvrer en consultation avec tous ceux que des services d'information sur l'environnement peuvent toucher. Il convient de prendre en considération les avis des parties intéressées lorsqu'on crée, modifie ou supprime des produits ou services.

6.6.2 Périodiques de données climatologiques

Une publication climatologique est dite périodique quand elle paraît régulièrement à des intervalles temporels précis. La plupart des périodiques de données climatologiques sont publiés sur une base mensuelle ou annuelle. Certains services publient également des périodiques à des intervalles différents, hebdomadaires ou saisonniers. Les publications hebdomadaires ou mensuelles paraissent à la fin de la période en question et contiennent habituellement des données récentes qui n'ont pas été soumises à un contrôle de qualité complet. Même si les données qu'ils contiennent risquent de comporter certaines erreurs ou omissions, elles sont d'actualité et ces périodiques peuvent donc être d'une grande utilité pour différents secteurs économiques, sociaux et environnementaux. Les publications trimestrielles ou saisonnières servent souvent à diffuser des résumés de données saisonnières comme les chutes de neige hivernales, les précipitations pendant la saison de croissance, les degrés-jours de réfrigération en été ou les degrés-jours de chauffe en hiver.

La plupart des SMHN publient des bulletins mensuels contenant des données qui proviennent de stations choisies dans des régions, provinces ou États en particulier, ou encore pour le pays dans son ensemble. Publiés une semaine ou deux après la fin de chaque mois, ces bulletins proposent habituellement des données récentes qui n'ont peut-être pas été soumises à un contrôle de qualité complet. Lorsqu'ils sont publiés un mois ou plus après la fin du mois d'observation, ils devraient cependant contenir des données répondant toutes aux critères normalisés de contrôle de qualité spécifiques aux données climatologiques historiques. Les températures maximales et minimales et les hauteurs totales de précipitation pour chaque jour y sont présentées, ainsi peut-être que les températures relevées aux heures fixes avec les valeurs associées de l'humidité. La vitesse journalière moyenne du vent et sa direction dominante, la durée de l'insolation et d'autres données présentant localement une importance (notamment le nombre de degrés-jours de chauffe, de réfrigération et de croissance) peuvent également y être incluses. Les moyennes, les extrêmes et d'autres données statistiques provenant de toutes les stations peuvent aussi y figurer si ce type de données est disponible.

La plupart des bulletins mensuels ne contiennent que des données climatologiques de surface, mais certains SMHN y incluent également des données de base provenant de stations aérologiques, ou publient séparément des bulletins mensuels contenant ces données. Dans ces bulletins mensuels, figurent habituellement, pour les surfaces isobares standards, les valeurs quotidiennes et mensuelles moyennes de l'altitude (mètres géopotentiels), de la température, de l'humidité, de la vitesse et de la direction du vent, relevées au cours d'un ou deux radiosondages journaliers à heure fixe.

Parmi les publications climatologiques les plus utiles, on compte celles qui contiennent des tableaux simples des valeurs mensuelles et annuelles de la température quotidienne moyenne et de la hauteur totale des précipitations. Ces tableaux sont préparés par les SMHN et publiés soit sur papier soit sous forme électronique. Les SMHN doivent aussi publier, au moins une fois par décennie, un ensemble complet de données climatologiques statistiques pour un groupe de stations sélectionnées en fonction de leur représentativité.

Les périodiques publiés par l'OMM sont constitués à partir de données fournies par les pays Membres. On peut citer par exemple la publication intitulée *Monthly Climatic Data for the World* (données de toutes les stations CLIMAT), les *World Weather Records* (pour chaque station, les valeurs historiques, mensuelles et annuelles de la pression à la station, de la pression au niveau de la mer, de la température et des précipitations) et les *Marine Climatological Summaries* (données statistiques mensuelles, annuelles et décennales pour les océans avec cartes).

6.6.3 Publications occasionnelles

À la différence des périodiques de données climatologiques, qui sont produits suivant un calendrier établi, les publications occasionnelles paraissent suivant le besoin. Elles se présentent sous une forme destinée à satisfaire les besoins d'un grand nombre d'utilisateurs pendant une durée relativement longue de sorte qu'elles ne nécessitent pas de mises à jour fréquentes. Ces publications sont destinées à certains utilisateurs qui ont besoin d'informations pour planifier des investissements, concevoir des équipements et des bâtiments qui doivent durer des décennies ou des siècles, ainsi qu'aux particuliers dont l'intérêt est purement intellectuel ou occasionnel, ou encore aux chercheurs dans le domaine des sciences de l'atmosphère et de l'océan. Elles peuvent être conçues aussi pour résumer ou expliquer des phénomènes peu courants, notamment des conditions météorologiques extrêmes, et fournir une description ou assurer un suivi s'agissant d'un phénomène prévu, un épisode El Niño intense par exemple. Le contenu et la présentation d'une publication occasionnelle doivent tenir compte de l'intérêt et des besoins des utilisateurs auxquels elle s'adresse.

De longues séries, ininterrompues et homogènes, de données présentent un grand intérêt pour les études climatologiques comparées et pour les recherches sur les fluctuations, les tendances et les changements climatiques. Plusieurs SMHN ont publié de telles séries pour un certain nombre de stations où les conditions d'exposition et les méthodes d'observation sont restées essentiellement constantes. Les séries de données les plus couramment disponibles et demandées sont celles qui portent sur la température et sur les précipitations, bien que les données sur le vent, la pression, l'insolation, la nébulosité et d'autres éléments climatiques puissent également être publiées. Certains SMHN incluent dans leurs annuaires ou d'autres bulletins annuels des séries de données climatologiques historiques. Il convient aussi de publier et de mettre à jour périodiquement des monographies consacrées au climat d'un pays ou d'une région qui présentent un intérêt pour un large éventail d'utilisateurs. Il est recommandé de mettre à disposition ces publications et données sous une forme électronique, ce qui en facilite l'accès et l'échange.

Des séries de cartes présentées sous forme d'atlas constituent aussi une publication occasionnelle utile. Les légendes des cartes climatologiques doivent fournir des indications précises sur les éléments cartographiés et indiquer le nombre des stations d'où proviennent les données en précisant la période des relevés.

6.6.4 Produits types

Par rapport à des produits créés spécialement pour des utilisateurs bien précis et qui représentent la meilleure solution pour ces utilisateurs, il est généralement avantageux de mettre au point un produit type dont peut se servir un large éventail d'utilisateurs. Par exemple, un produit présentant des degrés-jours sera utile au domaine de la gestion de l'énergie et à celui de la production de fruits. En choisissant avec soin le contenu et la forme de présentation d'un produit,

il est possible de répartir le coût d'élaboration entre de nombreux utilisateurs. Les produits types viennent s'intercaler entre les périodiques de données climatologiques et les produits personnalisés. Pour bien répondre aux besoins des différents groupes d'utilisateurs, on gagne à procéder localement à l'élaboration de ces produits.

Les demandes et les livraisons de produits se font de plus en plus par l'intermédiaire de l'internet, si bien qu'on en vient à considérer aussi l'interface utilisateur comme un produit des Services climatologiques, une normalisation de cette interface étant perçue comme une amélioration de la qualité et de l'utilité des produits climatologiques.

6.6.5 Produits spécialisés

Il est souvent nécessaire de mettre au point des produits destinés à un utilisateur ou un secteur en particulier. Étant donné que les exigences particulières d'un groupe d'utilisateurs ne correspondent pas toujours aux exigences d'autres groupes, le coût d'une large diffusion ne peut se justifier pour ce type de produit.

De tels produits de climatologie appliquée sont donc ajustés aux besoins d'un utilisateur ou d'un groupe d'utilisateurs en particulier. Ils constituent un trait d'union entre les données observées et les exigences spécifiques à un utilisateur. Ainsi les observations sont transformées en un produit à valeur ajoutée, utile à ses destinataires. Pour élaborer ce type de produit, il faut analyser les données et présenter l'information en se concentrant sur les caractéristiques qui permettront à l'utilisateur de tirer un avantage optimal de l'information dont il se sert. C'est en général l'usage auquel le produit est destiné qui conditionne les analyses et transformations de données qu'il faut exécuter ainsi que le mode de livraison du produit.

Un Service climatologique doit pouvoir accepter les demandes de produits spécialisés et élaborer ce type de produits de façon à satisfaire les utilisateurs, ce qui doit mobiliser toutes ses compétences en matière d'interaction avec les utilisateurs et de commercialisation dont il a déjà été question. Bien que les produits spécialisés ne soient pas destinés au grand public, les utilisateurs s'attendent à ce que la qualité du contenu et de la présentation soit au moins comparable à celle des autres produits.

Prenons pour exemple d'application spécifique à laquelle serait destiné un produit, celle que représente le besoin d'un producteur de fruits en données quotidiennes en degrés-heures pour pouvoir traiter par pesticides un feu bactérien. Quand on ne dispose pour l'emplacement visé que des températures minimales et maximales quotidiennes, il est possible de calculer les degrés-jours en établissant la moyenne de ces deux valeurs. Mais comme en l'occurrence on a besoin de degrés-heures, il faut, par une analyse, établir une relation entre les degrés-jours ainsi calculés et les degrés-heures. Il faut aussi évaluer sous quelles conditions cette relation se vérifie et quel est son degré d'incertitude. Une fois la relation établie, il est possible de proposer à l'utilisateur un produit contenant des degrés-heures, alors que ces valeurs ne sont pas directement issues d'une mesure.

Une analyse des inondations est aussi un exemple de produit spécialisé. Les inondations sont un phénomène naturel dont l'ampleur varie, allant d'un ruissellement pluvial le long du flanc saturé d'une colline au débordement de grands cours d'eau. Les conséquences des crues sont multiples, de champs gorgés d'eau et de routes bloquées à l'inondation d'habitations et d'immeubles à usage commercial, voire parfois à des pertes en vies humaines. Les estimations de la fréquence des crues sont nécessaires à la planification et à l'évaluation des défenses contre les crues; à la conception de structures comme les ponts, les caniveaux ou les déversoirs de réservoirs; et à la préparation des cartes de risques d'inondations servant à la planification de nouveaux aménagements ou pour les besoins des assurances. Pour établir des estimations de la fréquence des crues, il faut disposer notamment de produits sur la probabilité des hauteurs de précipitations. Pour produire des renseignements sur les risques de précipitations, soit une information à valeur ajoutée, il faudra faire subir une analyse statistique aux données découlant des observations qui se présentent généralement sous la forme de résumés standards (voir le chapitre 5). Si les analyses

de risques se révèlent utiles à plusieurs utilisateurs différents, il sera justifié d'en diffuser les résultats sous la forme d'une publication générale.

6.6.6 **Produits de la surveillance du climat**

La surveillance de la variabilité du climat dans le monde fait partie des objectifs du Programme mondial des données climatologiques et de surveillance du climat (PMDSC). Le travail d'exploitation et de mise à disposition des données et informations sur le climat réalisé par un Service climatologique contribue à l'atteinte de cet objectif. Pour surveiller le climat d'un pays et en établir un diagnostic, il est nécessaire de percevoir les conditions climatiques que connaît le pays en tant qu'élément du système climatique planétaire. Outre le fait de surveiller les climats locaux pour des intérêts nationaux et d'établir des relations entre les épisodes actuels et les régimes historiques, un Service climatologique doit placer les variations d'échelle locale dans un contexte plus large, régional, voire mondial.

Dans un même pays, l'observation et la surveillance du climat peuvent relever de plusieurs organismes. Quand un organisme publie des données d'observation, des résultats d'analyse et des données statistiques, les produits qu'il crée sont habituellement présentés sous une forme destinée à répondre à ses propres besoins. Ces produits risquent donc de ne pas convenir à d'autres organismes. Par ailleurs, il peut ne pas être facile pour un utilisateur en particulier de choisir des produits qui répondent à ses propres besoins parmi les produits de surveillance du climat distribués par divers organismes ou de réunir un ensemble disparate de produits pour tenter d'y voir clair dans la complexité du système climatique. Pour beaucoup d'utilisateurs, il est difficile aussi de percevoir le lien entre les caractéristiques du système climatique planétaire et les conditions climatiques que connaît leur propre pays. Il est donc souhaitable qu'un Service climatologique traite ses propres données et les résultats des analyses qu'il exécute, et que, dans la mesure du possible, il les assemble avec les produits d'autres organismes pour diffuser rapidement un ensemble de documents comprenant l'avis de différents organismes quant aux conditions climatiques actuelles.

Lorsqu'il ne dispose pas des données dont il a besoin, un SMHN devrait obtenir des données et analyses régionales ou mondiales auprès d'organismes étrangers ou internationaux, pour ensuite traiter l'information afin de la présenter sous une forme adaptée à un usage local ou national. Il devrait adjoindre, à ces analyses d'échelle mondiale, son propre avis sur les liens éventuels entre les conditions climatiques locales et les champs climatiques à grande échelle. Les activités de surveillance exigent d'un Service climatologique qu'il se soit doté de l'expertise indispensable pour analyser l'état du climat passé et actuel ainsi que les téléconnexions mondiales et régionales, et pouvoir ainsi présenter aux utilisateurs du secteur public et du secteur privé une information synthétique. Pour pouvoir établir des bulletins de prévision et de suivi des conditions climatiques, il faut avant tout disposer de produits de surveillance de qualité.

6.6.7 **Indices**

On a souvent recours à des indices pour présenter aux utilisateurs des régimes climatiques historiques sous une forme simple et explicite (voir la section 4.4.6). Les indices climatiques sont largement utilisés pour faire apparaître les caractéristiques du climat dans les prévisions et déceler les changements climatiques. Ils peuvent s'appliquer à une station climatologique en particulier ou décrire certains aspects du climat propre à une zone. Ils combinent généralement plusieurs éléments pour décrire les caractéristiques de différents paramètres: sécheresse, continentalité, phases phénologiques de la végétation, degrés-jours de chauffe, régimes de la circulation à grande échelle, téléconnexions, etc. Avec les informations qu'il fournit aux utilisateurs, un Service climatologique devra souvent fournir une interprétation de la signification de la valeur d'un indice, de l'évolution des valeurs de cet indice en fonction du temps et parfois des procédures de calcul de l'indice. Voici quelques exemples d'indices: l'indice ENSO (El Niño-Oscillation australe); l'indice de l'oscillation de l'Atlantique Nord; des descripteurs tels que l'indice d'humidité disponible, qu'on utilise pour établir des stratégies de planification des cultures; les indices

agrométéorologiques, notamment l'indice Palmer de sévérité de la sécheresse, l'indice d'aridité et l'indice de surface foliaire, qui servent à décrire et à surveiller le degré d'humidité disponible; ou encore l'indice moyen de mousson, qui fournit une répartition spatiale sommaire des sécheresses et des inondations. Comme on peut s'en apercevoir à la lecture de la publication intitulée *Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs 1998–2001* (WMO/TD-No. 1071), la création d'indices portant spécifiquement sur la détection des changements climatiques, de la variabilité du climat et des extrêmes climatiques, ainsi que l'évaluation de ces indices, ne cessent de progresser.

6.7 MODÈLES CLIMATIQUES ET PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DU CLIMAT

Grâce aux modèles climatiques, il est possible de simuler et d'étudier le système climatique, son comportement, ses composantes et leurs interactions, ainsi que son évolution future. Les connaissances sur le système climatique ayant bien progressé et les outils de calcul étant devenus de plus en plus puissants et rapides, la mise au point de modèles climatiques d'une grande complexité devient possible.

Parmi les modèles les plus simples figurent ceux qui reposent sur des relations empiriques ou statistiques entre différentes composantes du système climatique. On utilise beaucoup ces modèles pour décrire l'évolution probable du climat à partir de valeurs moyennes prévues d'éléments climatiques, en général pour des périodes de plusieurs mois. Les modèles les plus complexes simulent, à partir d'analyses et de couplages, l'intégralité du système climatique pour l'ensemble du globe et servent à prévoir le climat à venir de façon explicite ou selon certaines hypothèses de départ. Les modèles climatiques régionaux se concentrent sur la représentation du climat à des échelles spatiales plus fines et pour une zone relativement restreinte. Les perspectives d'évolution du climat sont dérivées de l'analyse et de l'interprétation des observations et des sorties de modèles.

6.7.1 Produits concernant l'évolution probable du climat

Les perspectives d'évolution du climat sont des prévisions portant sur les valeurs des éléments climatiques sous forme de moyennes, sur des échelles de temps allant du mois à l'année. Les éléments climatiques qu'on prévoit sont en général la température moyenne de l'air en surface et le cumul moyen des précipitations pour une période donnée. Certains centres établissent aussi des prévisions de la durée d'insolation, des chutes de neige, du nombre d'occurrences de cyclones tropicaux et du début et de la fin des moussons. On peut aussi estimer que les prévisions du début, de la fin et de l'intensité des épisodes ENSO et de la température de la surface de la mer dans les régions tropicales de l'océan Pacifique représentent des produits de prévision climatique, étant donné que le phénomène ENSO a une incidence importante sur le climat de nombreuses régions dans le monde.

Les bulletins *Info-Niño/Niña* de l'OMM, un produit consensuel fondé sur les contributions d'un réseau mondial de centres de prévision, fournissent un suivi de la phase et de l'intensité du phénomène El Niño-Oscillation australe. Les SMHN, les centres mondiaux de production (CMP) de prévisions à longue échéance et d'autres institutions internationales produisent des prévisions climatiques à caractère opérationnel. Dans ces bulletins, il est constaté que d'autres facteurs, outre le phénomène ENSO, influent sur les régimes climatiques saisonniers partout dans le monde, et qu'il importe de disposer d'évaluations régionales détaillées des conditions dominantes. C'est en prenant en compte les effets prévus du phénomène ENSO et ceux propres à d'autres régions du globe qu'on peut généralement déterminer le plus précisément possible les variations des régimes climatiques auxquels il faut s'attendre à l'échelle régionale et locale dans les mois à venir. De tels efforts exigent un suivi rigoureux d'indicateurs tels le phénomène ENSO et les températures de surface des océans Indien et Atlantique. Il y a lieu de considérer ces bulletins comme une source d'information complémentaire à des prévisions climatiques saisonnières plus

détaillées de portée régionale ou nationale, notamment celles émanant des forums régionaux sur l'évolution probable du climat et des SMHN.

Les SMHN, les CMP et d'autres institutions internationales produisent des prévisions climatiques opérationnelles. Schématiquement, il est possible de classer les méthodes de prévision du climat en deux catégories: les méthodes empiriques-statistiques et les méthodes dynamiques. Les méthodes empiriques-statistiques reposent sur des relations dérivées des données historiques, tandis que les méthodes dynamiques fournissent des prévisions numériques établies à l'aide de modèles de la circulation atmosphérique générale ou de modèles couplés de la circulation générale de l'océan et de l'atmosphère. Comme les prévisions numériques nécessitent d'énormes capacités de calcul, seul un petit nombre de centres climatologiques dans le monde sont en mesure d'en produire. Ainsi plusieurs SMHN établissent des prévisions pour leur pays à partir de produits que leur communiquent les CMP ou d'autres institutions internationales. Les centres climatologiques régionaux interprètent les prévisions mondiales et en réduisent l'échelle à leur région, tandis que les forums régionaux sur l'évolution probable du climat produisent en coopération des produits consensuels sur le climat, à la création desquels participent plusieurs pays soumis au même type de climat.

Les échéances de ces prévisions sont très variées, allant de moins d'un mois à plus d'un an; le plus souvent ce sont des prévisions à trois mois. La plupart des prévisions sont diffusées régulièrement tout au long de l'année, soit tous les mois ou tous les trois mois, et d'autres ne sont publiées que pour des saisons en particulier, avant le début de la saison des pluies par exemple. Les éléments prévus et les périodes sur lesquelles portent les prévisions peuvent varier en fonction des caractéristiques climatiques de chaque pays. Elles varient aussi suivant les besoins des utilisateurs en la matière.

Les éléments prévus sont rarement présentés en valeur absolue; il s'agit plus généralement de catégories, notamment sous la forme suivante: valeurs supérieures à la normale, proches de la normale ou inférieures à la normale. Quand de telles catégories sont appliquées, on peut distinguer deux types de prévisions: une prévision catégorielle indiquant la catégorie la plus probable et une prévision probabiliste indiquant la probabilité d'occurrence de la catégorie. Un certain degré d'incertitude pèse inévitablement sur une prévision climatique, en raison de la nature chaotique de l'atmosphère, du manque de données d'observation et des approximations inhérentes aux méthodes de prévision. Compte tenu de cette incertitude, les prévisions probabilistes sont en général plus robustes que les prévisions catégorielles. Les prévisions probabilistes sont cependant plus difficiles à appliquer; les utilisateurs ont besoin d'être informés des avantages et des inconvénients de ce type de prévision, ainsi que des méthodes d'analyse coûts-avantages. Quand des prévisions donnent des valeurs numériques pour certains éléments, on peut exprimer l'incertitude sous la forme d'un intervalle de confiance ou en adjoignant à la prévision les données statistiques de vérification des prévisions passées. Il appartient aux Services climatologiques de prendre en compte, s'agissant de l'utilisation des prévisions probabilistes, des résultats des expériences de vérification des prévisions passées.

Il est possible de fournir les produits de prévision directement à des utilisateurs en particulier, le Service climatologique étant alors souvent appelé à fournir à l'utilisateur une explication des prévisions. Les médias constituent un mode de diffusion courant pour les prévisions destinées au public; c'est également le cas de l'internet. Certains centres climatologiques ne fournissent des prévisions que directement aux utilisateurs visés.

6.7.2 **Prévisions et projections climatiques**

Une prévision climatique est une déclaration probabiliste portant sur les échelles de plusieurs années à plusieurs décennies. Elle se fonde sur des conditions connues à l'heure actuelle et des hypothèses formulées quant aux processus physiques qui détermineront les changements futurs. En général, selon ce type de prévision, on suppose que les facteurs en dehors de ce qui est inclus explicitement ou implicitement dans le modèle de prévision n'auront pas d'influence marquée sur ce qui doit se produire. Dans ce sens, une prévision est principalement influencée par les

conditions initiales que les observations permettent de connaître. À titre d'exemple, une prévision météorologique, selon laquelle une tempête de neige importante se produira au cours des quelques jours à venir, est principalement déterminée par l'état de l'atmosphère et les conditions passées récentes, établis à partir des observations. Les petites variations pouvant se produire au cours des jours à venir et touchant d'autres facteurs pouvant avoir une influence à des échelles de temps plus longues, notamment les températures des océans ou les activités humaines (conditions aux limites), ont probablement une importance moindre dans le cas d'une prévision météorologique. La prévision climatique est de nature probabiliste, car elle tient compte de différentes incertitudes, notamment en ce qui concerne l'exactitude des observations et l'état chaotique de l'atmosphère. Ce qui importe pour les décideurs, c'est qu'une prévision est une déclaration portant sur la probabilité qu'un phénomène se produira, quoiqu'ils fassent (ils ne peuvent changer le temps qu'il fera demain, ni les quantités de pluie qui tomberont au cours de la saison à venir).

Une projection climatique est en général une déclaration probabiliste portant sur les échelles de plusieurs décennies à plusieurs siècles et reposant sur des hypothèses au sujet de conditions déterminantes. Par opposition aux prévisions, les projections prennent spécifiquement en compte les variations importantes dans un ensemble de conditions aux limites, par exemple une augmentation des émissions de gaz à effet de serre, pouvant avoir une influence sur le climat futur. Il en découle des espérances conditionnelles (si cela se produit, alors voici ce qu'il faut prévoir). Pour les projections les plus lointaines, on met au point des scénarios reposant sur différentes hypothèses ou appréciations. À titre d'exemple, dans ses évaluations successives, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a établi des projections proposant différentes augmentations possibles de la température au cours du XXI^e siècle, suivant différents scénarios planétaires plausibles concernant la croissance démographique et économique, les progrès des technologies dans le domaine de l'énergie et les émissions de différentes substances. À l'aide de différents modèles climatiques, présentant chacun sa propre sensibilité au climat, on examine les effets sur le climat des changements résultants de la composition atmosphérique. Ainsi, les projections concernant les changements climatiques prennent en compte un large éventail de possibilités raisonnables quant au développement de la société et au comportement du climat. La démarche ne consiste pas à savoir ce qui se produira réellement ou suivant quelle probabilité. Pour les décideurs, les projections indiquent les effets auxquels pourraient contribuer des mesures précises, prises en application de politiques adoptées.

6.7.3 Scénarios climatiques

Les modèles climatiques mondiaux servent très fréquemment à établir des scénarios climatiques. En parlant de scénario climatique, on se réfère à un climat futur plausible envisagé pour analyser les conséquences probables de changements climatiques d'origine anthropique, et qui représente aussi les conditions futures découlant de la variabilité naturelle du climat. Les rapports et publications du GIEC (par exemple GIEC, 2007) constituent une bonne source d'information au sujet des scénarios climatiques.

6.7.4 Modèles climatiques mondiaux

Les modèles climatiques mondiaux sont conçus principalement pour représenter les processus climatiques à l'échelle planétaire. Ils constituent le principal moyen d'étudier la variabilité du climat passé, présent et futur. Ils se fondent sur les lois physiques qui gouvernent les processus climatiques et les interactions entre toutes les composantes du système climatique, exprimées sous la forme d'équations mathématiques à trois dimensions. Pour résoudre ces équations déterminantes fortement non linéaires, on recourt au calcul numérique sur une grille à quatre dimensions représentant l'atmosphère (trois dimensions spatiales plus une dimension temporelle). De nombreux processus physiques, notamment les nuages pris individuellement, le phénomène de convection ou le phénomène de turbulence, se produisent à des échelles spatiales et temporelles trop petites pour pouvoir être directement pris en compte dans cette grille. Il faut pour cela avoir recours à une représentation simplifiée à l'aide des paramètres à grande échelle du modèle.

Ces modèles ont commencé à voir le jour au cours des années 1960; ils se sont beaucoup perfectionnés grâce aux progrès rapides accomplis depuis lors. Leur développement s'est produit en parallèle avec celui des modèles de prévision numérique du temps. Au début, les modèles de la circulation générale (MCG) visaient à coupler l'atmosphère et l'océan. À présent, la plupart d'entre eux comprennent des représentations de la cryosphère, de la biosphère, de la surface terrestre et de la chimie des sols, sous la forme de modèles intégrés de plus en plus complexes; on les appelle parfois des modèles du système climatique.

La confiance qu'il y a lieu d'accorder aux résultats que fournissent les modèles de circulation générale a considérablement augmenté grâce à des comparaisons systématiques de modèles, à la capacité de certains modèles de reproduire les grandes tendances du climat du XX^e siècle et de certains paléoclimats, et à la simulation améliorée de grandes caractéristiques de la circulation générale liées à des phénomènes, tel l'ENSO. D'une façon générale, pour beaucoup de régions dans le monde, les MCG fournissent des simulations climatiques crédibles à des échelles spatiales sous-continentales et à des échelles temporelles de l'ordre de la saison à la décennie. On les considère par conséquent comme des outils capables de fournir des projections utiles concernant le climat futur. Les projections climatiques dont s'est servi le GIEC pour établir ses évaluations découlent de ces MCG qui contribuent en outre pour beaucoup à l'élaboration des prévisions saisonnières dont il est question à l'occasion des forums sur l'évolution probable du climat.

On s'intéresse de près à la modélisation du climat mondial pour qu'en l'affinant, on parvienne à simuler le climat aux échelles plus petites auxquelles sont ressenties la plupart des incidences et auxquelles il est possible d'intervenir. Pour déterminer les caractéristiques du climat à échelle plus petite, on examine l'interaction des forçages et des circulations suivant des échelles spatiales allant de l'ensemble de la planète, à de grandes régions et à des zones locales, et suivant des échelles temporelles allant d'une durée inférieure à la journée à plusieurs décennies. Les forçages correspondant à de grandes régions et à des zones relativement restreintes sont causés par les caractéristiques complexes de la topographie et de l'utilisation des sols, les interactions à l'interface terre-océan, les régimes régionaux et locaux de la circulation atmosphérique, notamment les brises marines et les tempêtes tropicales, la distribution des aérosols et des gaz dans l'atmosphère, et les effets des lacs, de la neige et des glaces de mer. Le climat d'une région peut aussi subir une forte influence des processus de téléconnexion qui engendrent des anomalies en des lieux éloignés. Les processus sont souvent fortement non linéaires, ce qui rend la simulation et la prévision difficiles.

6.7.5 **Réduction d'échelle: modèles climatiques régionaux**

Il est impossible d'obtenir, directement des modèles, une information d'échelle inférieure à leur propre résolution. On fait donc appel à un processus de réduction d'échelle qui établit une relation entre les propriétés du modèle de grande échelle et celle de régions d'échelle plus petite. On adopte pour cela une méthode soit dynamique soit statistique ou alors une approche associant ces deux méthodes.

La méthode dynamique consiste à intégrer des modèles haute résolution à domaine limité dans un modèle mondial plus grossier. Les outils qu'on utilise à cette fin sont les modèles climatiques régionaux (MCR) qui normalement se servent de l'information synoptique et à grande échelle d'un MCG pour exécuter une simulation dynamique d'échelle régionale ou de moyenne échelle. Le principal problème à résoudre consiste à établir une relation entre l'information correspondant à la maille de résolution grossière du MCG par les limites et la maille plus fine du MCR. Étant donné que le MCR est essentiellement tributaire du MCG, le fait que le MCG offre de bonnes performances est de première importance pour la modélisation à échelle plus fine.

La méthode statistique de descente d'échelle consiste à appliquer aux deux échelles les relations statistiques qu'on a pu déceler dans les observations du climat. Il existe des relations fonctionnelles entre les caractères qu'on trouve aussi bien à grande échelle qu'à échelle régionale,

notamment les moyennes, la variabilité ou les relations de dépendance par rapport au temps. L'inconvénient majeur d'une réduction d'échelle selon cette méthode est la nécessité de disposer de séries d'observations historiques appropriées sur lesquelles fonder les relations statistiques.

Les deux méthodes sont sujettes aux incertitudes dues au manque de connaissances sur le système terrestre, aux approximations relatives aux paramètres et à la structure des modèles, au caractère aléatoire et aux activités humaines. La validation et la vérification des résultats d'un modèle d'échelle réduite constituent un exercice difficile, en particulier quand on ne dispose pas d'une base d'observations appropriée. Des travaux de recherche se poursuivent qui devraient permettre de réduire ces incertitudes.

6.7.6 **Modèles climatiques d'échelle locale**

Par opposition aux modèles climatiques mondiaux et régionaux, dont l'objectif est de simuler le climat de l'ensemble de la planète ou d'une grande partie du globe sur une durée relativement longue, les modèles climatiques d'échelle locale visent à simuler le climat à micro-échelle pour une surface restreinte de quelques mètres carrés à quelques kilomètres carrés sur une période relativement courte. La modélisation climatique d'échelle locale sert à différents usages, notamment pour planifier des projets industriels potentiellement dangereux; pour planifier des émissions d'odeurs et de bruit provenant d'installations industrielles ou agricoles et de routes; en matière d'urbanisme, pour planifier par exemple la ventilation, les flux d'air froid et les stress thermiques dans un immeuble, une zone d'habitation ou une zone industrielle; pour mettre en œuvre des services d'alerte et de secours en fonction des préoccupations locales notamment pour répondre aux situations où des seuils de qualité de l'air et de pollution sont atteints; et pour assurer la gestion de la répartition des dangers.

Les modèles varient, allant de méthodes simples mais rapides et fortement paramétrisées, notamment des approches statistiques, à des outils complexes qui, par le calcul numérique, résolvent les équations hydrodynamiques du mouvement en tenant compte d'un éventail d'autres processus. Parfois les modèles n'utilisent qu'un nombre très restreint de stations de mesure et de données couvrant des périodes d'une durée allant de quelques semaines à plusieurs années. Les exécutions de ces modèles portent sur de courtes durées, en général plusieurs jours seulement; elles sont répétées pour couvrir la période climatique, l'ensemble des situations météorologiques représentatives, les éléments météorologiques et parfois les éléments chimiques qui sont à l'étude. Ce processus fournit un échantillon ou un ensemble de résultats qu'il est possible d'interpréter du point de vue statistique pour parvenir à l'information climatologique recherchée.

6.8 **PRODUITS DE RÉANALYSE**

Lorsqu'on parle d'analyse et de prévision numériques du temps à caractère opérationnel, l'analyse est le processus qui permet de proposer une représentation, cohérente sur le plan interne, de l'environnement sur une grille à quatre dimensions. Compte tenu du caractère d'actualité de la prévision météorologique, l'analyse de départ doit en général débiter avant qu'on dispose de toutes les observations requises. La réanalyse fait appel au même processus (et souvent aux mêmes systèmes), mais comme elle se déroule plusieurs semaines, voire plusieurs années plus tard, elle repose sur un jeu plus complet d'observations. Les systèmes de réanalyse comprennent en général un modèle de prévision chargé de décrire comment évolue l'environnement dans le temps, tout en conservant une certaine cohérence interne. Par opposition aux analyses sur lesquelles reposent la prévision numérique opérationnelle, pour laquelle on actualise en permanence les modèles afin de tenir compte des derniers progrès accomplis par la recherche, on procède à une réanalyse en utilisant un système de modélisation fixe tout au long de la période de réanalyse afin d'éviter les ruptures d'homogénéité qu'on trouve en général dans les

jeux de données opérationnels, en raison des modifications que subissent les modèles au fil du temps.

Les résultats d'une réanalyse figurent sur une grille uniforme et il n'y manque aucune donnée. Ils se présentent sous la forme d'un relevé historique intégré de l'état de l'environnement atmosphérique, composé d'un ensemble de données ayant toutes fait l'objet du même traitement. On se sert fréquemment des résultats de réanalyses en remplacement des données d'observation, mais cela exige certaines précautions. Bien que les algorithmes d'analyse reposent en grande partie sur les observations dont on peut disposer, dans les régions où ces observations sont rares, la grille issue d'une réanalyse est fortement conditionnée par le modèle de prévision. Quand les projets de réanalyse portent sur plusieurs décennies, on constate en général beaucoup d'hétérogénéité touchant le type et la couverture des données au cours de la période examinée, notamment entre les périodes avant et après l'observation par satellites. Par ailleurs, l'influence relative des observations et du modèle varie suivant les variables climatiques; certaines variables sont fortement influencées par les données d'observation utilisées, tandis que d'autres sont uniquement dérivées du modèle. Il faut bien tenir compte de ces éléments quand il s'agit d'interpréter les produits de réanalyse. À titre d'exemple, les réanalyses de variables dynamiques donnent de bien meilleurs résultats que les réanalyses de précipitations, en partie parce que les processus des précipitations sont mal représentés par les modèles.

Les résultats des réanalyses présentent aussi des limites, surtout évidentes dans les régions à l'orographie complexe (en particulier, dans les régions montagneuses), ainsi que dans d'autres régions, quand les programmes d'assimilation et de traitement sont incapables, en raison du lissage, de reproduire les processus atmosphériques réels, caractérisés par un fort gradient spatial et temporel. Le problème de la localisation suivant des échelles spatiales et temporelles plus fines que la grille de réanalyse reste aussi d'actualité. On s'efforce à l'heure actuelle d'exécuter des «réanalyses régionales» à partir de données d'observation locales et à l'aide de modèles haute résolution à domaine limité. Comme c'est le cas pour tout autre technique d'analyse, la validation des modèles, l'assurance de la qualité et les indicateurs d'erreurs sont nécessaires si on veut pouvoir interpréter correctement les résultats obtenus.

Pour créer des bases de données environnementales permettant de mieux évaluer les changements systématiques, on a recours à l'assimilation d'informations issues non seulement des sciences atmosphériques, mais aussi de l'océanographie, de l'hydrologie et de la télédétection. À l'heure actuelle, les principales bases de données de réanalyse, d'échelle mondiale, sont celles établies par le Centre national de recherche atmosphérique et les Centres nationaux de prévision environnementale, aux États-Unis d'Amérique, ainsi que par le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme et par le Service météorologique japonais. Les résultats de tous ces efforts de réanalyse ont été largement utilisés dans la surveillance du climat, les études de la variabilité du climat et la prévision des changements climatiques. Il importe d'évaluer dans quelle mesure relative les techniques de réanalyse parviennent à représenter les caractéristiques observées dans une région donnée, avant d'en utiliser les résultats dans le cadre d'études climatologiques.

Une meilleure connaissance des processus physiques, chimiques et biologiques qui conditionnent l'environnement, combinée à des données provenant d'un large éventail de sources différentes, bien au-delà des sciences atmosphériques, devrait se traduire par de nouvelles améliorations des bases de données de réanalyse. Des produits de réanalyse plus précis et plus détaillés apparaîtront au fur et à mesure qu'on perfectionnera les modèles numériques et que les capacités de calcul gagneront en puissance pour atteindre de meilleures résolutions.

6.9 **EXEMPLES DE PRODUITS ET DE REPRÉSENTATIONS GRAPHIQUES DES DONNÉES**

Il est possible de présenter les données de différentes façons. Les figures 6.1 à 6.17 fournissent des exemples de représentations graphiques simples mais efficaces.

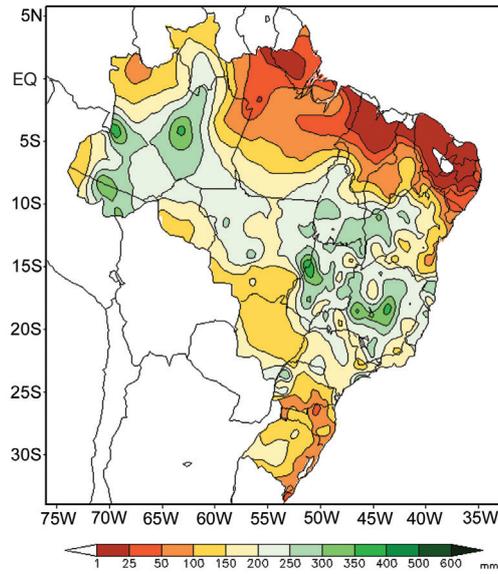


Figure 6.1. Carte d'isohyètes

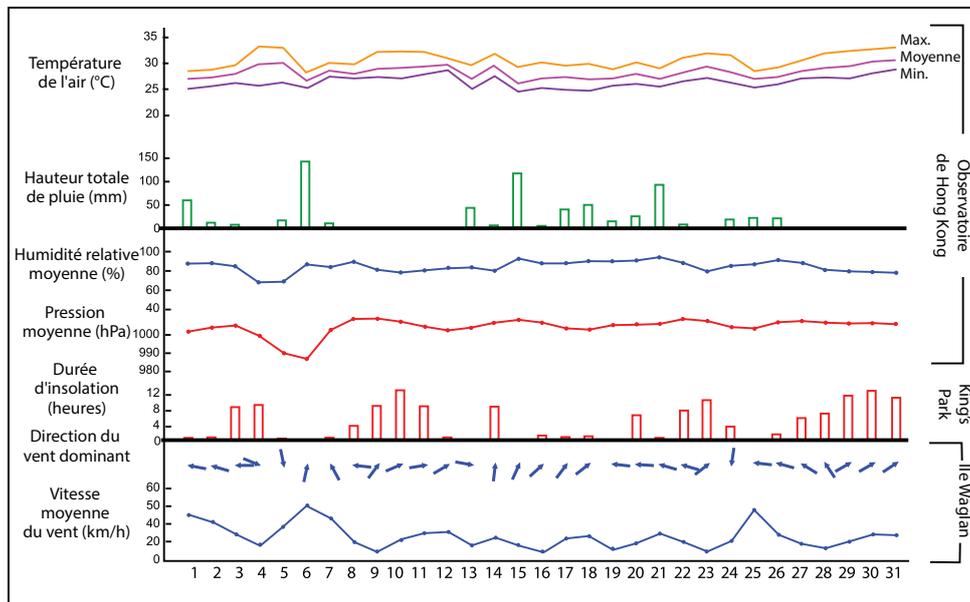


Figure 6.2. Représentation graphique des valeurs quotidiennes de plusieurs éléments

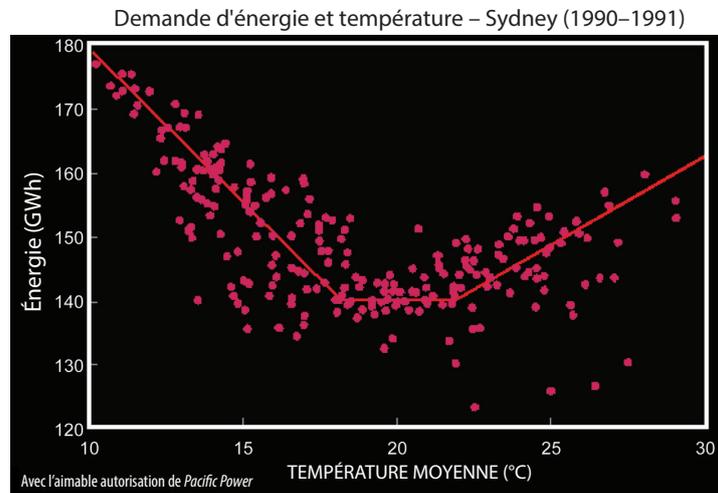


Figure 6.3. Diagramme de dispersion de la demande en énergie par rapport à la température, avec tracé d'une courbe de tendance

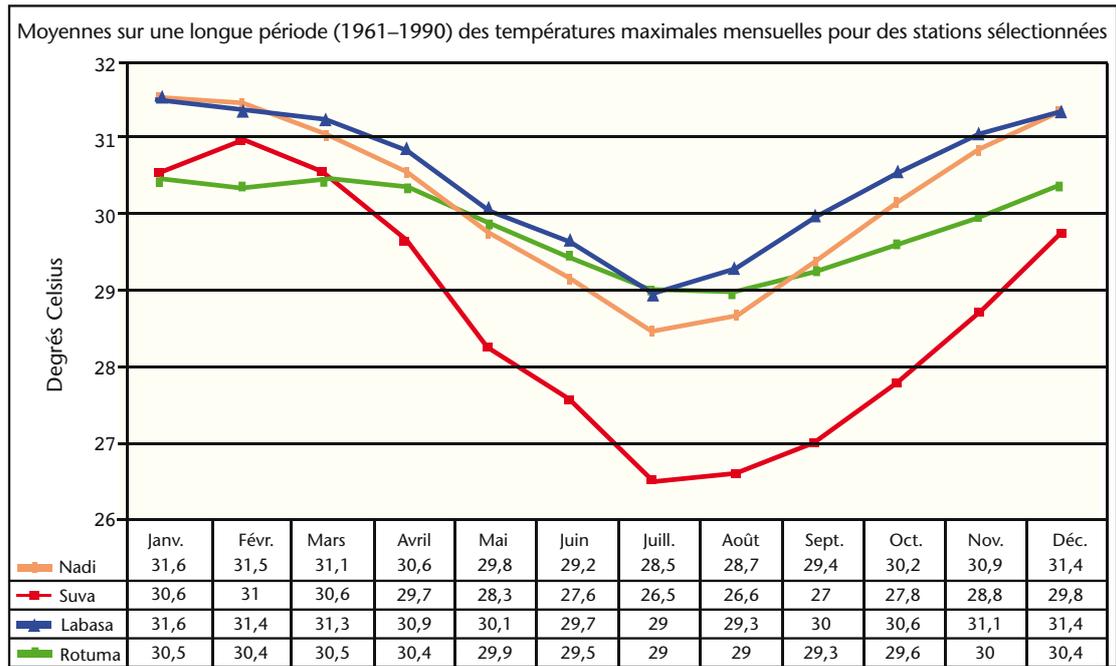


Figure 6.4. Courbe et tableau de températures pour plusieurs stations

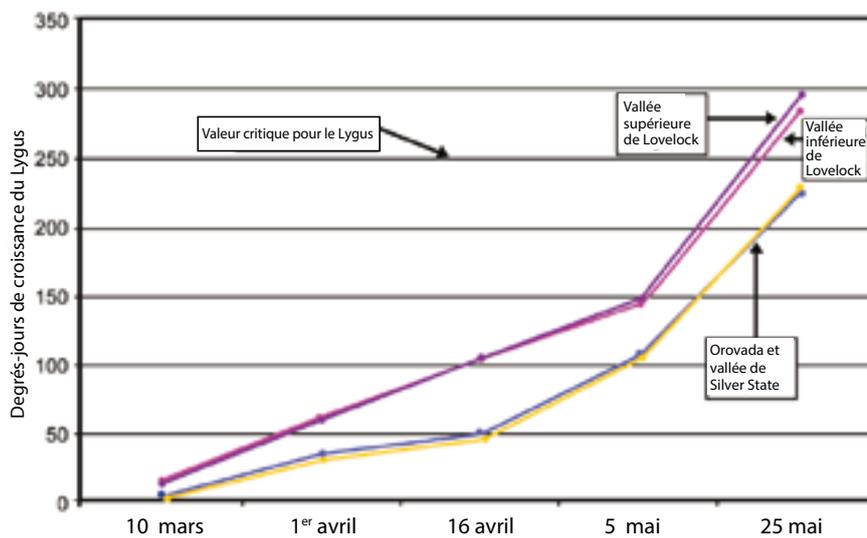
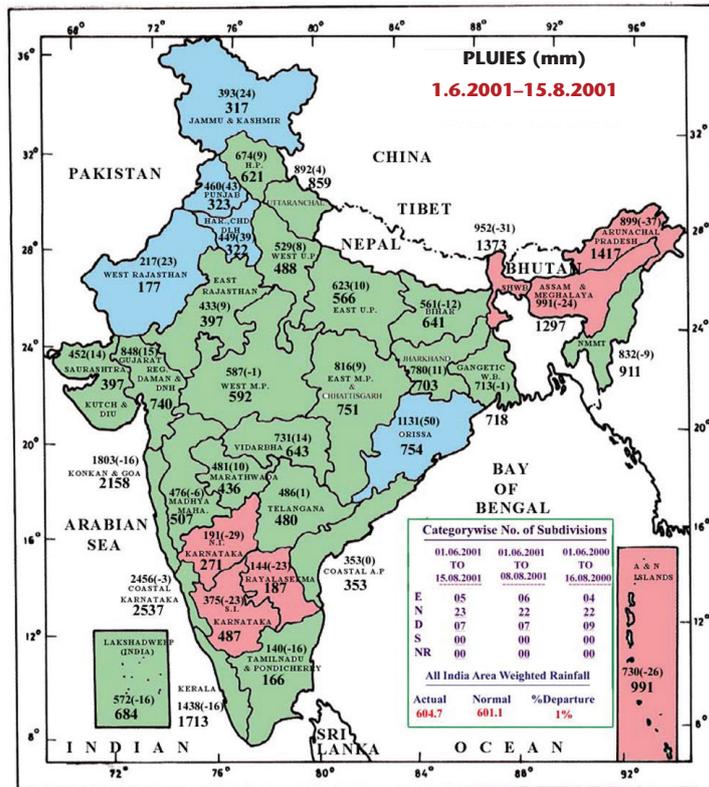


Figure 6.5. Représentation graphique de degrés-jours de croissance au cours d'une saison donnée à plusieurs stations



LÉGENDE: ■ EXCÈS (E) +20% ou plus ■ NORMALE (N) entre +19% et -19% ■ DÉFICIT (D) entre -20% et -59%
■ INSUFFISANCE (S) entre -60% et -99% ■ ABSENCE DE PLUIE (NR) -100% * AUCUNE DONNÉE

Remarques:

- a) Les hauteurs de pluie sont obtenues à partir de données opérationnelles.
- b) Les valeurs sont données en mm; en petits caractères, il s'agit de la hauteur mesurée pour la période et en caractères gras, de la normale. Les écarts en % figurent entre parenthèses.

Figure 6.6. Carte de valeurs régionales de la hauteur de pluie comprenant un tableau d'information sommaire

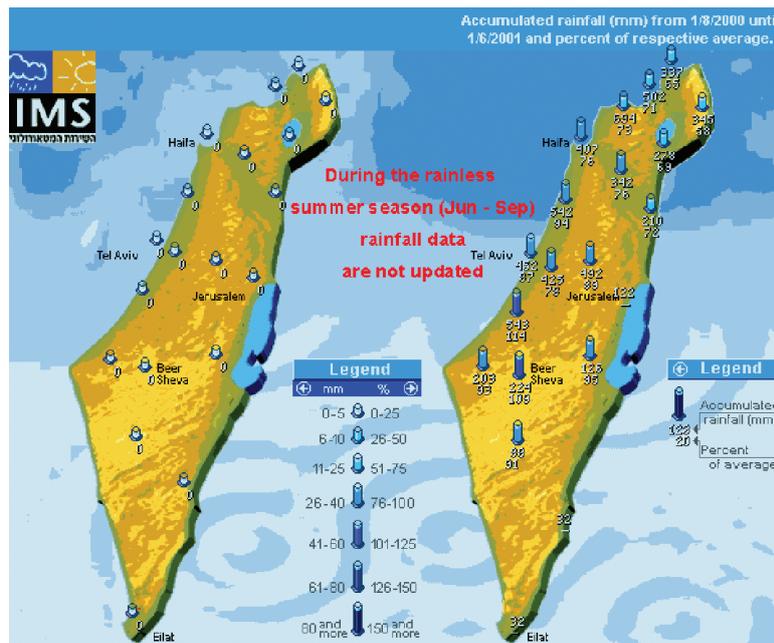


Figure 6.7. Représentation symbolique des hauteurs de pluie sur une carte

MELVERN LAKE, KANSAS (145210)													
Résumé climatologique mensuel													
Période des relevés: du 1 ^{er} mai 1973 au 30 avril 2000													
	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Annuel
Température maximale moyenne (°F)	37,3	43,4	55,3	65,3	74,1	82,9	89,1	87,9	79,6	68,5	53,6	42,1	64,9
Température minimale moyenne (°F)	16,5	21,3	32,0	42,5	53,0	62,4	67,5	65,0	55,4	44,4	32,5	22,0	42,9
Hauteur totale moyenne des précipitations (pouces)	0,95	1,20	2,58	3,33	5,06	5,24	4,28	3,69	3,81	3,00	2,62	1,41	37,17
Hauteur totale moyenne des chutes de neige (pouces)	2,5	1,8	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,4	5,5
Épaisseur de neige moyenne (pouces)	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Pourcentage par rapport aux observations possibles pour la période

Temp. max.: 95,9 % Temp. min.: 96,2 % Précipitations: 96 % Chute de neige: 89,3 % Épaisseur de neige: 91 %

Figure 6.8. Résumé climatologique mensuel sous forme de tableau

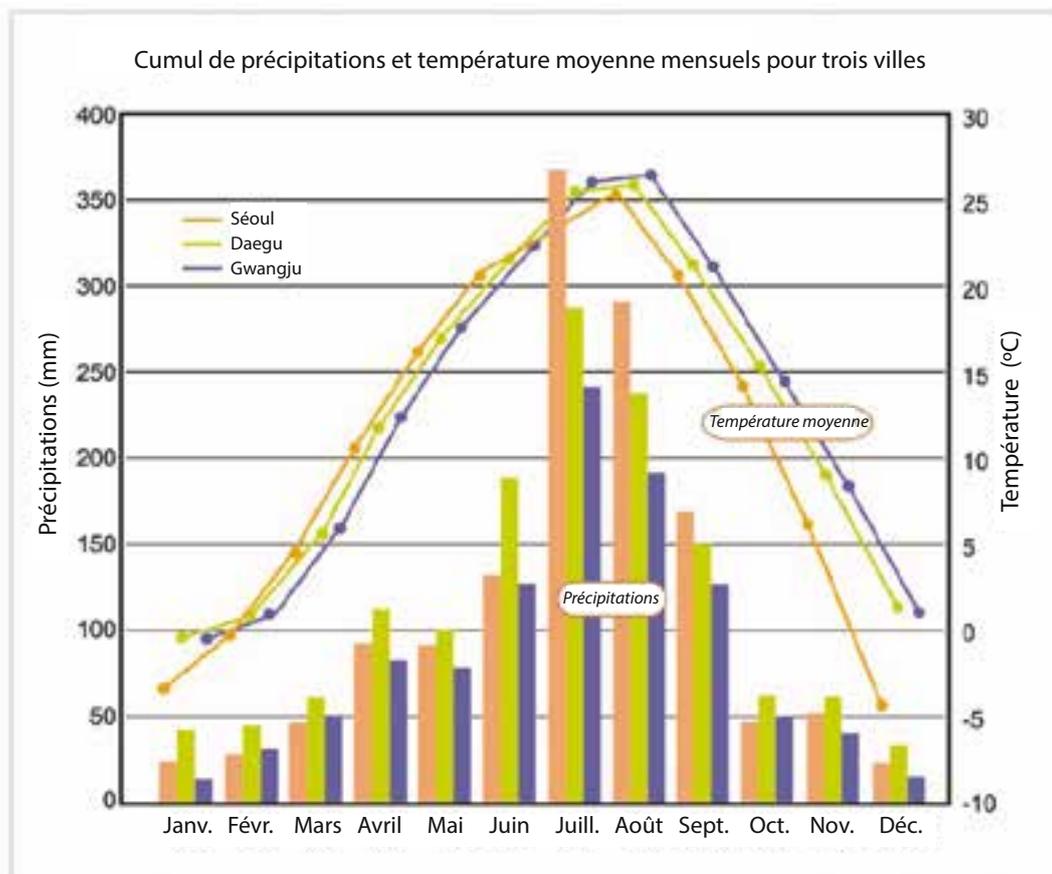


Figure 6.9. Représentation composée (courbes et barres) de plusieurs éléments pour plusieurs stations

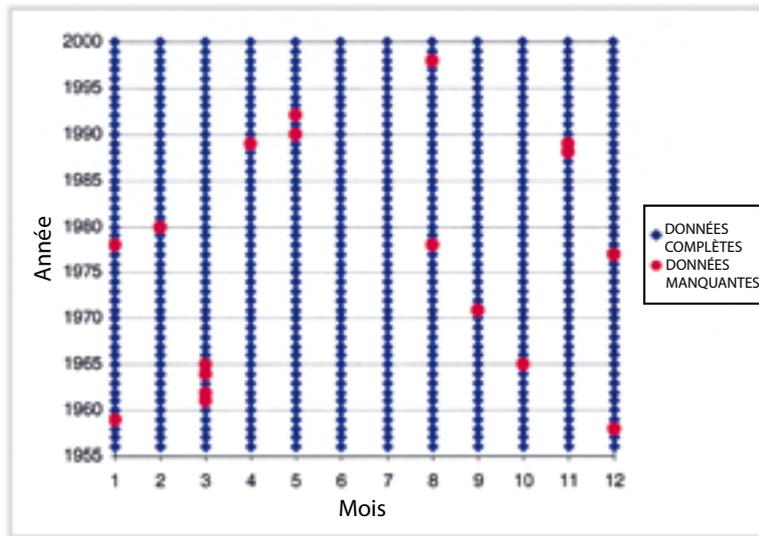


Figure 6.10. Représentation graphique des mois dont les relevés sont complets ou incomplets

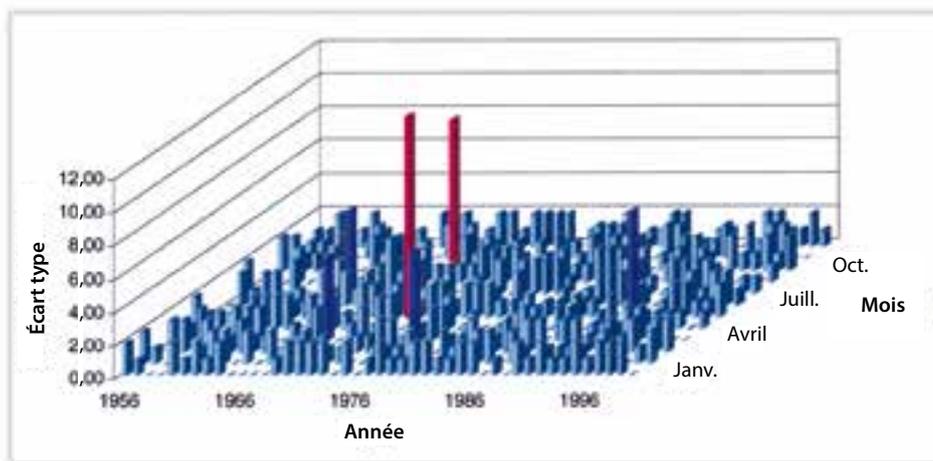


Figure 6.11. Graphique tridimensionnel mettant en exergue les valeurs anormales

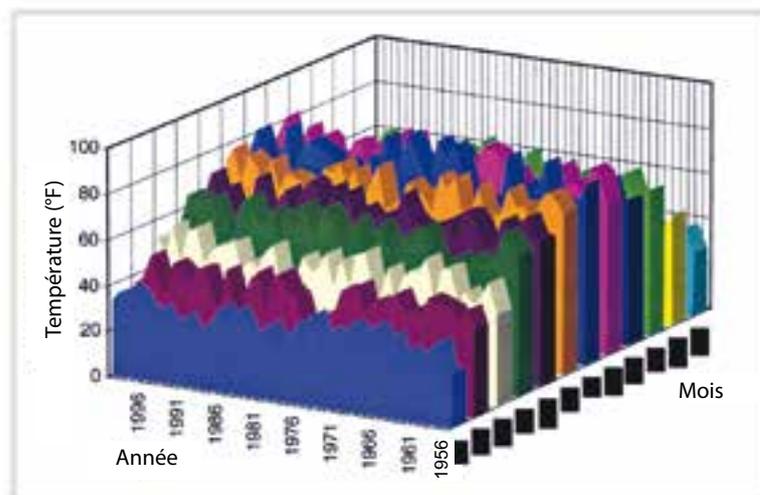


Figure 6.12. Représentation graphique en trois dimensions de séries chronologiques de valeurs mensuelles par année

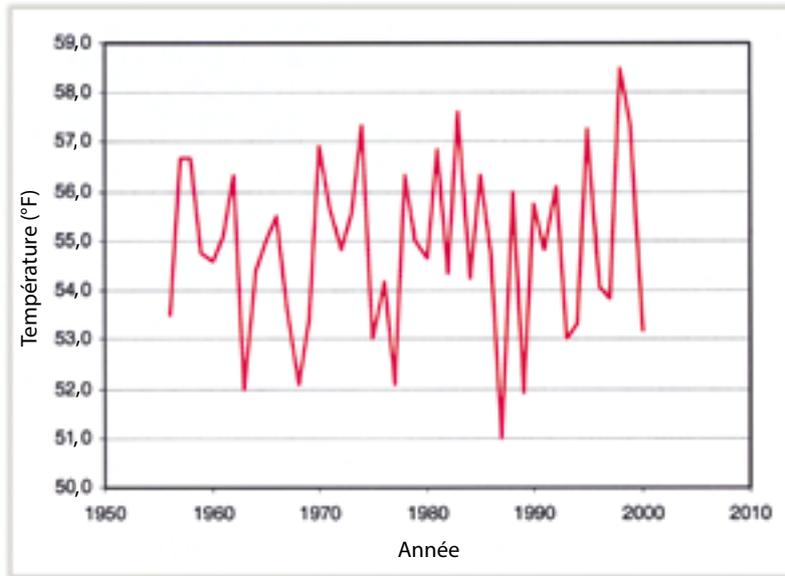


Figure 6.13. Courbe d'une série chronologique

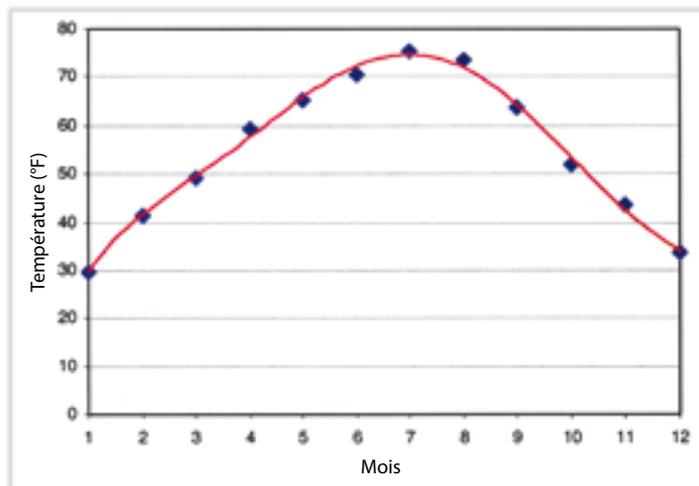


Figure 6.14. Courbe d'une série chronologique faisant apparaître les valeurs observées

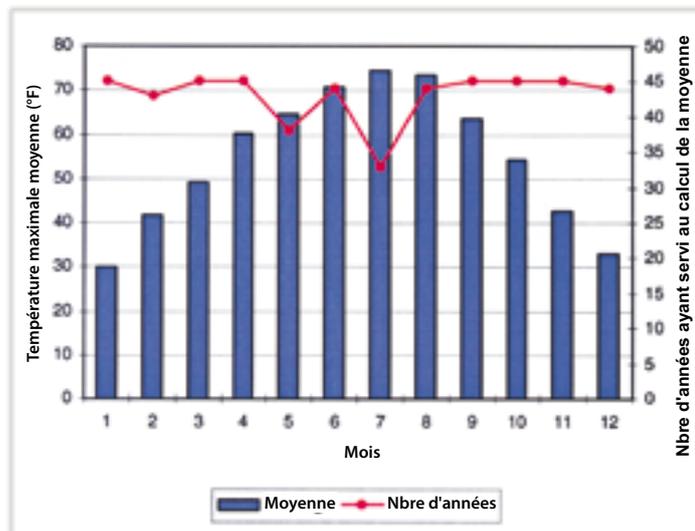


Figure 6.15. Représentation composée (courbe et barres) de la température moyenne et de la période des relevés

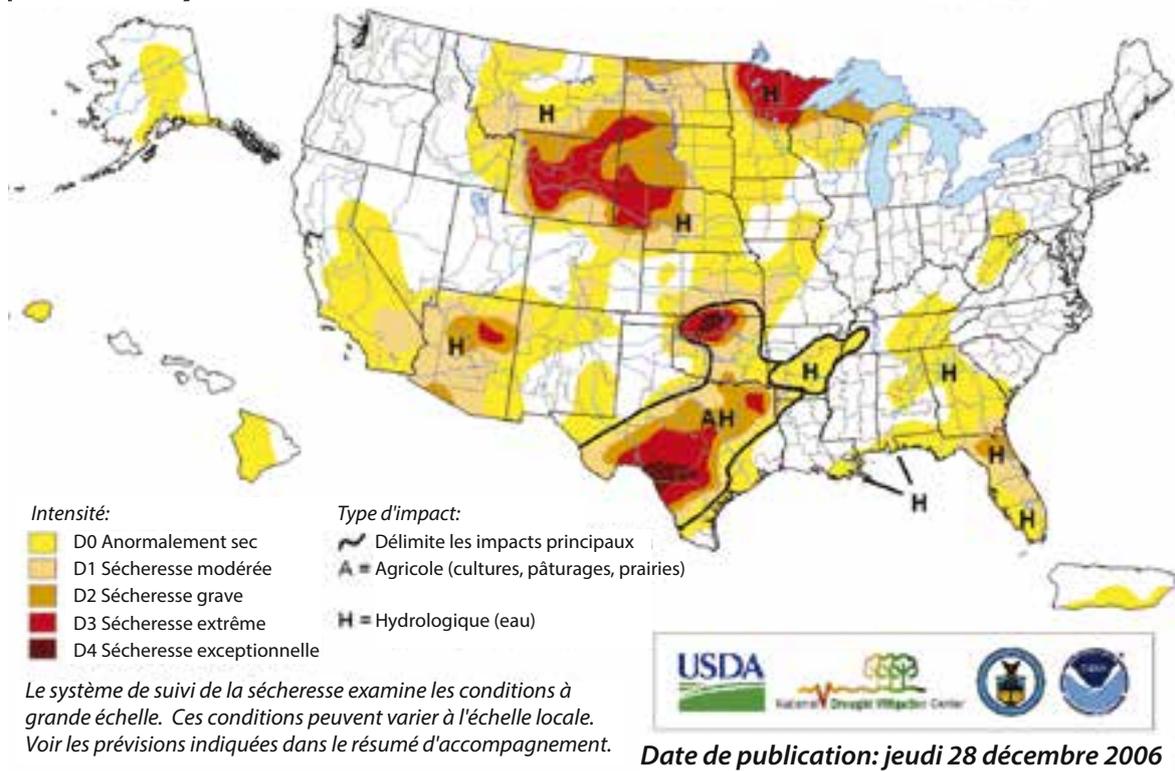


Figure 6.16. Isogramme des catégories de sécheresse avec leurs impacts

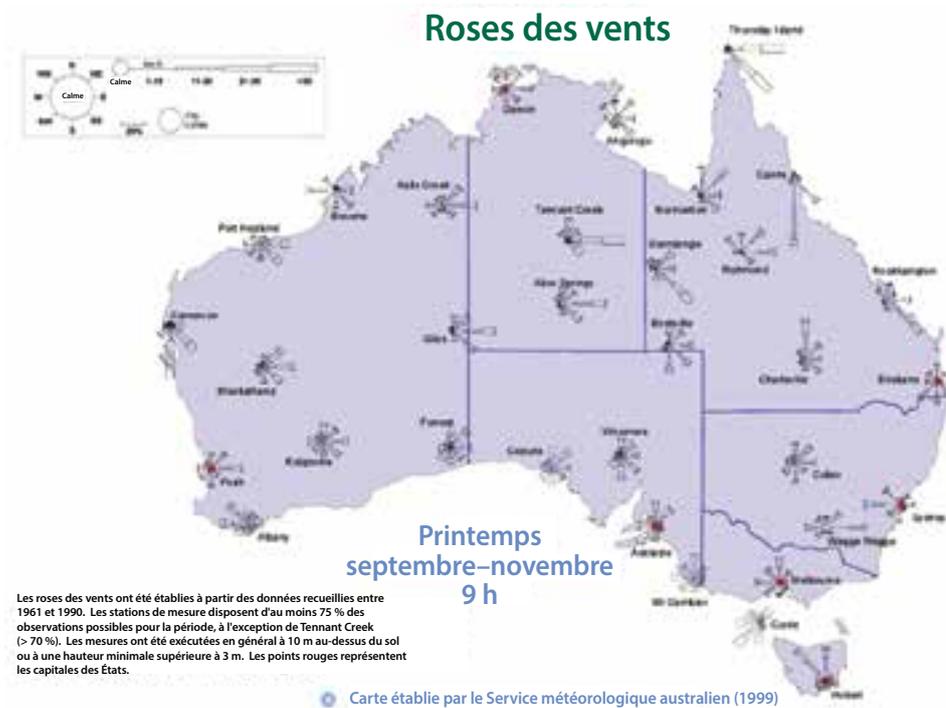


Figure 6.17. Représentation symbolique des vents sur une carte

6.10 BIBLIOGRAPHIE

6.10.1 Publications de l'OMM

- Organisation météorologique mondiale, 1988: *Règlement technique*, Vol. I – Pratiques météorologiques générales normalisées et recommandées; Vol. II – Assistance météorologique à la navigation aérienne internationale; Vol. III – Hydrologie; Vol. IV – Gestion de la qualité (OMM-N° 49), Genève.
- , 1990: *Guide des pratiques climatologiques*. Deuxième édition (OMM-N° 100), Genève.
- , 1991, *Manuel du Système mondial de traitement des données*, Vol. I – Aspects mondiaux. Supplément n° 10, octobre 2005 (OMM-N° 485), Genève.
- , 1992: *Manuel du Système mondial de traitement des données*, Vol. II – Aspects régionaux. Supplément n° 2, août 2003 (OMM-N° 485), Genève.
- , 1992: *Operational Climatology - Climate Applications: On Operational Climate Services and Marketing, Information and Publicity: Report to the Eleventh Session of the Commission for Climatology* (La Havane, février 1993) (CCI Rapporteurs on Operational Climatology, J.M. Nicholls, and Marketing, Information and Publicity, D.W. Phillips). Programme mondial des applications et des services climatologiques (WMO/TD-No. 525, WCASP-No. 20), Genève.
- , 1995: *Hydrological Forecasts for Hydroelectric Power Production* (WMO/TD-No. 118), Genève.
- , 1995: *Meeting of Experts on Climate Information and Prediction Services (CLIPS): Report of the Meeting* (Melbourne, 28–31 mars 1995) (WMO/TD-No. 680, WCASP-No. 32), Genève.
- , 1996: *Economic and Social Benefits of Climatological Information and Services: A Review of Existing Assessments* (J.M. Nicholls) (WMO/TD- No. 780, WCASP-No. 38), Genève.
- , 1996: *Report of the Second Session of the CCI Working Group on Operational Use of Climatological Knowledge* (Genève, 28–31 mai 1996) and *Report of the Meeting of Experts on CLIPS* (Genève, 22–24 mai 1996) (WMO/TD-No. 774, WCASP-No. 37), Genève.
- , 1999: *Report of the Planning Meeting for the Shanghai CLIPS Showcase Project: Heat/Health Warning System* (Shanghai, 6–8 octobre 1999) (WMO/TD-No. 984, WCASP-No. 49), Genève.
- , 2007: *Déclaration de l'OMM sur l'état du climat mondial en 2006* (OMM-N° 1016), Genève.
- , 2008: *Inter-Commission Task Team on the Quality Management Framework, Third Session, Final Report* (Genève, 28–30 octobre 2008), Genève.
- , 2008: *Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs 1998–2001* (WMO/TD-No. 1071, WCDMP-No. 47), Genève.

6.10.2 Autres lectures

- American Meteorological Society, 1993: Guidelines for using color to depict meteorological information. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 74:1709–1713.
- Brohan, P., J.J. Kennedy, I. Harris, S.F.B. Tett et P.D. Jones, 2006: Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new dataset from 1850. *J. Geophys. Res.*, 111: D12106.
- Hargreaves, G.H., 1975: Moisture availability and crop production. *Trans. ASAE*, 18:980–984.
- Jones, P.D., M. New, D.E. Parker, S. Martin et I.G. Rigor, 1999: Surface air temperature and its variations over the last 150 years. *Rev. Geophys.*, 37:173–199.
- Khambete, N.N., 1992: Agroclimatic classification for assessment of the crop potential of Karnataka. *Mausam*, 43(1):91–98.
- MacCracken, M., 2002: Do the uncertainty ranges in the IPCC and U.S. National Assessments account adequately for possibly overlooked climatic influences? *Climatic Change*, 52:13–23.
- Palmer, W.C., 1965: *Meteorological Drought*. Weather Bureau Research Paper No. 45. Washington, DC, United States Department of Commerce.
- Peterson, T.C., 2005: Les indices de changements climatiques. *Bulletin de l'OMM*, 54:83–86.
- Peterson, T.C. et M.J. Manton, 2008: Monitoring changes in climate extremes: A tale of international cooperation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 89:1266–1271.

- Rayner, N.A., P. Brohan, D.E. Parker, C.K. Folland, J.J. Kennedy, M. Vanicek, T. Ansell et S.F.B. Tett, 2006: Improved analyses of changes and uncertainties in marine temperature measured in situ since the mid-nineteenth century: The HadSST2 dataset. *J. Climate*, 19:446–469.
- Sarker, R.P. et B.C. Biswas, 1988: A new approach to agroclimatic classification to find out crop potential. *Mausam*, 39(4):343–358.
- Tufte, E.R., 1990: *Envisioning Information*. Cheshire, Connecticut, Graphic Press.
- United States Global Change Research Program Office (USGCRP), 2000: *Climate Change Impacts on the United States: The Potential Consequences of Climate Variability and Change*. Washington, DC, USGCRP.
- Wang, B. et Z. Fan, 1999: Choice of South Asian summer monsoon indices. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80:629–638.
- Wilhelm, W.W., K. Ruwe et M.R. Schlemmer, 2000: Comparisons of three Leaf Area Index meters in a corn canopy. *Crop Science*, 40:1179–1183.
-

ANNEXE 1. SIGLES ET ABRÉVIATIONS

CCI	Commission de climatologie
CCR	Centre climatologique régional
CIUS	Conseil international pour la science
CLICOM	Application de l'informatique à la climatologie
CLIPS	Services d'information et de prévision climatologiques
CMD	Centre mondial de données
CMP	Centre mondial de production
ENSO	Phénomène El Niño/Oscillation australe
GEOSS	Système mondial des systèmes d'observation de la Terre
GEWEX	Expérience mondiale sur les cycles de l'énergie et de l'eau
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GOOS	Système mondial d'observation de l'océan
GSN	Réseau de stations d'observation en surface pour le SMOC
GUAN	Réseau de stations d'observation en altitude pour le SMOC
ISO	Organisation internationale de normalisation
MCG	Modèle de la circulation générale
MCR	Modèle climatique régional
OMM	Organisation météorologique mondiale
PMASC	Programme mondial des applications et des services climatologiques
PMDSC	Programme mondial des données climatologiques et de surveillance du climat
SGDC	Système de gestion des données climatologiques
SIG	Système d'information géographique
SIO	Système d'information de l'OMM
SMA	Station météorologique automatique
SMHN	Service météorologique et hydrologique national
SMOC	Système mondial d'observation du climat
VAG	Veille de l'atmosphère globale

ANNEXE 2. ACTIVITÉS INTERNATIONALES RELATIVES AU CLIMAT

A2.1 COORDINATION DES ACTIVITÉS RELATIVES AU CLIMAT

La Commission de climatologie est chargée de promouvoir et de faciliter les activités ayant trait au climat et à ses liens avec le bien-être de l'homme, les activités socio-économiques, les écosystèmes naturels et le développement durable. Voici qu'elles sont précisément ses missions:

- a) Récapituler et regrouper les exigences et normes générales en matière de données – observation, collecte, archivage et échange – pour tous les éléments du Programme climatologique mondial;
- b) Déterminer les méthodes les plus efficaces pour la gestion des données climatologiques, notamment les données en temps quasi réel, les données indirectes, les données de la télédétection et les métadonnées (renseignements sur les données);
- c) Favoriser la diffusion de données, de produits et de méthodes à l'appui de la recherche, des applications, des études d'impact et de la surveillance du système climatique;
- d) Apporter son soutien à l'élaboration de déclarations faisant autorité sur le climat, notamment les déclarations annuelles de l'OMM sur l'état du climat mondial et le périodique Info-Niño/Niña;
- e) Évaluer et faire le point sur les avancements et les applications en matière de prévision climatologique dans le domaine de l'exploitation;
- f) Recenser les priorités se rapportant à l'étude climatologique des écosystèmes naturels et aménagés et à la fourniture de l'information climatologique destinée à atténuer les problèmes que soulève l'influence des activités humaines sur le climat local et régional;
- g) Apporter son concours au renforcement des capacités et au transfert de technologie;
- h) Favoriser les activités de recherche et d'évaluation relativement au rôle que tient le climat dans les principaux secteurs sociaux et économiques, en collaboration avec d'autres commissions techniques de l'OMM, d'autres organismes des Nations Unies et les institutions internationales et régionales compétentes;
- i) Évaluer les possibilités d'applications des prévisions saisonnières et d'autres services climatologiques au profit de l'activité économique et sociale, notamment en ce qui concerne la réduction des incidences des phénomènes dangereux liés au climat et l'utilisation optimale du climat en tant que ressource;
- j) Donner des avis sur les questions ayant trait à l'accès aux données et aux services climatologiques et à leur disponibilité.

La Commission agit en faveur de toute une série d'organismes nationaux, régionaux et mondiaux qui prennent part aux activités relatives au climat, auxquels elle a recours. Outre les SMHN, ces organismes comprennent des institutions des Nations Unies, notamment l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, l'Organisation mondiale de la santé, l'Organisation mondiale du tourisme, le Programme des Nations Unies pour les établissements humains, le Programme des Nations Unies pour l'environnement, le Programme des Nations Unies pour le développement et l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture. La Commission œuvre aussi en étroite collaboration avec des organisations non gouvernementales, notamment la Fédération internationale des sociétés de la Croix-Rouge et du Croissant Rouge, le Conseil international pour la science, des instituts de recherche, des universités, des associations professionnelles, le monde universitaire et des organismes d'aide au développement, telle la Banque mondiale.

A2.2 LE PROGRAMME CLIMATOLOGIQUE MONDIAL

Dans les années 1970, il est apparu indispensable de renforcer les efforts déployés à l'échelle internationale et de mieux les coordonner pour combler les lacunes de la compréhension du climat et trouver comment tirer parti des influences multiples du climat sur la société et l'environnement ou comment les atténuer, selon qu'elles soient bénéfiques ou néfastes. En 1974,

le Conseil exécutif de l'Organisation météorologique mondiale, convaincu du bien-fondé d'un programme international d'étude du climat, est convenu de jeter les bases du Programme climatologique mondial. En 1978, le Conseil économique et social des Nations Unies a demandé à l'OMM de porter une attention particulière aux éléments de ce Programme qui pourraient aider rapidement et efficacement les responsables de la planification et les décideurs à formuler des programmes et des activités économiques et sociaux dans leurs pays respectifs.

Les participants à la première Conférence mondiale sur le climat, organisée en février 1979, sont convenus que l'influence possible des activités humaines sur le climat constituait un problème auquel il convenait d'accorder une importance particulière. Dans la déclaration découlant de cette Conférence, il est souligné l'urgence, pour les nations du monde entier, de tirer pleinement parti des connaissances actuelles sur le climat, de prendre des mesures afin de faire progresser ces connaissances de manière significative et de prévoir et prévenir les changements climatiques qui seraient dus à l'activité de l'homme et dont les effets seraient néfastes pour le bien-être de l'humanité.

C'est en 1979 que le Huitième Congrès météorologique mondial crée officiellement le Programme climatologique mondial, en déclarant que celui-ci aura besoin de la coopération de nombreuses institutions des Nations Unies et d'autres organisations internationales. La coordination générale du Programme et tout ce qui a trait aux données et aux applications climatologiques incombent à l'OMM, la responsabilité des études des incidences du climat est confiée au Programme des Nations Unies pour l'environnement, et l'OMM et le Conseil international pour la science acceptent de collaborer à la mise en place du programme de recherche sur le climat. Depuis lors, la structure du Programme climatologique mondial et les partenaires qui coopèrent avec l'OMM ont évolué.

Le Programme climatologique mondial comprend quatre grandes composantes. Le Programme mondial des données climatologiques et de surveillance du climat (PMDSC) veille à l'efficacité de la collecte et de la gestion des données climatologiques et assure la surveillance continue du système climatique mondial, y compris la détection de la variabilité et des changements du climat. Le Programme mondial des applications et des services climatologiques (PMASC) favorise la compréhension scientifique du rôle du climat dans les activités humaines, l'exploitation efficace du savoir et de l'information climatologiques au profit de la société, la fourniture de services adaptés aux utilisateurs des différents secteurs socio-économiques et l'établissement de prévisions au sujet des variations marquantes du climat, tant naturelles qu'imputables à l'homme. L'OMM a lancé le projet de Services d'information et de prévision climatologiques (CLIPS) en tant qu'organe de mise en œuvre du PMASC. Le Programme mondial d'évaluation des incidences du climat et de formulation de stratégies de parade (PMICSP), exécuté par le Programme des Nations Unies pour l'environnement, évalue les incidences que la variabilité et les changements du climat pourraient avoir sur les activités économiques ou sociales, et en informe les gouvernements; il aide aussi à formuler les stratégies de parade socio-économiques auxquelles ces derniers et la collectivité pourraient recourir. Le Programme mondial de recherche sur le climat (PMRC), parrainé conjointement par l'OMM, le Conseil international pour la science et la Commission océanographique intergouvernementale de l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture, cherche à améliorer les connaissances scientifiques fondamentales sur les processus climatiques, afin de déterminer la mesure dans laquelle le climat (y compris sa variabilité et ses changements) est prévisible, de déterminer l'ampleur des effets que les activités humaines ont sur le climat et de parvenir à prévoir le climat. Parmi les activités et les projets que le PMRC regroupe, on compte notamment des études sur la dynamique et la thermodynamique de l'atmosphère du globe, sur les interactions de l'atmosphère avec la surface terrestre, ou sur le cycle mondial de l'eau; sur la variabilité et prévisibilité du climat; sur les relations entre les processus dynamiques, radiatifs et chimiques; sur les processus qui caractérisent les interactions de la cryosphère avec le reste du système climatique; ou encore sur les interactions biogéochimiques et physiques entre l'océan et l'atmosphère.

En 1990, à l'occasion de la deuxième Conférence mondiale sur le climat, on a estimé qu'il devenait urgent d'acquérir une information détaillée sur les propriétés du système climatique de la Terre et sur son évolution, à l'appui de la détection des changements climatiques, des applications

de la climatologie au développement économique et de la progression de la climatologie et de la prévision du climat. En 1991, le Onzième Congrès météorologique mondial décide de mettre en place un système mondial d'observation du climat fondé sur la coordination et l'association des programmes d'observation de l'environnement global, opérationnels ou de recherche, existants ou prévus, et sur le renforcement de ces programmes de façon à assurer un flux continu d'information pendant plusieurs décennies.

Le Système mondial d'observation du climat (SMOC) a été créé officiellement en 1992, en vertu d'un mémorandum d'accord entre l'OMM, la Commission océanographique intergouvernementale de l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture, le Programme des Nations Unies pour l'environnement et le Conseil international pour la science. Le SMOC n'est pas directement chargé d'effectuer des observations ou d'établir des produits à partir des données recueillies. Il œuvre en étroite collaboration avec les systèmes d'observation des organisations et des pays participants, qu'il s'agisse de systèmes existants ou en cours d'élaboration, sur lesquels il se fonde et auxquels il procure un cadre opérationnel d'intégration. Les systèmes et réseaux en question sont les suivants:

- a) Le Réseau de stations d'observation en surface (GSN) et le Réseau de stations d'observation en altitude (GUAN) pour le SMOC (qui font partie du Système mondial d'observation relevant de la Veille météorologique mondiale de l'OMM);
- b) La Veille de l'atmosphère globale (VAG) de l'OMM;
- c) Le Réseau de référence pour la mesure du rayonnement en surface (PMRC/GEWEX);
- d) Le Système mondial d'observation de l'océan (GOOS), comprenant plusieurs systèmes d'observation de l'océan tel le Système mondial d'observation du niveau de la mer;
- e) Le Système mondial d'observation terrestre, comprenant le Réseau terrestre mondial pour les glaciers et le Réseau terrestre mondial pour le pergélisol;
- f) Le Système mondial d'observation du cycle hydrologique.

Le concept d'observations terrestres coordonnées et complètes fut mis en avant lors du premier Sommet sur l'observation de la Terre en 2003. C'est à l'occasion du troisième Sommet sur l'observation de la Terre, organisé en 2005, que fut constitué officiellement le Système mondial des systèmes d'observation de la Terre (GEOSS) pour enrichir les systèmes d'observation nationaux, régionaux et internationaux existants sur lesquels il repose, notamment en coordonnant les efforts, en remédiant aux principales insuffisances, en œuvrant dans le sens de la compatibilité et du partage de l'information, en recherchant une compréhension commune des besoins des utilisateurs et en améliorant la diffusion de l'information aux utilisateurs. Le GEOSS contribue au SMOC en élargissant l'éventail des variables relatives au climat figurant dans le plan de mise en œuvre du SMOC et en aidant les Parties à s'acquitter de leurs engagements au titre de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (voir la section A2.4).

A2.3 LE PROGRAMME D'ACTION POUR LE CLIMAT

Au début des années 1990, une collaboration de plus en plus étroite entre les programmes relatifs au climat relevant de plusieurs organisations internationales conduisit à la création par l'OMM du Comité de coordination pour le Programme climatologique mondial. En 1995, un projet de document interinstitutions est publié; il s'intitule: «Programme d'action pour le climat – Programmes internationaux relatifs au climat. Proposition de cadre général». Ce Programme d'action comprend quatre axes principaux: les nouveaux pas à franchir dans le domaine de la climatologie et de la prévision du climat; les services climatologiques dans la perspective d'un développement durable; l'évaluation de l'impact des changements climatiques et la formulation de stratégies de parade pour réduire la vulnérabilité; les observations spécifiques du système climatique. À la tête de ces axes se trouvent l'OMM, l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture et le Programme des Nations Unies pour l'environnement.

En 1995, ayant approuvé le Programme d'action pour le climat, le Douzième Congrès météorologique mondial crée le Comité interinstitutions du Programme d'action pour le climat.

Ce comité donne quelques premières orientations mais, compte tenu de l'évolution rapide des questions ayant trait au climat, l'OMM, à la session de 2001 de son Conseil exécutif, entame un processus visant à envisager de nouveaux mécanismes de coordination en matière de climat. Lors de sa soixante et unième session (2009), le Conseil exécutif de l'OMM décide de ne pas accorder de nouvel élan au Comité interinstitutions du Programme d'action pour le climat, mais d'avoir recours à l'initiative «Unis dans l'action» des Nations Unies pour coordonner les questions relatives au climat à l'échelle des Nations Unies.

A2.4 **PROGRAMMES INTERNATIONAUX RELATIFS AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES**

Lors de la première Conférence mondiale sur le climat, organisée en 1979, la communauté climatologique internationale soulignait avec inquiétude que les activités humaines qui ne cessaient de progresser pourraient causer des changements climatiques importants à l'échelle régionale et même mondiale, et lançait un appel en faveur d'une coopération mondiale visant à chercher à prévoir le comportement futur du climat mondial pour en tenir compte dans le cadre du développement futur de la société. Au cours de la Conférence sur le climat qui s'est tenue à Villach, en Autriche, en 1985, les chercheurs de 29 pays développés et en développement ont confirmé que l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre conduirait probablement à un net réchauffement du climat de la planète au XXI^e siècle, ce qui est décrit en détail dans la publication intitulée *Report of the International Conference on the Assessment of the Role of Carbon Dioxide and of Other Greenhouse Gases in Climate Variations and Associated Impacts* (WMO-No. 661). Ils ont signalé aussi qu'il se pourrait que les conditions climatologiques passées ne puissent plus constituer à l'avenir une référence valable utile aux projets à long terme en raison du réchauffement du climat mondial attendu, qu'il existe un lien étroit entre les changements climatiques et l'élévation du niveau de la mer, d'une part, et d'autres problèmes environnementaux de grande ampleur, d'autre part, qu'une partie du réchauffement se produira inévitablement compte tenu de l'effet des activités passées, et que les politiques en matière d'émissions de gaz à effet de serre pourraient avoir des conséquences considérables pour le degré et la rapidité du réchauffement futur. En réaction aux inquiétudes exprimées, le Programme des Nations Unies pour l'environnement, l'OMM et le Conseil international pour la science ont établi en 1986 un Groupe consultatif pour les gaz à effet de serre chargé de veiller à ce que soient entreprises périodiquement des évaluations de l'état des connaissances scientifiques en matière de changements climatiques et de leurs incidences.

En 1987, le Dixième Congrès météorologique mondial a estimé qu'il serait nécessaire d'entreprendre une évaluation scientifique, objective, impartiale et coordonnée à l'échelle internationale des connaissances sur les effets de l'augmentation des concentrations des gaz à effet de serre sur le climat de la planète et de la manière dont ces changements pourraient influencer sur les évolutions socio-économiques. Le Programme des Nations Unies pour l'environnement et l'OMM décident donc qu'il convient de mettre en place un mécanisme intergouvernemental chargé d'établir des évaluations scientifiques des changements climatiques. Ainsi, en 1988, le Conseil exécutif de l'OMM, avec l'appui du Programme des Nations Unies pour l'environnement, établit le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) pour tenir compte de la nécessité de:

- a) Déterminer les incertitudes et les lacunes encore inhérentes à nos connaissances des changements climatiques et leurs effets potentiels et élaborer un plan d'action à court terme pour combler ces lacunes;
- b) Déterminer les informations nécessaires pour évaluer les conséquences sur le plan stratégique d'un changement climatique et les mesures à prendre pour y parer;
- c) Revoir les politiques nationales et internationales déjà appliquées ou envisagées relatives à la question des gaz à effet de serre;
- d) Procéder à des évaluations de tous les aspects de la question des gaz à effet de serre au point de vue scientifique et environnemental et assurer le transfert aux pouvoirs publics et aux organisations intergouvernementales de ces évaluations et des autres informations

pertinentes dont ils doivent tenir compte dans l'élaboration de leurs programmes intéressant le développement socio-économique et l'environnement.

En novembre 1988, le GIEC crée les groupes de travail qui prépareront les rapports d'évaluation sur les aspects scientifiques de l'évolution du climat (Groupe de travail I), sur les incidences environnementales, sociales et économiques de l'évolution du climat (Groupe de travail II) et sur la formulation de stratégies de parade (Groupe de travail III). À sa quarante-troisième session, l'Assemblée générale des Nations Unies approuve la décision prise par l'OMM et par le Programme des Nations Unies pour l'environnement de créer conjointement le GIEC et demande une étude d'ensemble et des recommandations sur notamment «l'état des connaissances en climatologie et en matière d'évolution du climat; les programmes et études concernant les effets sociaux et économiques de l'évolution du climat, y compris le réchauffement de la planète; et les stratégies envisagées pour retarder, limiter ou atténuer les effets d'une évolution nuisible du climat».

Le GIEC adoptera son premier rapport d'évaluation le 30 août 1990. Les résultats publiés, que viendront compléter ceux de la Deuxième Conférence mondiale sur le climat la même année, inciteront les gouvernements à adopter en mars 1994 la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Le deuxième Rapport d'évaluation du GIEC est paru à la fin de 1995, le troisième, en 2001 et le quatrième, en 2007. Les rapports que le GIEC publie servent souvent à étayer les décisions prises en vertu de la Convention-cadre. Ils ont aussi contribué de façon prépondérante aux négociations qui ont conduit à l'adoption du Protocole de Kyoto, un traité international datant de février 2005 qui s'inscrit dans le prolongement de la Convention-cadre et qui fixe des objectifs juridiquement contraignants et des échéances en ce qui concerne la réduction des émissions de gaz à effet de serre des pays industrialisés. Le fait que le GIEC soit devenu en 2007 colauréat du prix Nobel de la paix avec Monsieur Al Gore, ancien Vice-Président des États-Unis d'Amérique, témoigne du succès remarquable que connaît le processus du GIEC pour informer les décideurs ainsi que le grand public des bases scientifiques de l'évolution du climat.

A2.5 BIBLIOGRAPHIE

- Conseil des chefs de secrétariat des organismes des Nations Unies pour la coordination, 2008: *Acting on Climate Change: The UN System Delivering as One*, New York.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), 2007: *Quatrième rapport d'évaluation: Changements climatiques 2007*, Volumes 1 à 4. Cambridge, Cambridge University Press.
- Groupe sur l'observation de la Terre (GEO), 2005: *Global Earth Observation System of Systems (GEOSS): 10-year Implementation Plan*. Reference Document GEO 1000R/ESA SP-1284. Noordwijk, Division des publications de l'Agence spatiale européenne, ESTEC.
- , 2007: *GEO 2007–2009 Work Plan. Toward Convergence*, Genève.
- Organisation météorologique mondiale, 1986: *Report of the International Conference on the Assessment of the Role of Carbon Dioxide and of Other Greenhouse Gases in Climate Variations and Associated Impacts*, (Villach, Autriche, 9–15 octobre 1985) (WMO-No. 661), Genève.

