

CENTRES RÉGIONAUX DE FORMATION AUX SCIENCES ET TECHNIQUES
SPATIALES
(AFFILIÉS À L'ORGANISATION DES NATIONS UNIES)

Météorologie par satellite et climat mondial

Programme d'études



Nations Unies

CENTRES RÉGIONAUX DE FORMATION AUX SCIENCES ET TECHNIQUES
SPATIALES
(AFFILIÉS À L'ORGANISATION DES NATIONS UNIES)

Météorologie par satellite et climat mondial

Programme d'études

Bureau des affaires spatiales
Office des Nations Unies à Vienne



Nations Unies

Préface

L'homme a sans doute toujours été fasciné par le temps, ne serait-ce que pour des raisons pratiques. Si les phénomènes météorologiques étaient un objet majeur de spéculation dans les ouvrages philosophiques de l'antiquité, on fait généralement remonter les débuts de l'étude scientifique du temps à l'invention du thermomètre et du baromètre, au XVII^e siècle. Il y a eu des tentatives sporadiques d'établir des cartes du temps à partir d'observations de surface au XVIII^e siècle. L'invention du télégraphe au XIX^e siècle a donné la possibilité de produire et de diffuser en temps réel des prévisions fondées sur des données couvrant une aire géographique importante. Des réseaux d'observation financés par l'État sont apparus dans plusieurs pays au milieu et à la fin du XIX^e siècle. Les connaissances fondamentales en dynamique et en thermodynamique des fluides ont également beaucoup progressé au cours de ce siècle, ce qui a permis d'asseoir l'étude de l'atmosphère sur une base solide en tant que problème de physique appliquée. Au cours des dernières décennies, les études de l'atmosphère, tant observationnelles que théoriques, ont fait des progrès spectaculaires. Ces progrès ont été grandement facilités par la possibilité de placer des systèmes d'observation de l'atmosphère sur des plates-formes satellitaires et par la mise au point d'ordinateurs numériques capables de traiter les équations non linéaires applicables.

Historiquement, l'étude de l'atmosphère a été divisée en deux disciplines, la climatologie, que l'on peut définir comme l'étude des processus qui déterminent l'état moyen de l'atmosphère sur une période relativement longue (une année, voire plusieurs), et la météorologie, qui traite de la physique des phénomènes liés à la variabilité atmosphérique qui se produisent plus fréquemment. Il apparaît de plus en plus nettement que cette distinction est assez arbitraire sans être particulièrement utile. La circulation atmosphérique est variable quelle que soit l'échelle de temps, et il existe des interactions importantes entre les divers phénomènes.

Nombre de travaux récents sur la surveillance et la modélisation des phénomènes atmosphériques ont été motivés par la prise de conscience que l'homme peut modifier considérablement (fût-ce involontairement) le climat mondial. L'augmentation de la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre tels que le CO², émis par les activités industrielles et agricoles, a particulièrement suscité des inquiétudes. Il serait extrêmement utile de disposer de prévisions fiables sur la sensibilité du climat à ces influences anthropiques pour formuler des stratégies permettant d'atténuer les répercussions socioéconomiques des changements de l'environnement mondial.

Table des matières

	<i>Page</i>
Préface.....	iii
Notes explicatives.....	vi
Introduction.....	1
Création des centres régionaux de formation aux sciences et techniques spatiales.....	2
Réunion d'experts des Nations Unies sur les centres régionaux de formation aux sciences et techniques spatiales: leur statut et leur évolution future.....	3
Programme d'études sur la météorologie par satellite et le climat mondial.....	3
Objectif des cours sur la météorologie par satellite et le climat mondial.....	4
Examen du programme d'enseignement existant et de l'expérience acquise.....	5
Programme d'études révisé pour le cours sur la météorologie par satellitaires et le climat mondial.....	8
 Annexes	
I. Programme des trois premiers cours.....	14
Modules.....	14
Travaux pratiques.....	18
Projets pilotes.....	20
II. Matériel didactique recommandé.....	23

Notes explicatives

APT	transmission automatique d'images
ATSR	radiomètre à balayage le long de la trace
AVHRR	radiomètre avancé à très haute résolution
DMSP	Defense Meteorological Satellite Program – Programme de satellites météorologiques de défense (États-Unis)
ERS	Satellite européen de télédétection (ERS)
GMS	satellite météorologique géostationnaire
GOES	Satellite géostationnaire opérationnel d'étude de l'environnement
HRPT	transmission d'images à haute résolution
INSAT	Système à satellites nationaux indien
IRS	Satellite indien de télédétection
LOWTRAN	progiciel de calcul de transmittance à faible résolution
MSMR	radiomètre à hyperfréquences multicanal à balayage
NCAR	National Centre for Atmospheric Research – Centre national de recherche atmosphérique (États-Unis)
NCEP	National Centres for Environmental Prediction – Centres nationaux de prévision environnementale (États-Unis)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (États-Unis)
NWP	Prévision numérique du temps
OLR	Rayonnement ondes longues sortant
SIG	système d'information géographique
SSM/I	imageur spécial à hyperfréquences
TIROS	Satellite d'observation télévision infrarouge
TOVS	Sondeur vertical opérationnel des satellites défilants des États-Unis
TRMM	Mission de mesure des précipitations tropicales
VHRR	radiomètre à très haute résolution
WEFAX	Système international de transmission d'images analogues

Introduction

Les sciences et techniques spatiales peuvent être enseignées aux niveaux élémentaires, secondaire et universitaire. Dans les pays ayant des activités spatiales, ces disciplines sont inscrites au programme de sciences à chacun de ces niveaux. Tel n'est pas le cas dans de nombreux pays en développement, en partie pour ce que les avantages des sciences et techniques spatiales n'y ont pas été appréciés à leur juste valeur et en partie parce que les installations et les ressources nécessaires font défaut. Dans les pays développés, l'étude des sciences et des techniques est devenue extrêmement interactive et la Toile mondiale ainsi que d'autres technologies de l'information sont des outils désormais utilisés dans les programmes d'enseignement à tous les niveaux.

L'incorporation d'éléments de sciences et de techniques spatiales dans les programmes scientifiques universitaires peut remplir un double objectif, tant dans les pays développés que dans les pays en développement. Elle peut aider tous les pays à tirer parti des avantages inhérents aux nouvelles technologies qui, dans de nombreux cas, sont des retombées des sciences et techniques spatiales et elle peut revitaliser le système éducatif, introduire de manière non ésotérique les concepts de haute technologie et aider à créer des capacités nationales dans le domaine des sciences et techniques en général. Comme l'a souligné Lewis Pyenson dans son récent ouvrage intitulé *Servants of Nature*¹:

“La décentralisation géographique et l'innovation interdisciplinaire sont devenus des maîtres mots dans les filières scientifiques universitaires. Le traitement électronique de l'information dispense, dans une certaine mesure, les scientifiques et les chercheurs d'être physiquement présents dans les grandes universités. Partout, les établissements universitaires se sont adaptés aux nouvelles conditions socioéconomiques en élargissant leurs programmes d'études. Ils ont toujours réagi de la sorte, même s'ils ne l'ont jamais fait assez rapidement aux yeux de ceux qui les critiquent. L'innovation mesurée et progressive est un des principaux handicaps de l'université, mais c'est aussi une grande force. Les nouveaux domaines de connaissance ne deviennent de nouvelles disciplines scientifiques qu'après avoir trouvé leur place dans les universités. Nous attendons de celles-ci qu'elles sanctionnent les dernières innovations. Les nouvelles idées scientifiques apparaissent dans des contextes divers, mais elles ne font partie du patrimoine commun de l'humanité qu'après avoir mûri au sein d'une institution d'enseignement supérieur telle que l'université moderne.”

L'enseignement des sciences au niveau universitaire se heurte à de nombreuses difficultés tant dans les pays en développement que dans les pays développés, mais les difficultés sont plus grandes dans les premiers. Le problème général est le fait que les étudiants ne peuvent ni observer ni expérimenter les phénomènes qui leur sont enseignés, ce qui les empêche souvent d'acquérir les principes de base et de voir le rapport entre deux ou plusieurs concepts ou leur utilité pour résoudre des problèmes concrets. À ces difficultés s'ajoute une maîtrise insuffisante de certains domaines mathématiques ainsi que des stratégies d'analyse des problèmes. La langue d'enseignement pose également problème dans les pays où elle n'est pas la langue nationale. Au fil des années, les pays développés ont surmonté la plupart des problèmes fondamentaux, sauf peut-être un problème psychologique, à savoir le fait que certains étudiants considèrent la science comme un sujet difficile. Dans les pays

en développement, en revanche, les problèmes fondamentaux demeurent, exacerbés par le manque de professeurs possédant une solide formation universitaire et professionnelle.

Création des centres régionaux de formation aux sciences et techniques spatiales

Dans sa résolution 45/72 du 11 décembre 1990, l'Assemblée générale des Nations Unies a fait sienne la recommandation formulée par le groupe de travail plénier du Sous-Comité scientifique et technique et approuvée par le Comité des utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique, selon laquelle l'ONU devait, avec le soutien actif de ses institutions spécialisées et des autres organisations internationales, animer un effort international de création de centres régionaux de formation aux sciences et techniques spatiales dans le cadre des établissements nationaux ou régionaux existants dans les pays en développement (A/AC.105/456, annexe II, par. 4 n)).

Dans sa résolution 50/27 du 6 décembre 1995, au paragraphe 30, l'Assemblée a approuvé la recommandation du Comité tendant à ce que ces centres soient mis en place dans les meilleurs délais sur la base de l'affiliation à l'ONU, affiliation qui leur donnerait la notoriété indispensable et leur permettrait d'attirer des donateurs et d'établir des relations scientifiques avec des institutions nationales et internationales dans le domaine de l'espace.

Des centres régionaux de ce type ont été établis en Inde pour l'Asie et le Pacifique, au Maroc et au Nigéria pour l'Afrique, au Brésil et au Mexique pour l'Amérique latine et les Caraïbes, et en Jordanie pour l'Asie occidentale, sous les auspices du Programme des Nations Unies pour les applications des techniques spatiales, qui relève du Bureau des affaires spatiales (A/AC.105/749). Ils ont pour objectif de renforcer les capacités des États Membres, aux niveaux régional et international, dans différentes disciplines des sciences et techniques spatiales pour faire avancer le développement scientifique, économique et social. Chacun de ces centres propose des programmes d'études de troisième cycle, de recherche et d'application destinés aux enseignants universitaires ainsi qu'aux chercheurs en recherche fondamentale et appliquée, l'accent étant mis sur la télédétection, les télécommunications par satellite, la météorologie par satellite et les sciences spatiales. Tous proposent des programmes de troisième cycle, d'une durée de neuf mois, portant sur la télédétection, les télécommunications par satellite, les applications de la météorologie par satellite et les sciences spatiales et sciences de l'atmosphère et qui se fondent sur les programmes d'études types établis à l'issue de la Réunion d'experts des Nations Unies/Espagne sur l'élaboration de programmes pour les centres régionaux de formation aux sciences et techniques spatiales, tenue à Grenade (Espagne) en 1995. Depuis 1995, ces programmes d'études sont présentés et discutés lors de réunions pédagogiques régionales et internationales (voir A/AC.105/649, ainsi que le site « <http://www.oosa.unvienna.org/SAP/centres/centres.htm> »).

La troisième Conférence des Nations Unies sur l'exploration et les utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique (UNISPACE III), qui s'est tenue en juillet 1999 à l'Office des Nations Unies à Vienne, a recommandé que les centres régionaux collaborent avec d'autres organismes nationaux, régionaux et internationaux afin de

consolider les différents volets de leurs programmes d'études². Dans sa résolution 54/68 du 6 décembre 1999, l'Assemblée générale a souscrit à la résolution d'UNISPACE III intitulée "Le millénaire de l'espace: la Déclaration de Vienne sur l'espace et le développement humain", dans laquelle il était recommandé de prendre des mesures pour instituer des mécanismes de financement régulier des centres régionaux³.

Réunion d'experts des Nations Unies sur les centres régionaux de formation aux sciences et techniques spatiales: leur statut et leur évolution future

Le Bureau des affaires spatiales a organisé, en coopération avec l'Agence spatiale européenne (ESA), la Réunion d'experts des Nations Unies sur les centres régionaux de formation aux sciences et techniques spatiales: leur statut et leur évolution future, qui s'est tenue du 3 au 7 septembre 2001 à l'Institut européen de recherche spatiale de l'ESA à Frascati (Italie).

La Réunion a examiné la situation des centres régionaux (création et fonctionnement) en vue de resserrer les liens de coopération entre eux. Le principal objectif de la Réunion était d'examiner et d'actualiser les programmes d'enseignement universitaire au plan mondial dans les quatre disciplines suivantes: télédétection, météorologie satellitaire, communications et sciences spatiales. La Réunion a constaté que l'enseignement variait considérablement entre pays, voire entre institutions d'un même pays, de sorte que les programmes étaient différents quant au fond et quant à leur agencement. Elle s'est donc félicitée que le programme d'études type (A/AC.105/649) ait contribué à régler ce problème.

La Réunion a institué cinq groupes de travail chargés de réactualiser les programmes d'études dans les domaines suivants: a) problèmes de gestion des centres; b) télédétection; c) météorologie satellitaire; d) télécommunications par satellite; et e) sciences spatiales. Ces groupes ont tiré parti des connaissances et compétences des participants, et pris en compte les résultats des cours de troisième cycle déjà dispensés, en particulier ceux organisés depuis 1996 au Centre de formation aux sciences et techniques spatiales pour l'Asie et le Pacifique et depuis 1998 au Centre régional africain des sciences et technologies de l'espace, en langue française et au Centre régional africain de formation aux sciences et techniques spatiales, en langue anglaise.

La Réunion, par l'intermédiaire de ses groupes de travail, a actualisé les quatre programmes d'études dont le contenu diffère de la plupart de ceux que l'on trouve dans divers ouvrages et sur Internet. Ils se fondent sur la physique, les mathématiques et l'ingénierie tels qu'on les enseigne dans de nombreuses universités à travers le monde et ne sont pas conçus pour répondre aux besoins spécifiques d'un projet ou d'une mission précis exécuté ou prévu par une institution particulière.

Programme d'études sur la météorologie par satellite et le climat mondial

Le présent chapitre rend compte des délibérations du groupe de travail sur la météorologie par satellite et le climat mondial créé par la réunion d'experts des Nations Unies sur les centres régionaux de formation aux sciences et techniques spatiales: situation actuelle et évolution future. Le groupe de travail a débattu de l'objectif des cours dans ce domaine, examiné le programme existant et l'expérience acquise grâce aux cours déjà dispensés dans les centres régionaux (annexe I) et défini les objectifs, les besoins, la structure et le programme révisé des nouveaux cours.

Objectif des cours sur la météorologie par satellite et le climat mondial

Les cours sur les applications de la météorologie par satellite constituent un volet spécifique de la formation aux sciences et techniques spatiales. Ils sont importants car si les satellites météorologiques fonctionnent depuis plus de 30 ans, la plupart des chercheurs, des professionnels et des enseignants ignorent encore que les observations réalisées par ces satellites peuvent être consultées librement et être utilisées, directement ou en combinaison avec d'autres informations, au profit de vastes segments de la population. Ces observations peuvent également aider à résoudre certains problèmes touchant ces groupes de population, en particulier lorsqu'il s'agit de sauver des vies, de protéger des biens ou de gérer les ressources naturelles de manière rationnelle.

De nombreuses agences météorologiques nationales ont réalisé qu'il était important de dispenser des cours de météorologie par satellite pour répondre à leurs besoins opérationnels. Leurs cours de formation ordinaires comprennent un petit segment "météorologie par satellite", principalement consacré à l'étude synoptique du système météorologique à l'aide d'images.

Les questions relatives au réchauffement de la planète, à l'appauvrissement de la couche d'ozone, au phénomène El Niño/oscillation australe, à l'interaction océan-atmosphère et au changement du climat mondial, qui naguère n'intéressaient que les scientifiques, sont aujourd'hui au cœur de l'actualité. Les cours, qui comprennent une initiation à la météorologie par satellite et traitent aussi de questions plus pointues, ont avant tout pour objet de dispenser une formation dans ce domaine. Ils mettent l'accent sur le traitement de données satellitaires numériques, l'utilisation de modèles dynamiques, la solution de problèmes et l'exécution de projets utiles pour les pays des participants.

Les satellites météorologiques n'ont presque jamais cessé de fonctionner depuis le début de l'ère spatiale et fonctionneront certainement encore pendant des décennies, en raison de l'importance que la société accorde à l'observation et à la prévision des phénomènes météorologiques. Plusieurs pays ont lancé des satellites de ce type précisément pour répondre aux besoins de leurs propres services de météorologie chargés de prévoir le temps à des fins civiles et militaires. La plupart de ces pays exploitent leurs satellites de telle sorte que toute personne puisse, à condition d'être à portée des signaux radio émis par ceux-ci, acquérir gratuitement les données et les exploiter comme elle le souhaite. C'est ainsi que les établissements d'enseignement

utilisent les observations en temps réel directement reçues des satellites comme outil d'enseignement et de formation. Ces observations peuvent également servir pour détecter les incendies de forêts, pour faciliter le transport aérien, maritime et routier, ainsi que pour l'agriculture et la pêche ou encore pour nombre d'autres activités non liées à la météorologie. Outre les satellites opérationnels, quelques satellites de recherche-développement fournissent également des informations sur l'atmosphère et les océans. L'utilisation de données satellitaires pour la prévision météorologique numérique est possible. Les données des systèmes d'information géographique (SIG) doivent être prises en compte dans les études météorologiques et climatologiques. Le programme d'études devrait tenir compte de tous ces éléments.

Le fait que l'on peut, aujourd'hui, accéder mondialement aux données obtenues par les satellites météorologiques est le fruit d'une initiative de l'Organisation météorologique mondiale (OMM), menée afin de permettre à des personnes, des organisations et des pays, en particulier des pays en développement, d'utiliser les nouvelles connaissances acquises en matière de sciences et techniques aérospatiales grâce à l'accès gratuit aux observations réalisées par ces satellites. À cette fin, l'OMM a permis à un petit groupe d'experts dans différents pays d'acquérir les capacités d'analyse et les connaissances techniques nécessaires pour promouvoir et appuyer de nombreux programmes nationaux dans lesquels la technologie est au service de projets scientifiques, économiques, éducatifs et humanitaires qui amélioreront la qualité de vie de vastes segments de la population.

Examen du programme d'enseignement existant et de l'expérience acquise

L'Organisation des Nations Unies a mis au point à l'intention des centres régionaux un programme d'enseignement type portant sur les applications de la météorologie par satellite. Les premiers travaux d'élaboration de ce programme ont été menés lors de la réunion d'experts organisée par l'ONU et l'Espagne sur l'élaboration de programmes d'enseignement destinés aux centres régionaux de formation aux sciences et techniques spatiales, tenue à Grenade (Espagne) en 1995. Le programme type, qui a pour objet l'obtention de la reconnaissance et de la certification internationales a été établi afin d'indiquer aux centres régionaux quelle est la qualité d'enseignement requise pour préserver le niveau et le caractère internationaux des cours ainsi que des centres.

Chaque cours comprend neuf mois d'études dans un centre régional, suivis par l'exécution d'un projet pilote d'une durée d'un an dans le pays du participant.

À la réunion de 1995, les experts ont prévu que les participants suivraient un cours destiné à renforcer leurs connaissances scientifiques dans le domaine de l'application des données météorologiques satellitaires et à développer leurs compétences informatiques et analytiques afin qu'ils puissent introduire cette technologie dans leur pays et tirer profit des avantages qu'elle offre.

Les experts ont également suggéré que les thèmes suivants soient traités:

Composition atmosphérique; lois régissant le rayonnement; circulation générale de l'atmosphère et des océans

Fondements de la radiométrie, interaction du rayonnement électromagnétique et de la matière

Thermodynamique; dynamique; systèmes tropicaux et extratropicaux dynamiques; systèmes à méso-échelle et à échelle synoptique

Prévision météorologique; utilisation combinée de données satellitaires, radar et classiques; prévision météorologique numérique

Notions de base sur les types de satellites, les orbites et les capteurs; systèmes de sondage vertical à bord des satellites et plates-formes d'acquisition de données *in situ*; extraction de produits météorologiques

Traitement et applications particulières de données recueillies par des satellites sur orbite polaire et des satellites géostationnaires dans plusieurs domaines de l'activité humaine, tels que l'agriculture, la détermination de la température sous abri et l'estimation de la température de la couche superficielle du sol; l'estimation de la quantité et de la distribution des précipitations, l'inventaire des cultures, la gestion des élevages, les pêcheries, etc.

Deux cours ont déjà été dispensés et un troisième se déroule actuellement. Le groupe de travail a examiné les programmes de ces cours, ainsi qu'il apparaît ci-après.

Premier cours

Le premier cours de troisième cycle sur la météorologie par satellite et le climat mondial a eu lieu au Centre de formation aux sciences et techniques spatiales pour l'Asie et le Pacifique à Ahmedabad (Inde), du 1^{er} mars au 30 novembre 1998. Son programme avait été élaboré sur la base des lignes directrices générales établies à la réunion de 1995 (A/AC.105/649). Les modules qu'il comprenait sont indiqués dans le tableau 1 de l'annexe I. Sa ventilation en cours magistraux, travaux de laboratoire, travaux dirigés, travaux en bibliothèque, visites techniques, etc., qui a été extrêmement utile pour l'élaboration des emplois du temps pendant le cours, est présentée par la figure I.

Les informations en retour ci-après ont été communiquées par des participants et des enseignants:

- a) Une place trop importante a été accordée à la météorologie tropicale. Un plus grand nombre de sujets liés aux systèmes météorologiques des latitudes moyennes devraient être traités;
- b) Il faudrait davantage d'études de cas (notamment sur l'application de données satellitaires dans les modèles de prévision météorologique numérique) et d'exemples de problèmes numériques;
- c) Un cours sur les notions fondamentales de physique, de mathématiques et de programmation informatique serait souhaitable;
- d) Il faudrait consacrer davantage de temps à des thèmes tels que le changement climatique, le transfert par rayonnement, etc.;
- e) Il faudrait davantage de cours par petits groupes.

Deuxième cours

Le deuxième cours de troisième cycle a eu lieu au Centre de formation aux sciences et techniques spatiales pour l'Asie et le Pacifique du 1^{er} juillet 2000 au 31 mars 2001. Les modifications ci-après ont été apportées au programme du deuxième cours pour tenir compte des réactions des participants et des enseignants:

- a) Un module de présentation des notions fondamentales de mathématiques, de statistique et d'informatique a été ajouté;
- b) L'importance accordée à la météorologie tropicale, notamment aux moussons et aux systèmes météorologiques tropicaux extrêmes, a été sensiblement réduite;
- c) De nouveaux cours sur les systèmes météorologiques des latitudes moyennes et sur les systèmes extratropicaux ont été ajoutés.

Les modules du deuxième cours sont indiqués dans le tableau 2 de l'annexe I, et l'emploi du temps correspondant est détaillé à la figure II. Les participants ont accueilli favorablement l'introduction d'un module de présentation des notions fondamentales de mathématiques, de statistique et d'informatique, lequel leur a permis de renforcer leurs connaissances.

Avant le cours, il avait été décidé d'introduire trois options comprenant 20 cours magistraux dans des domaines spécialisés, à savoir: a) extraction de paramètres à partir de données satellitaires; b) assimilation des données et modèles numériques; et c) changement climatique. Compte tenu des discussions avec les participants, de la formation de ceux-ci et du temps imparti, cette idée a été abandonnée. Les éléments importants de chacune des trois options ont été intégrés dans les modules appropriés. En outre, un certain nombre de modifications ont été apportées au programme (par exemple, des cours magistraux sur la météorologie dynamique et l'océanographie physique ont été ajoutés au module de présentation).

Troisième cours

Le troisième cours organisé au Centre de formation aux sciences et techniques spatiales pour l'Asie et le Pacifique a débuté le 1^{er} août 2002 et s'achèvera le 30 avril 2003. Après un examen approfondi du deuxième cours, les modifications suivantes ont été apportées au programme du troisième cours:

- a) Des cours d'océanographie physique ont été ajoutés au sous-module de présentation;
- b) L'importance accordée aux cours avancés sur le transfert par rayonnement et l'extraction de paramètres a été réduite;
- c) On a mis davantage l'accent sur les applications des données satellitaires;
- d) Le nombre de cours magistraux sur le climat mondial a été augmenté et des cours magistraux sur la variabilité à court terme du climat et sur les changements climatiques à long terme ont été introduits.

Les modules du troisième cours figurent au tableau 3 de l'annexe I.

Travaux pratiques

Outre les cours théoriques, des travaux pratiques sur l'utilisation de l'imagerie satellitaire, les applications des données numériques, l'extraction de paramètres météorologiques et l'interprétation des produits des modèles numériques ont lieu les après-midi. La liste des travaux pratiques correspondant à chacun des trois cours figure à la section B de l'annexe I.

Projets pilotes

Des renseignements sur les projets pilotes exécutés par les participants pendant les premier et deuxième cours sont présentés à la section C de l'annexe I.

Adaptation du programme

L'adaptation du programme, qui est un processus continu pour lequel il devrait notamment être tenu compte des progrès techniques, des nouvelles possibilités d'application qui se profilent et des réactions des participants et des enseignants, est présentée au tableau 4 de la section B de l'annexe I. À la fin de chaque module, les participants ont fait part de leurs observations et suggestions, qui ont été examinées et dont il a été tenu compte dans la mesure du possible. À la fin de chaque cours, ils ont rempli un formulaire détaillé destiné à recueillir leurs réactions. Il a également été demandé aux enseignants de dire ce qu'ils pensaient de chaque cours. Un groupe d'experts créé à cet effet examine toutes ces informations et il est tenu compte de ses recommandations pour la conduite des cours ultérieurs.

Programme d'études révisé pour le cours sur la météorologie par satellite et le climat mondial

Objectifs

Le cours sur la météorologie par satellite et le climat mondial a notamment pour objectifs:

- a) De former des spécialistes de pays en développement aux applications de la météorologie par satellite pour appuyer le développement et le bien-être socioéconomique;
- b) De promouvoir l'utilisation des données et des techniques météorologiques satellitaires pour surveiller et évaluer l'environnement ainsi que les phénomènes météorologiques extrêmes.

Il est prévu qu'à l'issue du cours, les participants seront en mesure de:

- a) Pourvoir en tant qu'agents de liaison au renforcement des compétences et des connaissances d'autres professionnels dans leur pays;
- b) Contribuer à l'élaboration des politiques, à la planification, au développement et à la gestion des données des satellites météorologiques et de leurs applications dans leur pays;
- c) Renforcer et accroître l'autonomie de leur pays afin qu'il soit moins tributaire d'experts étrangers.

Niveau requis

Les participants doivent être titulaires d'une licence de mathématiques, de physique ou de météorologie et avoir au moins cinq années d'expérience professionnelle dans le domaine de la météorologie ou dans des domaines connexes.

Structure du programme d'études

Chaque cours comprendra un programme de travail d'une durée de neuf mois suivi d'un projet pilote d'une durée d'une année dans le pays du participant. Le cours de neuf mois comporte quatre volets: notions fondamentales (deux mois); applications des données provenant des satellites météorologiques (deux mois); modèles numériques et changement climatique (deux mois); élaboration du projet et propositions (trois mois). Les trois premiers volets comportent trois modules chacun. Un quatrième module, proposé aux étudiants plus avancés, couvre des thèmes tels que les utilisations potentielles des moyens satellitaires futurs. Pour définir la structure du programme d'études, le groupe de travail a tiré profit de l'expérience acquise par le Centre de formation aux sciences et techniques spatiales pour l'Asie et le Pacifique.

Conférences et travaux pratiques

Le groupe de travail a suggéré 15 heures de cours magistraux et 20 heures de travaux pratiques par semaine.

Équipement

L'équipement et le matériel nécessaires pour le cours (A/AC.105/649), y compris ceux déjà détaillés dans le document A/AC.105/534, sont les suivants:

- Station terrestre de transmission d'images à haute résolution (HRPT)
- Micro-ordinateurs (équipés de modems, de lecteurs de CD-ROM, etc.)*
- Imprimantes
- Accès à Internet
- Télécopieur
- Stations terrestres de réception haute résolution pour satellites géostationnaires
- Fichiers de données
- Système d'analyse et d'affichage graphique
- Logiciel de traitement d'images et de météorologie
- Accès à des radars et à des produits nationaux de prévision météorologique*
- Stations de travail*
- Station APT/WEFAX (transmission automatique d'images/télécopie de cartes météorologiques)
- Système d'information géographique (SIG)
- Atlas climatologiques*
- Matériel topographique
- Manuels

Invitation/questionnaire

Les candidats doivent remplir un questionnaire pour aider les centres régionaux à effectuer une sélection. Chaque centre régional peut élaborer son propre questionnaire.

* La quantité de matériel nécessaire dépendra du nombre de participants retenus pour le cours.

Programme révisé

Le programme révisé du cours sur la météorologie par satellite et le climat mondial est présenté ci-après:

Module 1: Notions fondamentales (deux mois)

1. Météorologie
 - Dynamique atmosphérique
 - Circulation générale de l'atmosphère
 - Systèmes météorologiques tropicaux et extratropicaux
2. Climatologie
 - Éléments du climat de la Terre
 - Cycles annuels et semi-annuels
 - Variabilité climatique
 - Aperçu du climat mondial
3. Océanographie
 - Rôle des océans dans la météorologie et le climat
 - Paramètres océanographiques
 - Circulation océanique
 - Interactions air-mer
4. Physique de l'atmosphère
 - Composition de l'atmosphère
 - Thermodynamique
 - Lois régissant le rayonnement
 - Spectre électromagnétique
5. Mathématiques
 - Matrices
 - Équations différentielles partielles et totales
 - Intégrales et dérivées
6. Statistiques
 - Analyse de données
 - Classification dirigée et non dirigée
7. Techniques informatiques
 - Environnements informatiques
 - Langage informatique
 - Logiciel météorologique
 - Outils graphiques
 - Multimédia
8. Les satellites météorologiques et leurs orbites
 - Dynamique des orbites
 - Satellites polaires et géostationnaires
 - Satellite météorologique opérationnel

Cours de l'après-midi

Cours de langue, selon que de besoin
Exercices de laboratoire, informatique, sites Internet utiles

Module 2: Applications (deux mois)

Traitement de l'image et système d'information géographique (SIG)

1. Instruments et capteurs météorologiques
 - Capteurs actifs et passifs
 - Technologie des capteurs: optique/infrarouge/vapeur d'eau
 - Technologie des capteurs: micro-ondes
 - Notion de résolution: spatiale, temporelle
 - Spectromètres
 - Imageurs et sondeurs
2. Interprétation et applications des images
 - Systèmes à échelle synoptique et à méso-échelle
 - Systèmes météorologiques tropicaux et extratropicaux
 - Polluants atmosphériques (poussière, brume, fumée, feux de forêt, etc.)
 - Surveillance des océans
3. Techniques de traitement d'images
 - Logiciel de prévision
 - Enregistrement de l'image/navigation, correction radiométrique et géométrique
 - Correction atmosphérique
 - Classification des images, groupement, etc.
4. SIG
 - Principes fondamentaux
 - Gestion des données
 - Utilisation des données
 - Mise en œuvre du SIG
 - Production de cartes multicouches
 - Applications dans les domaines de la météorologie et de la climatologie

Extraction et application des données satellitaires

5. Extraction de paramètres géophysiques
 - Statistiques et méthodes d'inversion
 - Fonctions de pondération
6. Paramètres atmosphériques
 - Vents
 - Profils atmosphériques
 - Précipitations
 - Rayonnement infrarouge thermique de sortie
 - Concentration d'aérosols
 - Informations sur les nuages
 - Bilan radiatif

7. Paramètres terrestres et océaniques

Température de surface de la mer
Vents à la surface de la mer
Indice de végétation
Paramètres terrestres (surface)

8. Application de paramètres dérivés

Variabilité intrasaisonnière
Systèmes tropicaux/extratropicaux
Surveillance de la sécheresse
Variabilité des précipitations
Interactions air-mer
Systèmes météorologiques régionaux/locaux

Les séances de laboratoire de ce module pourront être définies en fonction des thèmes ci-dessus et des ressources dont disposent les centres régionaux.

Module 3: Modèles numériques et climat mondial (deux mois)

Modèles numériques et assimilation des données satellitaires

1. Modèles régionaux et mondiaux

Modèles simples et modèles à zéro, une, deux et trois dimensions
Structure de base des modèles
Rôle des données satellitaires dans la paramétrisation

2. Assimilation des données

Principes de base de l'assimilation des données
Systèmes d'observation
Analyse subjective et objective
Cycle d'assimilation
Produits du modèle

3. Assimilation des données satellitaires

Humidité, vent, température
Précipitations
Impact

Climat mondial

4. Changement climatique

Principes de base de la surveillance du climat
Effet de serre et réchauffement de la planète
Variabilité à court et long termes
Bilan radiatif et mécanismes de rétroaction
Effets anthropiques

5. Impact du changement climatique

Impacts de type El Niño
Remontée d'eau

Calotte glaciaire
Niveau de la mer et inondation des côtes
Prévision du climat futur

6. Climatologie basée sur les données satellitaires
Climatologie des nuages (Projet international d'établissement d'une climatologie des nuages à l'aide de données satellitaires)
Climatologie terrestre (Projet international de climatologie terrestre par satellite)
Précipitations mondiales (Projet mondial de climatologie des précipitations)

Questions relatives à l'environnement

7. Chimie de l'atmosphère
Ozone
Autres gaz à l'état de traces
Rôle des polluants
Programmes d'observation par satellite
 8. Protocoles relatifs à l'environnement
Changement du climat mondial et conséquences politiques
Action 21: développement durable intégré
Protocole de Kyoto à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
 9. Gestion des catastrophes
Techniques de surveillance
Diffusion de l'information
Systèmes d'alerte faisant appel à des satellites
- Les séances de laboratoire de ce module pourront être définies en fonction des thèmes ci-dessus et des ressources dont disposent les centres régionaux.

Hors programme: module 4 (option proposée aux étudiants avancés)

Ce module optionnel peut être organisé parallèlement aux autres modules en fonction de la formation universitaire, des besoins et des possibilités des participants. Ceux-ci peuvent choisir l'un des thèmes suivants:

Utilisations potentielles des moyens satellitaires futurs
Applications avancées des données satellitaires
Assimilation avancée des données satellitaires dans les prévisions météorologiques numériques
SIG avancé

Projet pilote (trois mois)

Matériel didactique

La liste du matériel didactique recommandé est présentée à l'annexe II.

Notes

- ¹ L. Pyenson et S. Sheets-Pyenson, *Servants of Nature: a History of Scientific Institution, Enterprises and Sensibilities* (New York, W. W. Norton and Company, 1999).
- ² *Rapport de la troisième Conférence des Nations Unies sur l'exploration et les utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique, Vienne, 9-30 juillet 1999* (publication des Nations Unies, numéro de vente: F.00.I.3), chap. II, sect. G, par. 220.
- ³ *Ibid.*, chap. I^{er}, résolution 1, par. 1 e) ii). La Déclaration est accessible sur la page d'accueil du Bureau des affaires spatiales à l'adresse suivante: « <http://www.oosa.unvienna.org> ».

Annexe I

Programme des trois premiers cours

Modules

Tableau 1
Aperçu du premier cours

<i>Module/ Sous-module</i>	<i>Sujet</i>	<i>Nombre de séances</i>
1	Bases de la météorologie, de la climatologie et de la télédétection	
1.1	Notions de météorologie et de climatologie	
	Notions fondamentales de météorologie	25
	Notions fondamentales de climatologie	20
1.2	Notions de météorologie satellitaire	
	Introduction à la météorologie satellitaire	23
	Orbites, instruments et produits des satellites météorologiques	26
1.3	Applications de l'imagerie satellitaire et traitement d'images numériques	
	Utilisation de l'imagerie satellitaire en météorologie et prévision météorologique	15
	Statistiques, techniques de traitement d'image numérique et SIG	17
2	Notions avancées de météorologie par satellite, extraction de paramètres et applications	
2.1	Transfert radiatif et extraction de paramètres	
	Notions de transfert radiatif	25
	Extraction de paramètres météorologiques et océanographiques	38
2.2	Applications utilisant des données satellitaires numériques	
	Applications des données satellitaires numériques en météorologie et prévision météorologique	29
	Applications en océanographie	23
	Applications dans les études du climat	15
2.3	Problèmes environnementaux et modèles numériques	
	Questions relatives à l'environnement et impact sur la société	17
	Assimilation de données satellitaires et modélisation	28
3	Projets pilotes (trois mois)	

Figure I
Pourcentage de temps consacré à chaque activité pendant le premier cours

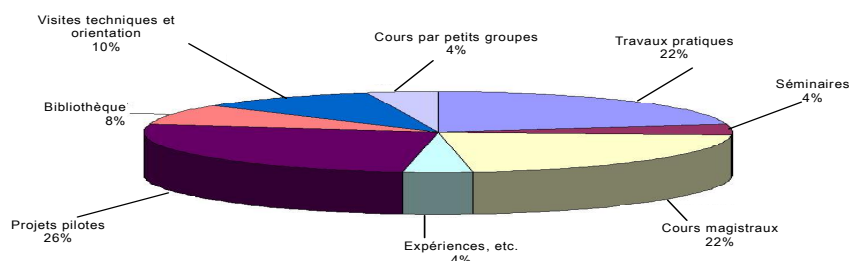


Tableau 2
Aperçu du deuxième cours

Module/ Sous-module	Sujet	Nombre de séances
1	Bases de la météorologie, de la climatologie et de la télédétection (trois mois)	
1.1	Notions de météorologie et de climatologie	
	Notions fondamentales de météorologie	20
	Notions fondamentales de climatologie	10
1.2	Notions de météorologie satellitaire	
	Techniques mathématiques et techniques de calcul pour la météorologie satellitaire	20
	Introduction à la météorologie satellitaire	25
	Orbites et instruments des satellites météorologiques	20
1.3	Applications de l'imagerie satellitaire et traitement d'images numériques	
	Utilisation de l'imagerie satellitaire en météorologie et prévision météorologique	20
	Statistiques, techniques de traitement d'images numériques et SIG	15
2	Notions avancées de météorologie satellitaire, extraction de paramètres et applications (trois mois)	
2.1	Transfert par rayonnement et extraction de paramètres	
	Notions de transfert radiatif	30
	Extraction de paramètres météorologiques et océanographiques	30
2.2	Applications utilisant des données satellitaires numériques	
	Applications des données satellitaires numériques en météorologie et prévision météorologique	25
	Applications en océanographie	15
	Assimilation des données satellitaires et modèles numériques	10
2.3	Applications dans les études du climat et de l'environnement	
	Études du climat	15
	Questions relatives à l'environnement et impact sur la société	15
2.4	Applications avancées (facultatif)	
	Extraction de paramètres météorologiques et océanographiques	20
	Applications dans les études du climat	20
	Assimilation de données satellitaires et modélisation	20
3	Projets pilotes (trois mois)	

Figure II
Pourcentage de temps consacré à chaque activité lors du deuxième cours

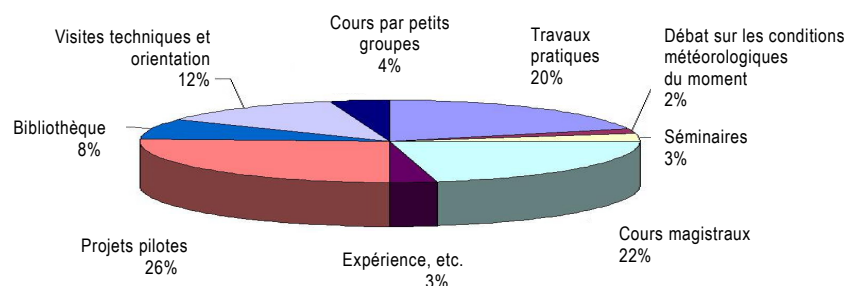


Tableau 3
Troisième cours

<i>Module/ Sous-module</i>	<i>Sujet</i>	<i>Nombre de séances</i>
1	Bases de la météorologie, de la climatologie et de la télédétection (trois mois)	
1.1	Notions de météorologie et de climatologie	
1.1 MATH	Méthodes mathématiques et méthodes de calcul pour la météorologie satellitaire Matrices Équations différentielles partielles et totales Intégrales et dérivées Notions fondamentales de statistique	20
1.1 MET	Notions fondamentales de météorologie, de climatologie et d'océanographie Météorologie dynamique et physique Systèmes météorologiques extratropicaux Systèmes météorologiques tropicaux Climat de la région Océan et climat	30
1.2	Notions de météorologie satellitaire	
1.2 SM	Transfert radiatif en météorologie satellitaire Caractéristiques des rayonnements électromagnétiques Télédétection passive Télédétection active Extraction et validation de paramètres	25
1.2 MSI	Orbites et instruments des satellites météorologiques Orbites et navigation Satellites en orbite polaire opérationnels Satellites géostationnaires opérationnels Autres satellites Archives de données satellitaires	15
1.3	Traitement et interprétation des images	
1.3 WF	Interprétation des images en météorologie et prévision météorologique Imagerie satellitaire Propriétés spectrales Identification de systèmes à méso-échelle Systèmes synoptiques tropicaux Systèmes synoptiques extratropicaux Imagerie radar	30
1.3 DIP	Techniques de traitement des images et SIG Projection cartographique Systèmes de positionnement par satellite Superposition d'images, corrections radiométriques et géométriques Classification des images SIG	15
2.1	Extraction de paramètres géophysiques	
2.1 AP	Paramètres atmosphériques	15

<i>Module/ Sous-module</i>	<i>Sujet</i>	<i>Nombre de séances</i>
	Vents	
	Profil de température	
	Profil d'humidité	
	Précipitations	
	Rayonnement ascendant de grande longueur d'onde	
	Nuages et aérosols	
2.2 LOP	Paramètres terrestres et océaniques	10
	Température de surface de la mer	
	Vents de surface	
	Indice de végétation	
	Paramètres à la surface des terres	
2.2	Applications des paramètres dérivés de données satellitaires	
2.2 AWF	Applications en météorologie et prévision météorologique	30
	Début de la mousson	
	Variabilité intrasaisonnière et intra-annuelle	
	Cyclones tropicaux	
	Cyclones extratropicaux	
	Surveillance de la sécheresse	
	Interaction air-mer	
2.2 NM	Assimilation de données satellitaires dans des modèles numériques	15
	Modèles de circulation générale	
	Notions d'assimilation de données	
	Assimilation de données satellitaires	
	Impact de l'assimilation de données satellitaires	
2.3	Climat et environnement mondiaux	
2.3 SC	Variabilité du climat à court terme	25
	El Niño et la téléconnexion	
	Climatologie des nuages	
	Changements à la surface des terres	
	Ozone et autres gaz à l'état de traces	
2.3 LC	Changements climatiques à long terme	25
	Changements climatiques	
	Effet de serre et réchauffement de la planète	
	Changements dans la cryosphère	
	Scénario du climat futur et missions satellitaires	
2.3 ESI	Questions relatives à l'environnement et impacts sur la société	10
	Productivité biologique des océans	
	Environnement des zones côtières	
	Pollution	
	Gestion des catastrophes	
	Communications de masse	
3	Projets pilotes (trois mois)	30

Travaux pratiques

Liste des travaux pratiques pour le premier cours

Module 1. Manipulation et applications des données des satellites météorologiques opérationnels

1. Matériel informatique et familiarisation
2. Applications des données des satellites géostationnaires (Système à satellites nationaux indien INSAT et des satellites météorologiques géostationnaires (GSM))
3. Applications des données AVHRR/NOAA
4. Vecteurs du déplacement des nuages à partir d'INSAT et leurs applications
5. Applications de données satellitaires pour l'estimation de l'intensité des cyclones tropicaux
6. Applications de données satellitaires pour la prévision de la trajectoire des cyclones tropicaux
7. Démonstration multimédia des données GOES Meteosat sur les cyclones
8. Prologiciels de visualisation

Module 2. Extraction de paramètres et modélisation numérique

1. Estimation du rayonnement ascendant de grande longueur d'onde à l'aide des données du radiomètre VHRH du système INSAT et des satellites GSM
2. Estimation des précipitations quotidiennes et hebdomadaires à partir des données du radiomètre VHRH/INSAT
3. Estimation de la température de surface de la mer à partir des données AVHRR/NOAA et applications pour l'étude de la circulation océanique
4. Étude de l'humidité et des températures moyennes des couches au-dessus de différentes régions grâce aux produits finis du sondeur TOVS de TIROS
5. Utilisation de la version 5 du progiciel de traitement des données TOVS/NOAA pour l'estimation du profil de température
6. Interprétation des résultats de modèles de circulation générale
7. Étude des résultats de la simulation du doublement de la concentration en dioxyde de carbone au moyen de modèles de circulation générale
8. Manteau neigeux à partir des données AVHRR/NOAA
9. Indice de végétation normalisé à partir des données AVHRR/NOAA
10. Utilisation des données de satellites météorologiques dans les SIG
11. Vents de surface à partir des données diffusiométriques
12. Niveau de la mer à partir des données altimétriques

13. Familiarisation avec le progiciel de calcul de transmittance à faible résolution (LOWTRAN)

Liste des travaux pratiques pour le deuxième cours

Module 1. Manipulation et applications des données des satellites météorologiques opérationnels

1. Matériel informatique et familiarisation
2. Applications des données des satellites géostationnaires INSAT et GSM
3. Applications des données AVHRR/NOAA
4. Vecteurs du déplacement des nuages à partir du système INSAT et leurs applications
5. Applications de données satellitaires pour l'estimation de l'intensité des cyclones tropicaux
6. Applications de données satellitaires pour la prévision de la trajectoire des cyclones tropicaux
7. Démonstration multimédia des données sur les cyclones du satellite GOES de Meteosat et progiciels de visualisation
8. Estimation du rayonnement ascendant de grande longueur d'onde à partir des données VHRR/INSAT et des données des satellites GSM, applications Meteosat

Module 2. Extraction de paramètres et modélisation numérique

1. Estimation des précipitations quotidiennes et hebdomadaires à partir des données VHRR/INSAT
2. Estimation de la température de surface de la mer à partir de données AVHRR/NOAA et applications pour l'étude de la circulation océanique
3. Utilisation de la version 5.01 du progiciel de traitement des données du radiomètre NOAA/TOVS pour l'estimation du profil de température
4. Interprétation des résultats des modèles de circulation générale
5. Manteau neigeux, indice de végétation normalisé, glaces de mer et feux de forêt à partir des données AVHRR/NOAA
6. Utilisation des données de satellites météorologiques dans les SIG
7. Vents de surface à partir des données diffusiométriques
8. Familiarisation avec le progiciel LOWTRAN (démonstration)
9. Extraction de paramètres au moyen du radiomètre hyperfréquences multicanal à balayage (MSMR)
10. Applications relatives aux aérosols

Liste des travaux pratiques proposés pour le troisième cours

Module 1. Manipulation et applications des données des satellites météorologiques opérationnels

1. Matériel informatique et familiarisation
2. Applications des données VHRR/INSAT
3. Applications des données AVHRR/NOAA
4. Techniques de visualisation
5. Vecteurs du déplacement des nuages à partir des satellites géostationnaires et leurs applications
6. Applications de données satellitaires pour l'estimation de l'intensité des cyclones tropicaux
7. Applications de données satellitaires pour la prévision de la trajectoire des cyclones tropicaux
8. Démonstration multimédia des données sur les cyclones du satellite GOES de Meteosat et progiciels de visualisation
9. Estimation du rayonnement ascendant de grande longueur d'onde à l'aide de données VHRR/INSAT et applications

Module 2. Extraction de paramètres et modélisation numérique

1. Estimation des précipitations quotidiennes et hebdomadaires à partir des données VHRR
2. Estimation de la température de surface de la mer à partir des données AVHRR/NOAA et applications pour l'étude de la circulation océanique
3. Estimation du profil de température et d'humidité à partir des données NOAA/TOVS
4. Interprétation des résultats des modèles de circulation générale
5. Manteau neigeux, indice de végétation normalisé, glaces de mer et feux de forêt à partir des données AVHRR/NOAA (démonstration)
6. Utilisation des données de satellites météorologiques dans les SIG (démonstration)
7. Vents de surface à partir des données diffusiométriques (démonstration)
8. Familiarisation avec le progiciel LOWTRAN (démonstration)
9. Extraction de paramètres géophysiques à l'aide de radiomètres hyperfréquences
10. Analyse objective du vent
11. Analyse objective de la température

Projets pilotes

Projets pilotes exécutés par les participants au premier cours

1. Estimation de l'humidité du sol au moyen de l'indice de végétation normalisé à partir des données AVHRR/NOAA au-dessus de la Mongolie
2. Extraction, validation et applications de la température de surface de la mer autour de Sri Lanka à partir des données du radiomètre à balayage le long de la trace (ATSR) du Satellite européen de télédétection (ERS)
3. Estimation des précipitations à l'aide de la classification des nuages
4. Analyse des nuages des perturbations de l'hémisphère occidental
5. Estimation des risques de feu incontrôlé et surveillance de ces feux par l'imagerie AVHRR/NOAA, le Satellite indien de télédétection (IRS) et les SIG
6. Indice de végétation normalisée et estimation de l'humidité du sol au Bangladesh
7. Extraction, validation et applications des profils de température et d'humidité atmosphériques à partir des données du sondeur TOVS/NOAA au-dessus de la Mongolie
8. Prévision de la trajectoire des cyclones tropicaux à l'aide de la température au sommet des nuages et de la théorie du chaos
9. Début de la mousson au Népal à partir des données satellitaires
10. Estimation des précipitations au-dessus du Bangladesh et du golfe du Bengale par la méthode d'Arkin
11. Profil de température et d'humidité au-dessus de l'Ouzbékistan à partir des données du sondeur TOVS/NOAA
12. Étude de la remontée côtière d'eau profonde dans le golfe Persique et la mer d'Oman
13. Estimation des précipitations au-dessus de la région de l'Indonésie
14. Validation des résultats auxquels parviennent les modèles de prévision numérique du temps utilisant des produits satellitaires par rapport aux observations météorologiques traditionnelles
15. Estimation des précipitations au-dessus d'un cyclone à l'aide de la classification des nuages
16. Phases actives et inactives de la mousson au-dessus du Népal
17. Modélisation de la circulation océanique à l'aide de données satellitaires

Projets pilotes menés par les participants au deuxième cours

1. Mouvement des cyclones tropicaux à proximité des Philippines à l'aide des images vapeur d'eau des satellites GMS
2. Intensité et trajectoire des cyclones tropicaux à l'aide des données VHRR/INSAT

3. Étude de la prévision de la trajectoire des cyclones tropicaux au-dessus de la région du Viet Nam à l'aide des données GMS
4. Identification des caractéristiques océaniques et atmosphériques à partir des données AVHRR/NOAA
5. Étude des températures et des vents de surface de la mer au-dessus de l'océan Indien à l'aide des données de l'imageur hyperfréquences de la Mission TRMM et des données du radiomètre MSMR de l'IRS-P4
6. Extraction de profils d'humidité à partir des données vapeur d'eau du radiomètre MSMR par la méthode des fonctions orthogonales empiriques
7. Étude des données du radiomètre MSMR sur la température de brillance au-dessus de l'Inde et du Kazakhstan et sur potentiel d'estimation de l'humidité du sol sur de grandes superficies
8. Profil d'humidité et de température à partir des données du sondeur TOVS/NOAA et comparaison avec les données de radiosondes et des National Centers for Environmental Prediction (NCEP)
9. Profil d'humidité et de température grâce aux données du sondeur TOVS/NOAA et comparaison avec les données des NCEP et de Meteosat
10. Climatologie de la Mongolie à l'aide des données NCAR des NCEP
11. Estimation des précipitations au-dessus de la région de l'Inde à partir des données de l'imageur spécial hyperfréquence (SSM/I) du Defense Meteorological Satellite Program et du radiomètre MSMR de l'IRS-P4
12. Cycle diurne des précipitations pendant la mousson d'été en Asie à l'aide des observations de la Mission TRMM
13. Classification multispectrale des nuages à partir des observations de la Mission/TRMM pour améliorer l'estimation des précipitations au moyen de techniques visible/infrarouge
14. Étude des perturbations de l'hémisphère occidental à l'aide de données satellitaires
15. Vérification des prévisions au-dessus du Kazakhstan établies à l'aide de modèles par l'analyse et des données satellitaires
16. Comparaison des prévisions à moyen terme établies par modèle et des données d'Oceansat-1
17. Étude comparative de l'état de la mer d'Oman estimé par des données satellitaires et des prévisions traditionnelles des navires météorologiques
18. Surveillance de la température de surface de la mer pendant El Niño à partir de satellites et rapprochement avec les précipitations au-dessus de l'Indonésie
19. Surveillance de la neige au-dessus de l'Himalaya occidental
20. Surveillance de la végétation à l'aide de données satellitaires (et météorologiques) diachroniques à faible résolution au-dessus de la péninsule coréenne

21. Surveillance des principales cultures de la République populaire démocratique de Corée à l'aide des données satellitaires des canaux AVHRR 1 et 2 de la NOAA

Tableau 4

Évolution du programme de météorologie par satellite (théorie)

<i>Module</i>	<i>Titre des sous-modules</i>	<i>Premier cours</i>	<i>Deuxième cours</i>	<i>Troisième cours</i>
		<i>Nombre d'heures</i>		
1	Concepts de la météorologie	45	30	30
	Techniques mathématiques	-	20	10
	Notions de météorologie satellitaire	49	45	40
	Applications des satellites	32	35	45
2	Transfert radiatif	63	60	25
	Applications des données numériques	52	40	40
	Climat et environnement	32	30	60
	Assimilation de données	28	20	15
Orientation		-	20	35
Total		301	300	300

Note: Pendant les exercices de laboratoire, l'accent est mis davantage sur les produits obtenus à partir des données des satellites opérationnels. Les données récentes de télédétection hyperfréquence sont présentées plus en détail. Lors du troisième cours, l'accent est mis sur la validation des données satellitaires et leur utilisation dans des modèles numériques.

Annexe II

Matériel didactique recommandé

Bader, M. J. *et al.* (sous la direction de), *Images in weather forecasting: A practical guide for interpreting satellite and radar imagery*, Cambridge University Press, Cambridge, 1995.

Barrett, E. C. et D. W. Martine, *The use of satellite data in rainfall monitoring*, Academic Press, Londres, 1981.

Centre de formation aux sciences et techniques spatiales pour l'Asie et le Pacifique, "Lecture notes on satellite meteorology. 1: Basics, 2: Retrievals, 3: Modeling Climate Change".

Imprimé par le Space Application Centre (Centre des applications spatiales) de l'Indian Space Research Organization (Organisation indienne de recherche spatiale), 2000.

Henderson-Sellers, A. et K. McGuffie, *A climate modeling primer*, deuxième édition, John Wiley and Sons, New York, 1997.

Houze, Jr., R. A., *Cloud dynamics*, Academic Press, San Diego, 1993.

Kidder, S. Q. et T. H. Vonder Haar, *Satellite meteorology: An introduction*, Academic Press, San Diego, 1995.

Kondratyev, K. Ya. et A. P. Cracknell, *Observing global climate change*, Taylor and Francis, Londres et Bristol, 1998.

Liou, K. N., *An introduction to atmospheric radiation*, Academic Press, New York, 1980.

Menzel, W. P., "Notes on satellite meteorology", Organisation météorologique mondiale, Genève, 1997 (WMO/TD 824, SAT-17).

Organisation météorologique mondiale, "Preliminary statement of guidance regarding how well satellite capabilities meet WMO user requirements in several application areas", Genève, WWW/SAT, 1998 (WMO/TD/913, SAT-21).

Rao, P. K. *et al.*, *Weather satellites: Systems, data, and environmental applications*, American Meteorological Society, Boston, 1990.

Robinson, I. S., *Satellite oceanography*, Ellis Horwood, Chichester, 1985.

Trenberth, K. E. (sous la direction de), *Climate system modeling*, Cambridge University Press, Cambridge, 1992.

Ulaby, F. T., R. K. Moore et A. K. Fung, *Microwave remote sensing: Active and passive. II: Radar remote sensing and surface scattering and emission theory*, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, 1981.