

Union internationale des télécommunications

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R RS.1883-1
(12/2018)

**Utilisation des systèmes de télédétection
dans l'étude des changements climatiques
et de leurs effets**

Série RS
Systemes de télédétection



Union
internationale des
télécommunications

Avant-propos

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radiocommunication, y compris les services par satellite, et de procéder à des études pour toutes les gammes de fréquences, à partir desquelles les Recommandations seront élaborées et adoptées.

Les fonctions réglementaires et politiques du Secteur des radiocommunications sont remplies par les Conférences mondiales et régionales des radiocommunications et par les Assemblées des radiocommunications assistées par les Commissions d'études.

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

La politique de l'UIT-R en matière de droits de propriété intellectuelle est décrite dans la «Politique commune de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI en matière de brevets», dont il est question dans la Résolution UIT-R 1. Les formulaires que les titulaires de brevets doivent utiliser pour soumettre les déclarations de brevet et d'octroi de licence sont accessibles à l'adresse <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/fr>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en oeuvre de la politique commune en matière de brevets de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI et la base de données en matière de brevets de l'UIT-R.

Séries des Recommandations UIT-R

(Egalement disponible en ligne: <http://www.itu.int/publ/R-REC/fr>)

Séries	Titre
BO	Diffusion par satellite
BR	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
BS	Service de radiodiffusion sonore
BT	Service de radiodiffusion télévisuelle
F	Service fixe
M	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
P	Propagation des ondes radioélectriques
RA	Radio astronomie
RS	Systemes de télédétection
S	Service fixe par satellite
SA	Applications spatiales et météorologie
SF	Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe
SM	Gestion du spectre
SNG	Reportage d'actualités par satellite
TF	Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires
V	Vocabulaire et sujets associés

Note: Cette Recommandation UIT-R a été approuvée en anglais aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.

Publication électronique
Genève, 2019

© UIT 2019

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

RECOMMANDATION UIT-R RS.1883-1

Utilisation des systèmes de télédétection dans l'étude des changements climatiques et de leurs effets

(2011-2018)

Domaine d'application

La présente Recommandation donne des lignes directrices sur la fourniture de données de télédétection par satellite aux fins de l'étude des changements climatiques.

Mots clés

SETS (active), SETS (passive), service d'exploration de la Terre par satellite, télédétection, changements climatiques

Recommandations et Rapports UIT-R connexes

Recommandation UIT-R RS.1859 – Utilisation des systèmes de télédétection pour la collecte des données à utiliser en cas de catastrophes naturelles ou de situations d'urgence analogues

Rapport UIT-R RS.2178 – Rôle essentiel et importance à l'échelle mondiale de l'utilisation du spectre des fréquences radioélectriques pour les observations de la Terre et les applications connexes

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les changements climatiques sont un phénomène mondial qui affecte l'humanité tout entière;
- b) que les changements climatiques devraient conduire à de profondes modifications de l'environnement terrestre qui, à leur tour, provoqueront des catastrophes naturelles ou les aggraveront;
- c) que l'étude des changements climatiques nécessite de disposer de capacités d'observation de l'environnement terrestre que seuls des instruments de télédétection ou des capteurs embarqués à bord de satellites peuvent fournir;
- d) qu'il existe des systèmes de télédétection embarqués à bord de satellites et que ces systèmes sont actuellement exploités dans les bandes de fréquences attribuées aux services d'exploration de la Terre par satellite (SETS);
- e) qu'avec le temps, les capacités de détection s'améliorent et la sensibilité des systèmes de télédétection embarqués à bord de satellites augmente;
- f) que les systèmes du SETS et du service MetSat sont essentiels pour le suivi et la prévision des changements climatiques, la surveillance des océans, des conditions météorologiques et des ressources en eau, les prévisions météorologiques et la fourniture d'une assistance pour la protection de la biodiversité,

reconnaissant

qu'aux termes de la Résolution **673 (Rév.CMR-12)**, il a été décidé «1) de continuer de reconnaître que l'utilisation de fréquences pour les applications liées à l'observation de la Terre présente un intérêt social et économique considérable», comme indiqué dans les Annexes 1 et 2; «2) de prier instamment les administrations de tenir compte des besoins de fréquences radioélectriques pour l'observation de la Terre et, en particulier, de la protection des systèmes d'observation de la Terre fonctionnant dans les bandes de fréquences connexes»; et «3) d'encourager les administrations à tenir compte de

l'importance de l'utilisation et de la disponibilité de fréquences pour les applications liées à l'observation de la Terre, avant de prendre des décisions susceptibles d'avoir des incidences négatives sur le fonctionnement de ces applications»,

notant

a) que la Résolution 73 de l'UIT-T, intitulée «Les technologies de l'information et de la communication et le changement climatique», reconnaît que les technologies de l'information et de la communication (TIC) peuvent grandement contribuer à la réduction des effets du changement climatique et que les TIC jouent un rôle vital pour ce qui est de surveiller et de lutter contre le changement climatique à travers le soutien de la recherche scientifique fondamentale qui a contribué à porter le problème du changement climatique sur la place publique et à sensibiliser l'opinion aux défis à venir;

b) que le Rapport de l'UIT, intitulé «L'UIT et les changements climatiques» parle de renforcer les partenariats stratégiques avec diverses instituts des Nations Unies, la Banque mondiale, la Commission européenne et les instituts et organisations internationales et nationales (par exemple instituts météorologiques, Groupe sur l'observation de la Terre, EUMETSAT, Agence spatiale européenne, Groupe de coordination des fréquences spatiales, JAXA, NOAA, NASA et Roscosmos), les ONG et les entités concernées du secteur privé dans la lutte contre les changements climatiques et examine le rôle que le SETS joue dans la surveillance des changements climatiques;

c) que le Rapport UIT-R RS.2178 donne un vaste aperçu des différentes applications de radiocommunication utilisées pour l'observation de la Terre, la recherche spatiale et la radioastronomie et décrit leur impact social ainsi que leurs avantages économiques pour la communauté mondiale et, en particulier leur importance pour la surveillance et la prévision des changements climatiques ainsi que pour l'alerte avancée et la surveillance des catastrophes naturelles ou provoquées par l'homme et l'atténuation de leurs effets;

d) que le Rapport de l'UIT-D D-STG-SG02.24-2014, faisant suite à l'étude de la Question 24/2 de l'UIT-D sur les TIC et les changements climatiques, fait état des graves répercussions des changements climatiques et du rôle des systèmes de télédétection dans le suivi de ceux-ci et dans la compréhension des processus en jeu,

recommande

1 aux administrations de se familiariser avec les applications des systèmes de télédétection à bord des satellites pour l'étude des changements climatiques et de reconnaître leur importance, comme cela est expliqué dans l'Annexe 1;

2 aux administrations et aux opérateurs de continuer de fournir des données environnementales sur le climat, comme indiqué dans l'Annexe 2;

3 de renforcer les protections accordées aux systèmes réalisant des observations climatologiques essentielles.

Annexe 1

Utilisation des systèmes de télédétection dans l'étude du changement climatique et de ses effets

1 Introduction

Les satellites du SETS assurent une couverture systématique du globe avec les mêmes instruments ou des instruments aux fonctions similaires. Ils fournissent donc des ensembles de données qui sont véritablement cohérentes sur l'ensemble du globe. Souvent, ces ensembles de données se recouvrent dans le temps et permettent de construire des ensembles de données couvrant de façon continue plusieurs décennies. Même s'ils ne couvrent pas des siècles ou des millénaires, ces ensembles de données apportent néanmoins des informations essentielles à tous ceux qui étudient les changements climatiques.

Les satellites sont le meilleur moyen pour donner un aperçu instantané de l'état de notre planète dans une perspective unique et unifiée. Aucun instrument ou engin spatial ne peut à lui seul fournir une image complète mais la flotte actuelle d'engins spatiaux, s'ils sont exploités de façon concertée et partagent leurs données, nous donne la meilleure évaluation de la situation mondiale dont nous disposons. Un seul instrument embarqué à bord d'un satellite en orbite polaire peut observer toute la surface de la Terre quotidiennement, alors que les instruments à bord de satellites géostationnaires assurent un suivi continu du cycle diurne du disque terrestre au-dessus duquel ils se trouvent. Par conséquent, les satellites d'observation de l'environnement en orbite polaire et ceux en orbite géostationnaire maintiennent une veille constante sur la totalité du globe terrestre.

L'objectif de la collecte de ces données sur l'environnement est double:

- fournir une référence pour observer et mesurer les changements climatiques et leurs effets sur la planète;
- fournir des données scientifiquement fiables qui seront utilisées pour l'établissement de modèles climatiques.

Il est fondamental de mieux comprendre le système terrestre (conditions météorologiques, climat, océans, terres, géologie, ressources naturelles, écosystèmes et dangers naturels et d'origine anthropique) pour améliorer la prévision des changements attendus à l'échelle mondiale et l'adaptation à leurs répercussions sur la civilisation, et en atténuer les effets.

La science du climat a fait des progrès spectaculaires grâce aux observations fournies par les satellites. Le radiomètre lancé avec Explorer 7 de 1959 à 1961 a permis de mesurer directement l'énergie absorbée et dégagée par la Terre. Cette mission et celles qui ont suivi ont permis aux scientifiques de mesurer l'équilibre énergétique de la Terre avec beaucoup plus de confiance que dans les estimations indirectes précédentes, et donc d'améliorer les modèles climatiques. Au fur et à mesure que les radiomètres se sont perfectionnés, on a pu atteindre, pour ces mesures, la précision, la résolution spatiale et la couverture mondiale nécessaires pour observer directement les perturbations du bilan énergétique mondial global de la Terre causées par des phénomènes à court terme, par exemple des éruptions volcaniques majeures ou le phénomène El Niño-oscillation australe (ENSO). Ces radiomètres mesurent directement l'échange de chaleur entre l'Équateur et les pôles, l'incidence des gaz présents à l'état de traces dans l'atmosphère sur l'effet de serre et l'influence des nuages sur le bilan énergétique de la Terre. Ces observations ont fait progresser notre compréhension du système climatique et ont amélioré les modèles climatiques.

Les satellites spécialisés dans l'étude de l'atmosphère (par exemple, AURA) et les équipements de météorologie opérationnels d'appui (par exemple, la série européenne Metop et la série NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) de satellites en orbite polaire) fournissent

chaque jour des profils mondiaux en trois dimensions de la température et de l'humidité de l'atmosphère ainsi que des données sur des constituants mineurs de l'atmosphère, comme l'ozone. Ces données sont introduites dans les modèles de prévisions météorologiques et servent aussi à définir l'état de l'atmosphère à un moment donné et à tester sur le court terme les modèles climatiques.

D'autres caractéristiques de la Terre sont surveillées par des engins spatiaux qui ne participent pas à des missions sur l'atmosphère. A titre d'exemple, les observations suivantes sont effectuées:

- La surface de la Terre est surveillée en continu depuis plusieurs décennies par les satellites des séries Landsat (depuis 1973) et SPOT (depuis 1986).
- La concentration des glaces de mer est surveillée en continu depuis 1978 par les satellites des séries Nimbus-7, puis DMSP.
- Les vents à la surface de la mer et de l'océan sont surveillés de façon intermittente depuis 1996 par les satellites ADEOS-1 et -2 et QuickSCAT, au moyen de l'instrument RapidSCAT à bord de la SSI, puis ces dernières années par l'instrument OSCAT, à bord du satellite OceanSat-2, l'instrument KU-RFSCAT à bord du satellite HY-2A, et l'instrument ASCAT à bord du satellite Metop.
- La hauteur et la température à la surface de la mer et de l'océan sont surveillées en continu depuis 1992 par les satellites de la série TOPEX/Poseidon et Jason.
- L'humidité du sol et la salinité de l'océan sont surveillées depuis 2009 par les satellites SMOS, Aquarius et SMAP.

D'autres engins spatiaux comme les radars à synthèse d'ouverture ou les capteurs passifs hyperfréquences d'observation enrichissent les moyens dont nous disposons pour décrire notre planète, en particulier pour observer les régions polaires lorsque la nuit polaire en hiver empêche la prise de toute image par des moyens optiques ainsi que les endroits où une couverture nuageuse persistante obscurcit la surface de la Terre (par exemple au-dessus de l'Amazone, de l'Afrique centrale et des Etats insulaires).

L'augmentation du niveau de la mer devrait entraîner les premières répercussions graves des changements climatiques sur la société. On a attribué ce phénomène à l'augmentation de la température des océans et à l'arrivée d'eau supplémentaire due à la fonte des glaciers. Si tous les glaciers du Groenland venaient à fondre, le niveau de la mer augmenterait d'environ 7 mètres; si tous les glaciers de l'Antarctique venaient à fondre, le niveau de la mer augmenterait d'environ 70 mètres. Près de 40% de la population de la Terre vit à moins de 100 km d'un littoral maritime et pourrait être victime d'inondations sur le long terme (siècles ou millénaires). Huit des dix plus grandes villes du monde sont situées en bord de mer. Ces villes ainsi que toutes les zones côtières peu élevées seraient gravement touchées si le niveau de la mer augmentait ne serait-ce que de quelques mètres. On estime qu'une telle augmentation devrait se produire dans le siècle ou les deux siècles à venir. La température des océans tout comme la masse glaciaire, qui sont des facteurs de l'augmentation du niveau de la mer, sont mesurés à l'aide d'instruments satellitaires.

2 La glace ou la cryosphère

L'un des principaux objectifs de la recherche sur les changements climatiques et la cryosphère (région des glaces) est de savoir comment le réchauffement climatique affectera les nappes glaciaires. La question est de première importance car la quantité de glaces continentales et d'eau de fonte qui arrive dans les océans contribue fortement à la variation du niveau des mers et des océans. Avant l'arrivée des satellites, les seules données concernant les pôles étaient celles que l'on avait recueillies au niveau local, lorsque les saisons le permettaient. Les satellites ont été particulièrement utiles dans les régions polaires étant donné que les périodes d'obscurité longues en hiver dans ces régions excluent toute observation dans le spectre visible. La vue synoptique qu'offrent les satellites, en particulier ceux

équipés de capteurs radio, a considérablement élargi la couverture des pôles, de plusieurs ordres de grandeur, et l'accès aux régions polaires n'est plus limité par les saisons.

Avant les satellites, on supposait que le bilan massique des nappes glaciaires de l'Antarctique et du Groenland était régi par la différence entre les taux de fonte et d'accumulation des glaces, la vitesse de déversement des glaces dans l'océan étant supposée constante. Les images radar satellitaires fournies par RADARSAT ont montré que:

- 1 la vitesse du flux des nappes glaciaires est extrêmement variable;
- 2 les réseaux de flux glaciaires sont complexes;
- 3 la vitesse du flux des nappes glaciaires vers la mer a augmenté de façon mesurable sous l'effet des changements climatiques.

Une indication du changement climatique/du réchauffement de la planète est le retrait plutôt que l'avancée des flux des nappes glaciaires (à la fois les glaciers et les glaces de mer). L'étude du régime des glaciers dans le monde fait apparaître une déperdition considérable depuis la fin des années 70, avec une accélération marquée à la fin des années 80. La télédétection est utilisée pour suivre l'évolution de l'étendue des glaciers (taille du glacier) et la position de la ligne d'équilibre (l'altitude du glacier à laquelle l'accumulation de la neige en hiver est compensée par la fonte des glaces en été). Depuis 1972, les satellites fournissent une image optique de l'étendue des glaciers. Les radars à synthèse d'ouverture sont aujourd'hui utilisés pour étudier les zones d'accumulation des neiges glaciaires et de fonte des glaces afin de déterminer le forçage climatique et l'altimétrie laser est utilisée également pour mesurer les variations dans l'altitude des glaciers.

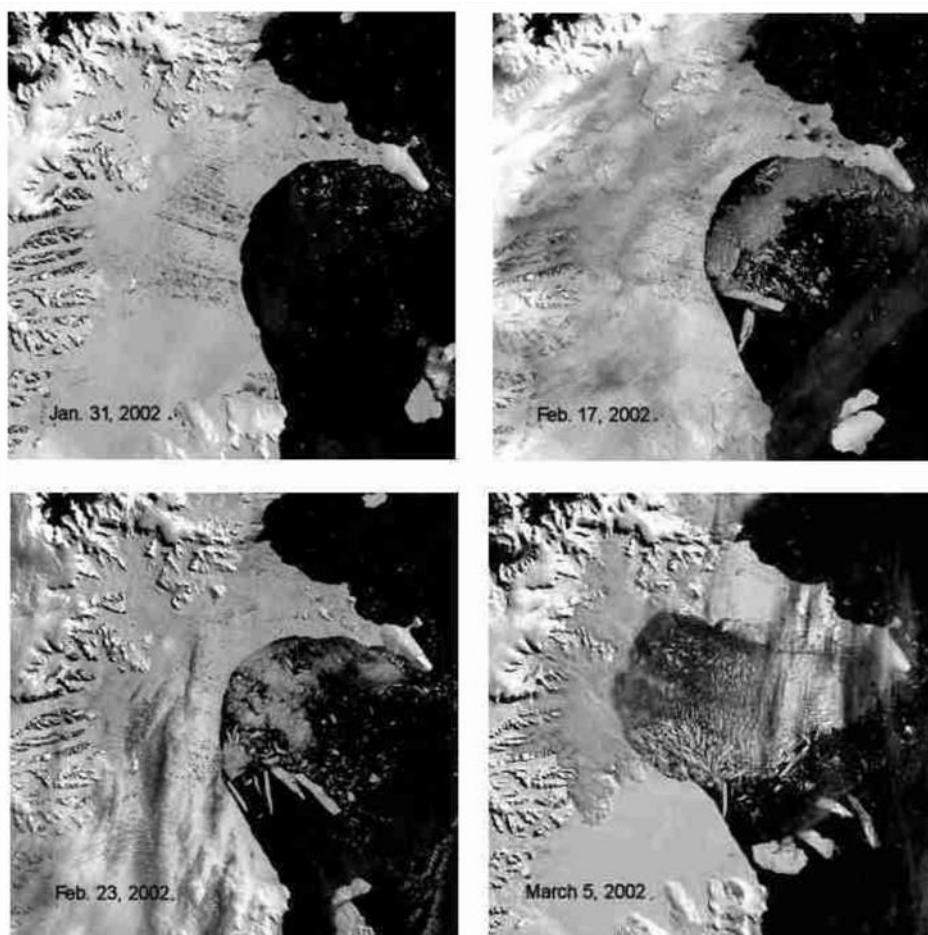
Etant donné que les glaciers sont sensibles aux changements climatiques passés et actuels, on recense actuellement tous les glaciers dans le monde pour suivre l'évolution de leur superficie et le rythme de cette évolution. Les mesures à l'échelle mondiale des glaces terrestres (projet Space) utilisent des données d'ASTER et du Landsat Enhanced Thematic Mapper et l'inventaire porte sur environ 160 000 glaciers dans le monde. Ces mesures et les analyses de tendance associées sont des indicateurs importants des changements climatiques et montrent par exemple tout l'intérêt et l'importance de séries de données sur le long terme pour la compréhension du système climatique qui est complexe.

Les nappes glaciaires peuvent être facilement surveillées par des instruments actifs ou passifs embarqués à bord de satellites. Les ruptures des grandes nappes glaciaires (par exemple la plate-forme de glace Larsen B) dans l'Antarctique ont été observées depuis l'espace. Même si elles ne sont pas attribuées au réchauffement climatique, ces ruptures ont été accélérées par ce phénomène. L'effondrement de la plate-forme de glace Larsen B dans l'Antarctique en 2002, que seules les images satellitaires fréquentes de la région ont permis de découvrir, ont illustré de façon spectaculaire la dynamique des nappes glaciaires sur des échelles de temps étonnamment courtes (Fig. 1). Ces révélations ont des incidences considérables: le transfert rapide de la glace depuis les nappes glaciaires continentales jusqu'à la mer pourrait conduire à une élévation importante du niveau de la mer.

On peut également surveiller les grandes fissures des plates-formes de glace en Antarctique depuis l'espace. Les observations régulières réalisées en été en combinant les images optiques fournies par Copernicus Sentinel-2 et les produits du radar Sentinel-1 ont montré leur importance dans le suivi des changements environnementaux rapides et dans la fourniture d'informations cruciales pour la prise de décisions éclairées en matière de sûreté et de sécurité en Antarctique.

FIGURE 1

**Effondrement de la plate-forme de glace Larsen B dans l'Antarctique ouest.
2 000 km² de glace continentale désintégrés en l'espace de deux jours
laissant de nombreux petits fragments de glace**



RS.1883-01

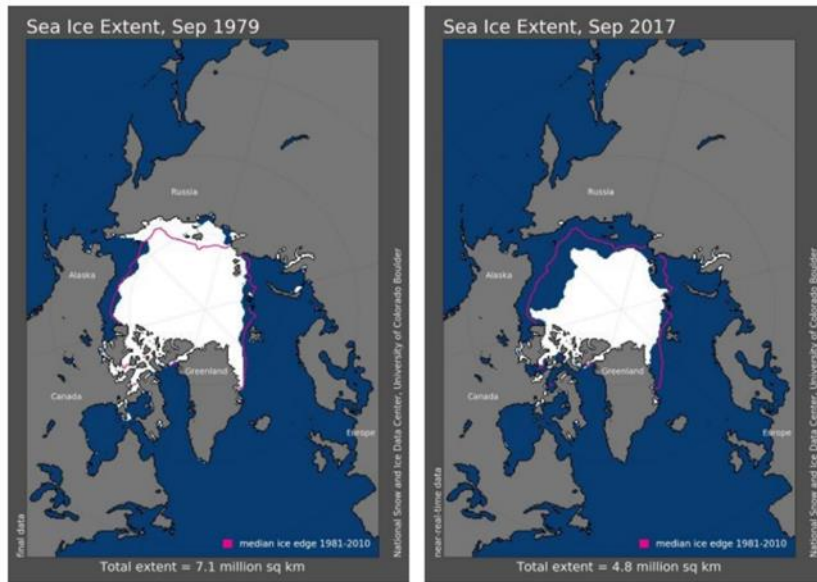
La glace de mer est constituée d'eau océanique gelée; elle se situe sur les côtes ou sur le fond marin (banquise côtière) ou flotte à la surface (glaces flottantes) ou forme une masse compacte (banquise). Les zones de banquise les plus importantes sont les banquises polaires. Compte tenu des quantités importantes d'eau qui arrivent dans les océans et l'atmosphère ou en sortent, le comportement des banquises polaires a une incidence considérable sur les changements climatiques à l'échelle mondiale.

Des capteurs passifs hyperfréquences permettent de suivre en permanence depuis 1979 l'évolution des glaces de mer (radiomètre hyperfréquences à balayage électrique (ESMR), radiomètre hyperfréquences multicanal à balayage (SMMR), capteur hyperfréquences spécial/imageur (SSM/I), et radiomètre avancé à balayage hyperfréquences – système d'observation de la Terre (AMSR-E). Non limités par les conditions météorologiques ou les niveaux de lumière, ces capteurs conviennent parfaitement pour suivre l'évolution des glaces de mer en raison du fort contraste au niveau de l'émission hyperfréquences selon que l'océan est ou non recouvert par les glaces. Les données recueillies sur 35 années à l'aide de ces capteurs hyperfréquences passifs ont permis de faire une analyse des tendances qui va au-delà des fortes variations que l'on observe d'une année à l'autre en ce qui concerne les glaces de mer. Depuis l'an 2000, les minima de glace d'été dans l'Arctique ont été relevés pendant quatre des six dernières années (voir la Fig. 2). Par ailleurs, les indications les plus récentes montrent que les glaces d'hiver elles aussi commencent aujourd'hui à reculer à un rythme plus rapide, peut-être sous l'effet du réchauffement de l'océan qui fait que les glaces sont plus fines et moins étendues, comme le montre la Fig. 3. En février, on observe une décroissance linéaire de

46 900 kilomètres carrés par an, soit 3 pour cent par décennie. La fonte et le gel des glaces (glaces de mer et de glaciers) ont également une incidence sur la salinité des océans, de sorte que s'établit un lien entre la salinité de surface des océans et l'évolution du niveau de la mer à l'échelle régionale. Le retrait des glaces de l'Arctique que l'on observe vient confirmer les prévisions des modèles climatiques, à savoir un réchauffement accru aux latitudes élevées, prévisions qui à leur tour sont largement déterminées par les données sur l'albédo de la glace marine. Contrairement à l'Arctique, aucune tendance claire ne se dégage en ce qui concerne la superficie des glaces de mer dans l'Antarctique.

FIGURE 2

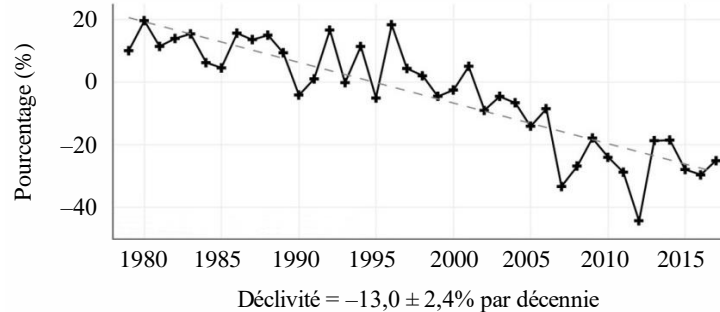
Etendue des glaces de mer dans l'Arctique en septembre 1979 et 2017
 La ligne magenta montre l'étendue médiane des glaces de mer au mois de septembre de 1981 à 2010



RS.1883-02

FIGURE 3

Evolution de l'étendue des glaces de mer en septembre, de 1979 à 2017



RS.1883-03

Au cours des quelques dernières années, le nombre de rapports fournissant des prévisions sur l'état des glaces de mer n'a cessé d'augmenter et ces rapports sont basés pour la totalité ou la plus grande partie d'entre eux sur des données satellitaires. Par exemple, le projet Acia 2005 (évaluation de l'impact du climat dans l'Arctique) a permis de conclure que si l'étendue des glaces de mer continuait de diminuer dans l'Arctique, ce dernier pourrait être libre de glaces pendant certaines période de l'année et le trafic maritime augmenterait dans cette région car les voies de navigation traversant

l'océan Arctique sont beaucoup plus courtes que celles passant par le canal de Panama ou le canal de Suez. Toutefois, certains éléments permettent de penser qu'une réduction de la couche de glace s'accompagnera d'une plus grande variabilité d'une année à une autre, du moins dans certaines régions.

Il est important de comprendre l'évolution des nappes glaciaires, des glaces de mer, des calottes glaciaires et des glaciers pour comprendre les changements climatiques à l'échelle mondiale et prévoir leurs effets. En particulier, la diminution de l'étendue des nappes glaciaires et leur contribution à l'élévation du niveau moyen de la mer a été qualifiée de troisième événement le plus important en 2006 selon la revue scientifique *Science*. Compte tenu des changements climatiques prévus et de l'élévation du niveau de la mer qui en résulte, le fait de pouvoir dans l'avenir assurer la couverture des pôles par satellite permettra de répondre à des besoins cruciaux de la société qui ne peuvent être satisfaits à l'aide d'autres systèmes d'observation.

3 Les océans

Les océans couvrent près de 71% de la surface du globe et jouent un rôle de première importance dans le système climatique, à divers égards. Ils sont également un excellent indicateur des changements climatiques. Par exemple, les mesures du niveau de la mer donnent des indices précieux sur le réchauffement climatique.

Les changements climatiques, météorologiques et environnementaux posent de sérieux problèmes à l'humanité. Pour les résoudre il faut encore améliorer les prévisions météo, en particulier celles sur le moyen et le long terme. Si les personnes et les entreprises ont une idée claire de ce qui va se produire dans les 10 prochains jours, les prochains mois ou même la saison à venir, elles pourront beaucoup mieux se préparer à l'instabilité des conditions météorologiques. Pour relever ces défis, il faut aussi mieux comprendre les facteurs climatiques mondiaux qui sont à l'origine de ces phénomènes, par exemple El Niño et La Niña dans l'océan Pacifique, les ouragans et les typhons dangereux, et en particulier l'élévation du niveau de la mer.

Pour comprendre comment évoluent les situations climatiques, il est essentiel de cartographier les variations de l'état de la surface de l'océan à l'échelle mondiale et d'utiliser les données ainsi recueillies pour élaborer et exploiter des modèles puissants de comportement de l'océan. En combinant les modèles océaniques et les modèles atmosphériques, nous pourrions fournir les prévisions précises dont nous avons besoin à court terme et à long terme. Il est nécessaire de coupler ces modèles pour tenir pleinement compte de la dynamique à méso-échelle (distance moyenne) de l'océan. Ce couplage des modèles océaniques et des modèles atmosphériques devient important pour les prévisions météorologiques au-delà de deux semaines. L'océan joue également un rôle important dans le processus du changement climatique et il est largement admis qu'une élévation du niveau de la mer à l'échelle mondiale peut être l'une des conséquences les plus graves du réchauffement climatique.

3.1 Température de la mer en surface et élévation du niveau moyen de la mer

Les relevés sur le long terme de la température de la mer en surface réalisés à l'aide du radiomètre à très haute résolution (AVHRR) lancé avec la série de satellites d'observation télévisuelle dans le domaine de l'infrarouge (TIROS-N) et la série des satellites NOAA constituent une contribution importante à la science du climat. La température de la mer en surface est l'un des indicateurs les plus importants des changements climatiques à l'échelle mondiale et un paramètre essentiel pour la modélisation du climat. Étant donné que ce sont les relevés océanographiques par télédétection les plus anciens, ils ont un poids considérable.

Les relevés de la température de la mer en surface ont montré le rôle que joue l'océan dans la variabilité du climat au niveau régional et mondial et ont révélé des détails importants sur les courants océaniques. Plus de 80% de la quantité totale de chaleur dégagée par le système terrestre est stockée dans les océans et les courants océaniques la redistribuent à travers le globe. Une analyse des

tendances des relevés de la température de la mer en surface nous a permis de mieux comprendre les importantes rétroactions entre le climat et l'atmosphère dans les tropiques qui sont également responsables des phénomènes El Niño-oscillation australe (ENSO) dans l'océan Pacifique. Les progrès dans la compréhension du phénomène ENSO, grâce aux observations par satellite des vents à la surface de la mer, de la hauteur de la surface de la mer et de la température de la surface de la mer ont eu une profonde incidence sur les prévisions climatiques et météorologiques régionales. Par conséquent, les études utilisant les données recueillies par satellite ont permis d'améliorer les mesures de la température de la surface de la mer et de mieux comprendre les ouragans.

En outre, la température de la mer en surface est une donnée essentielle pour le couplage entre les océans et l'atmosphère et constitue un facteur de régulation des échanges de chaleur et de vapeur entre eux. Une analyse des tendances de la température de la mer en surface a fourni des preuves du réchauffement climatique mondial et des importantes rétroactions entre le climat et l'atmosphère dans les tropiques qui sont aussi responsables des phénomènes ENSO. Ces observations de la température de la mer en surface, combinées aux mesures de température verticales in situ de l'océan jusqu'à une profondeur de 3 000 m ont fourni des éléments permettant de mettre en évidence le réchauffement mondial d'origine anthropique dans l'océan.

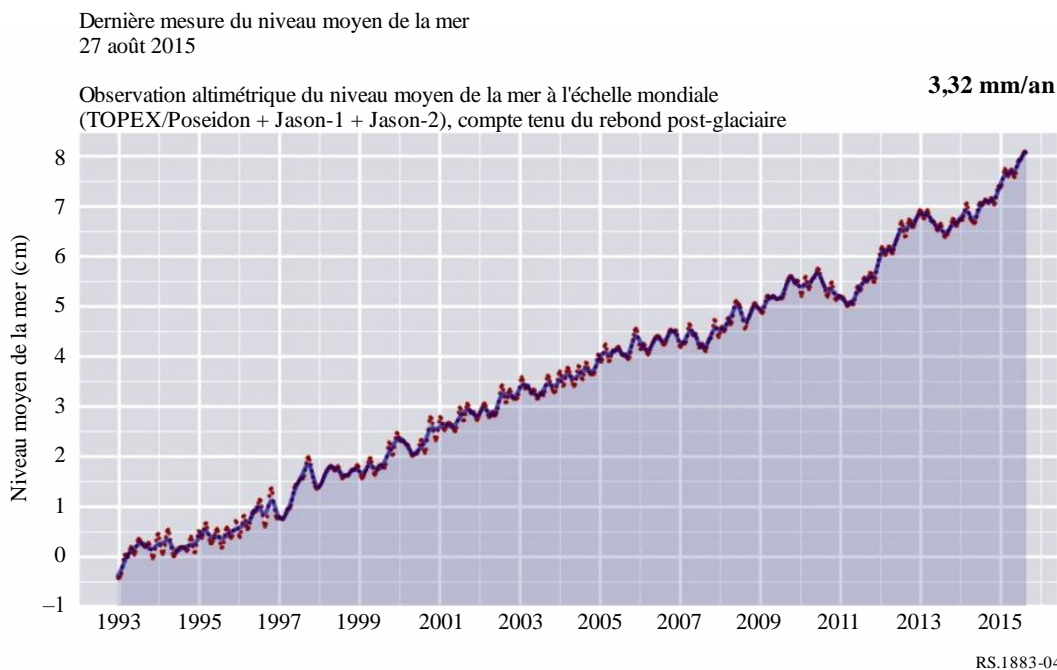
Le fait de comprendre l'élévation de la température de la mer en surface et l'apport thermique anthropique à la surface de l'océan a aussi des conséquences importantes pour quantifier et prévoir l'élévation du niveau de la mer. L'élévation du niveau moyen de la mer pourrait être un signe de réchauffement climatique. La surveillance de ce niveau est une application de l'altimétrie et l'une des principales questions des sciences de l'environnement du XXI^e siècle.

Il est assez difficile de dissocier la variabilité naturelle du climat des effets du réchauffement climatique. Depuis 15 ans, les mesures du niveau moyen de la mer se font à partir d'observations par satellite. Ces observations systématiques ont permis d'obtenir une série chronologique précise de données satellitaires, mais 15 ans c'est peu. En plus, il faut noter que les perturbations induites par l'homme s'ajoutent à la variabilité naturelle du climat. Par conséquent les signaux indiquant un changement climatique ne peuvent être détectés que s'ils sont supérieurs à la variabilité naturelle du climat. Il est plus difficile de détecter les changements climatiques à l'échelle mondiale que d'en surveiller les incidences au niveau régional.

L'élévation du niveau de la mer que l'on observe est due en partie à une augmentation de la température de l'eau. Les autres facteurs sont notamment la fonte des glaciers et les fluctuations du niveau des eaux continentales. La Figure 4 montre que l'élévation du niveau de la mer est d'environ 3,3 mm par an, soit environ 5 cm tous les 15 ans.

FIGURE 4

Elévation moyenne du niveau de la mer



Source: © CNES, LEGOS, CLS

Toutefois, l'élévation moyenne du niveau de la mer n'est qu'un aspect des choses. L'élévation du niveau des océans est loin d'être uniforme. Dans certaines régions océaniques, le niveau de la mer s'est élevé (jusqu'à 20 mm par an dans certains endroits), alors que dans d'autres régions il a baissé de la même quantité. Ces différences régionales observées par les satellites TOPEX/JASON depuis 1993 traduisent avant tout les fluctuations du niveau de la mer sur plusieurs années.

Du fait de l'élévation du niveau de la mer certaines régions côtières pourraient être inondées et certaines îles de faible altitude totalement submergées, ce qui constitue un grave sujet de préoccupation. Certes, ce phénomène ne nous menace pas avant un horizon relativement lointain (de l'ordre de quelques décennies, voire quelques siècles) mais les données topographiques fournies par les observations satellitaires (comme celle des radars à synthèse d'ouverture Shuttle Radar Topology Mission et TerraSAR-X ou les données optiques via ASTER) peuvent nous aider à identifier les zones vulnérables.

Les mesures de la température de la mer en surface ont non seulement apporté d'importantes informations sur les circulations océaniques (par exemple, le Gulf Stream), mais aussi fait avancer la recherche sur le climat en fournissant des informations détaillées sur l'apport de chaleur dans l'océan. Les observations de la couleur de l'océan et la température de la mer en surface ont permis de faire de nouvelles découvertes sur le couplage physique – biologie dans l'océan, avec des conséquences importantes pour le rôle que joue l'océan dans le cycle du carbone.

Les observations satellitaires sont le seul moyen d'évaluer et de surveiller le rôle que joue la bio masse des océans en tant que puits de carbone. En effet, seules les mesures par satellite permettront d'apporter une réponse à la question essentielle de savoir si la quantité de carbone biologique fixée évolue sous l'effet des changements climatiques. Il faut non seulement mesurer la couleur de l'océan (biomasse et productivité du phytoplancton) mais aussi procéder parallèlement à des observations depuis l'espace de l'environnement physique des océans (circulation et mélange océaniques), des échanges Terre-océan (à travers les rivières et les terres humides découvertes lors des marées) ainsi que d'autres facteurs comme les vents, les marées, et l'apport d'énergie solaire dans les couches supérieures de l'océan. L'observation des liens entre la physico-chimie et la biologie de l'océan est un succès important des observations depuis l'espace.

3.2 Humidité du sol et salinité de l'océan

L'évaporation, l'infiltration et le renouvellement des eaux souterraines se produisent généralement à travers la zone vadose ou zone non saturée qui s'étend depuis la surface jusqu'au niveau de la nappe phréatique. La zone racinaire de la végétation, dans laquelle la végétation capte l'eau, se situe dans la zone vadose et constitue l'interface entre la végétation et le système hydrologique. La quantité d'eau disponible dans la végétation régule la transpiration des plantes et la photosynthèse et, par voie de conséquence, le piégeage du carbone. La quantité d'eau dans la zone vadose est également directement liée à la capacité de drainage du sol après la pluie. Les systèmes SVAT (interaction sol – végétation – atmosphère) utilisés en météorologie et en hydrologie sont conçus pour décrire les processus d'évaporation de base à la surface et la répartition de l'eau entre transpiration de la végétation, drainage, ruissellement de surface et humidité du sol. Une première valeur réaliste de la quantité d'eau contenue dans la zone vadose doit être fournie aux modèles SVAT.

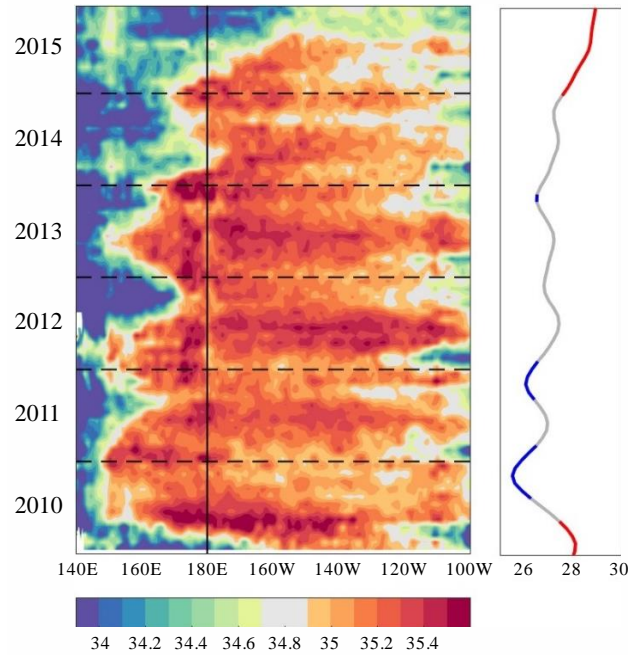
Dans le cas d'un sol nu ou d'une végétation très clairsemée, le taux d'évaporation et le ruissellement peuvent être calculés à partir de séries chronologiques sur l'humidité du sol en surface. Dans le cas de surfaces couvertes par la végétation, la quantité d'eau contenue dans la végétation (profondeur optique de la végétation) doit être prise en compte. Cette profondeur peut en soi être une donnée très utile pour suivre la dynamique de la végétation.

Il est essentiel de connaître la répartition du sel (salinité) dans l'océan à l'échelle mondiale ainsi que sa variabilité annuelle et d'une année sur l'autre pour comprendre le rôle de l'océan dans le système climatique. La salinité est cruciale pour déterminer la densité de l'océan et donc la circulation des sels en fonction de la température. La salinité de l'océan est aussi liée au cycle du carbone océanique étant donné qu'elle participe à l'établissement de l'équilibre chimique, lequel régule à son tour la fixation et l'émission du CO₂. Par conséquent, la prise en compte de la salinité à la surface de la mer dans les modèles biogéochimiques globaux des océans devrait améliorer les estimations de l'absorption du CO₂ par l'océan.

La salinité à la surface des océans varie selon les régions du monde et dépend de l'équilibre entre l'évaporation, les précipitations et le ruissellement des cours d'eau, ainsi que de la dynamique des océans. Lancé en 2009, le satellite SMOS a fourni les relevés continus les plus longs de mesures de la salinité à la surface de la mer depuis l'espace. Le satellite a recueilli des données relatives à la salinité à la surface de la mer au début de l'année 2010, alors qu'un épisode faible du phénomène El Niño était en retrait, lequel s'est transformé plus tard en La Niña, phénomène plus fort, qui a duré jusqu'en 2012. Des taux de salinité inférieurs à la normale ont été enregistrés début 2010 dans le Pacifique équatorial alors que le bassin d'eau douce («fresh pool») du Pacifique Ouest s'étendait vers l'Est. Le bassin est revenu vers l'Ouest lorsque le phénomène La Niña s'est produit. Le satellite SMOS a récemment observé une augmentation des volumes d'eau douce dans l'océan Pacifique tropical, pendant l'épisode El Niño de 2016 (voir la Fig. 5).

FIGURE 5

Salinité à l'équateur: salinité moyenne à la surface observée par le satellite SMOS autour de l'équateur (2°S-2°N) de 2010 à 2015. Le bassin d'eau douce (en bleu et vert) de l'océan Pacifique équatorial s'étend vers l'Est pendant les épisodes El Niño (début 2010 et 2015) et revient vers l'Ouest pendant les épisodes La Niña (fin 2010 et 2011). A droite: l'«indice El Niño 3.4» (fondé sur des observations de la température à la surface de la mer) montre les épisodes El Niño en rouge et les épisodes La Niña, en bleu



RS.1883-05

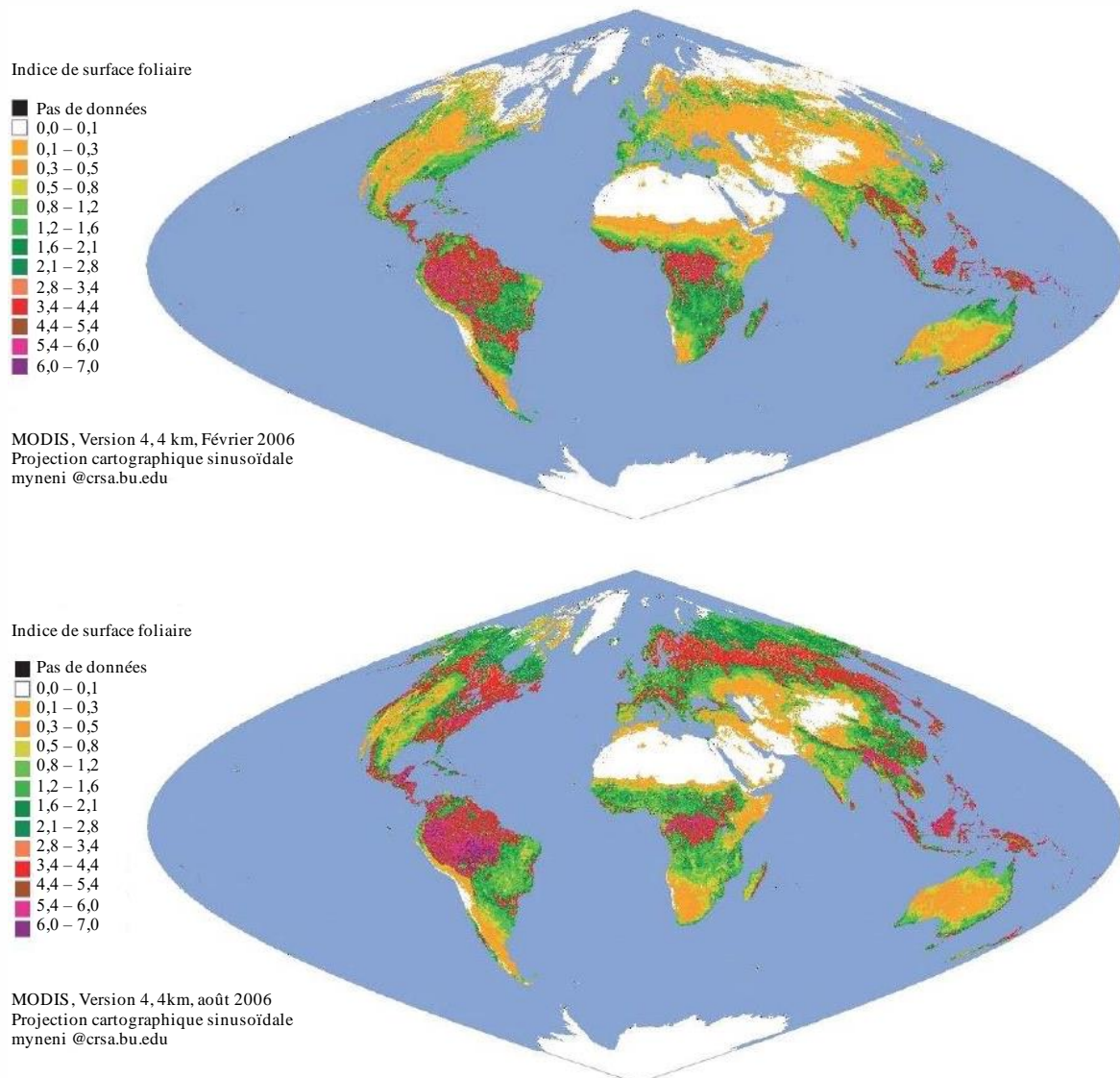
La mission du satellite SMOS est de surveiller l'humidité du sol (mission SMAP) ainsi que la salinité de l'océan (mission Aquarius).

4 La biosphère

La surveillance par satellite de la dynamique de la végétation terrestre est capitale pour comprendre le fonctionnement de l'écosystème dans sa globalité et son comportement face à la variabilité du climat et aux changements climatiques. Grâce aux instruments MODIS embarqués à bord des satellites TERRA et AQUA ainsi qu'à l'instrument VIIRS à bord du satellite SUOMI NPP, ces observations (Fig. 6) sont devenues plus précises car elles ont été étendues à des mesures biophysiques.

FIGURE 6

Indices de feuilles vertes fournis par MODIS montrant les variations saisonnières de la végétation



RS 1883-1

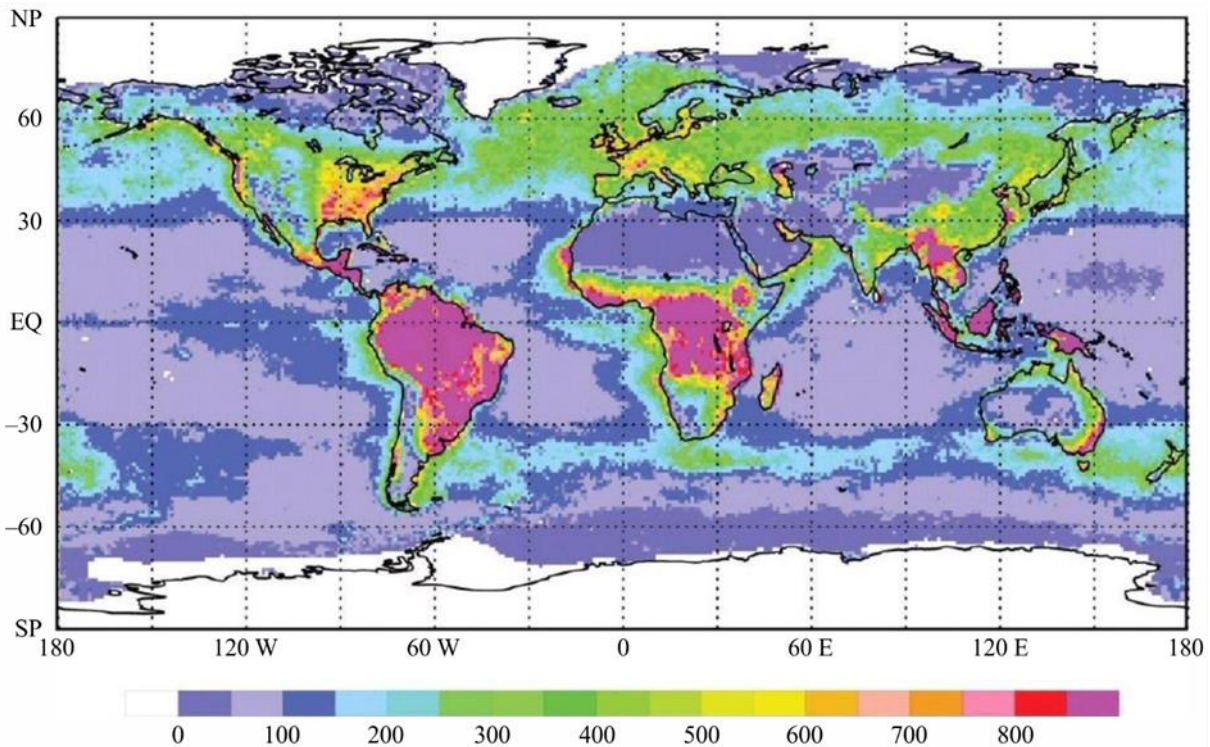
Source: *Earth Observations from Space: the First 50 Years of Scientific Achievements*, p. 75, 2008, disponible à l'adresse URL: <http://www.nap.edu/catalog/11991.html>.

Les études sur les changements climatiques ont aussi été facilitées par les recherches sur le cycle du carbone terrestre et les fluctuations énergétiques réalisées à l'aide de satellites.

La productivité primaire nette (NPP) est définie comme étant le flux net de carbone circulant de l'atmosphère vers les plantes vertes par unité de temps. Les observations satellitaires de la NPP sont une contribution très précieuse à la compréhension de l'incidence des changements climatiques sur la biosphère. La NPP est influencée par le climat et les facteurs biotiques qui interagissent entre eux. Les contributions de la Terre et de l'océan à la NPP sont pratiquement égales (Fig. 7), mais la variabilité de la NPP au niveau local est frappante. Étant donné que les cycles de vie du phytoplancton sont de plusieurs ordres de grandeur plus courts (de l'ordre de quelques jours et non d'années ou de décennies) que ceux des plantes terrestres, le phytoplancton peut réagir aux influences du climat sur la circulation océanique, les phénomènes de mélange et l'apport de nutriments et de lumière beaucoup plus rapidement que les plantes et les écosystèmes terrestres. La composante océanique (environ la moitié) du cycle du carbone devrait donc être plus sensible aux changements climatiques.

FIGURE 7

NPP annuelle mondiale (en grammes de carbone/m²/année) pour la biosphère, calculée à partir du modèle intégré, CASA-VGPM (modèle de production à généralisation verticale). Les données d'entrée pour la couleur de l'océan fournies par le capteur CZCS sont des moyennes de 1978 à 1983. L'indice de végétation terrestre fourni par les capteurs AVHRR est la moyenne entre 1982 et 1990.



RS.1883-07

Lancé en 1978, le Coastal Zone Colour Scanner a montré qu'il est possible d'observer la productivité de l'océan en utilisant les bandes du visible et de l'infrarouge; toutefois, les mesures CZCS sur terre ont été saturées et donc inutilisables.

Le radiomètre AVHRR embarqué à bord des satellites météorologiques en orbite polaire de la National Oceanic and Atmospheric Administration's (NOAA) enregistre en continu les données des observations mondiales quotidiennes acquises depuis 1978 dans les bandes du rouge et de l'infrarouge proche. Les séries de données quotidiennes AVHRR couvrent aujourd'hui plus de 25 ans et constituent les relevés mondiaux continus les plus longs disponibles sur la productivité terrestre, la phénologie (étude des événements périodiques du cycle de vie des plantes et des animaux et de la façon dont ces événements sont influencés par les variations climatiques saisonnières et interannuelles) et le changement des écosystèmes afin de suivre les réactions de la biosphère aux changements climatiques et à la variabilité du climat.

Même s'il n'a pas été conçu pour la surveillance du climat, le radiomètre AVHRR, grâce aux améliorations constantes de l'étalonnage et à de nouvelles analyses, a fourni des relevés homogènes qui ont permis de suivre et d'évaluer les réactions passées et futures de la biosphère aux changements climatiques résultant de la variabilité du climat ainsi que des activités anthropiques.

L'incidence des changements climatiques sur l'agriculture est une préoccupation majeure. Avec le réchauffement climatique, la période de croissance s'allonge et les régions septentrionales deviennent plus productives tandis que les régions australes qui doivent faire face à une chaleur extrême deviennent moins productives. La productivité agricole est suivie depuis l'espace depuis des décennies. L'indice différentiel de végétation normalisé (NDVI) est compris entre -1 et +1, et sa valeur se situe autour de 1 lorsque la végétation est verte. Techniquement, l'indice NDVI correspond

à la différence entre les données dans l'infrarouge proche et les données dans le rouge (visible) divisé par la somme des deux.

Au cours de la décennie passée, les données NDVI fournies par le radiomètre AVHRR sont devenues une composante essentielle, qu'il s'agisse de la surveillance des changements climatiques, de l'évaluation de l'évolution de la durée et du moment de la période de croissance ou de la surveillance de l'état de la biosphère et de phénomènes d'autres écosystèmes. Les relevés sur le long terme de l'indice NDVI ont montré que cet indice a augmenté sous l'effet du réchauffement climatique entre les années 80 et le début des années 90 mais cette tendance s'est stabilisée récemment. Les variations de l'indice NDVI planétaire (verdure) étaient fortement corrélées à la dynamique quotidienne des rayonnements terrestres actifs pour la photosynthèse et des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère. Il y a une forte corrélation négative entre l'indice NDVI et la quantité de CO₂ dans l'atmosphère: cet indice est élevé lorsque les concentrations de CO₂ sont basses et vice versa. Ce modèle temporel de photosynthèse et de respiration de l'écosystème montre le couplage dynamique entre la biosphère et l'atmosphère.

La fréquence de répétitivité élevée des satellites Sentinel-2 facilite les tentatives visant à limiter la déforestation en permettant la génération de données d'imagerie sans nuages. Cela sera particulièrement utile aux latitudes tropicales, où l'épaisse couverture nuageuse peut retarder l'obtention d'un catalogue complet de données. Les données haute résolution peuvent aider à détecter l'évolution des épisodes d'inondation dans les pays touchés.

5 Changements climatiques et intervention humaine au niveau régional

Les changements climatiques ne se produisent pas de façon homogène, c'est-à-dire que le globe terrestre, en tant que tel, ne se réchauffe pas uniformément; ces changements ont généralement lieu à échelle régionale: certaines régions se réchauffent plus que d'autres et certaines semblent plutôt se refroidir sur le court terme.

L'augmentation de la population humaine met à rude épreuve l'environnement de la Terre. Nombre des actions menées au service des activités humaines ont une incidence sur le climat, tant au niveau local que mondial, qui peut être observée au moyen d'instruments satellitaires.

On peut citer en exemple la rivière Amou-Daria, qui a été détournée dans les années 1960 pour irriguer des champs de coton et de blé. Plusieurs décennies plus tard, la mer d'Aral, qui était auparavant le quatrième lac le plus grand au monde, avec une superficie de 68 000 km², s'est asséché dans sa quasi-totalité (voir la Fig. 8). L'industrie locale de la pêche, qui avait fourni un sixième du volume de poissons à l'Union soviétique, s'est effondrée. Le littoral ayant reculé de plusieurs kilomètres à distance des villes, les habitants restants ont été victimes de tempêtes de poussières toxiques. Le rétrécissement de la mer d'Aral a été désigné comme l'une des pires catastrophes écologiques de la planète.

FIGURE 8
Zone historique de la mer d'Aral



1977 (Landsat-2)

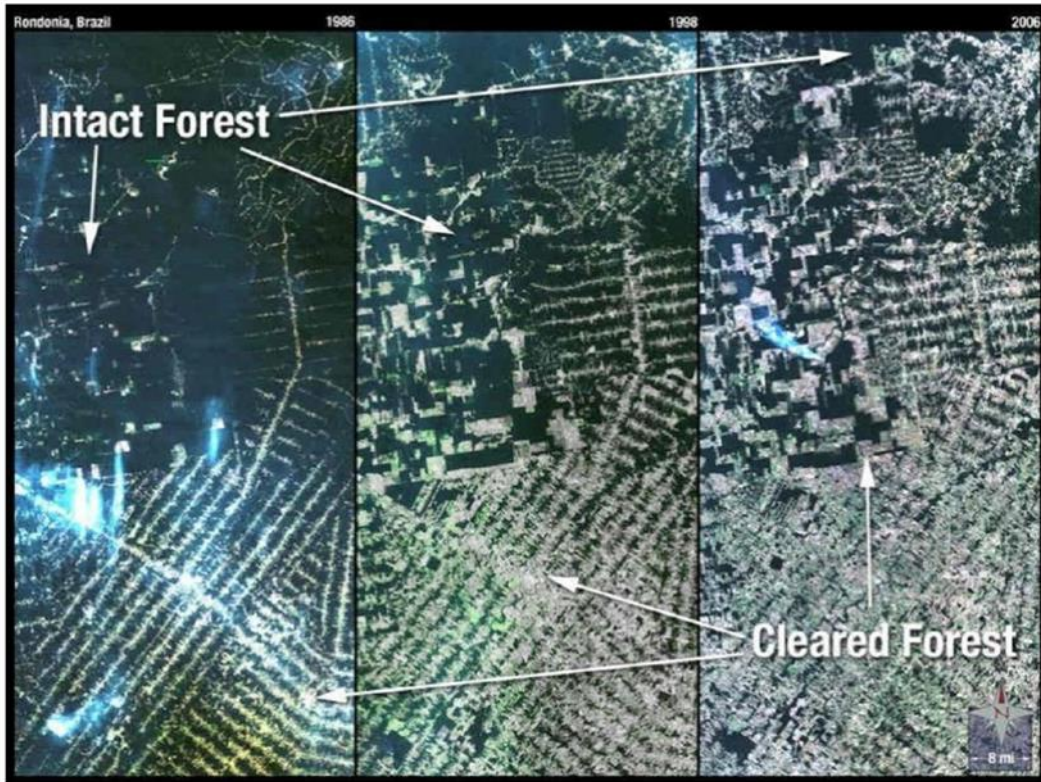


2014 (MODIS à bord de TERRA)

RS.1883-C

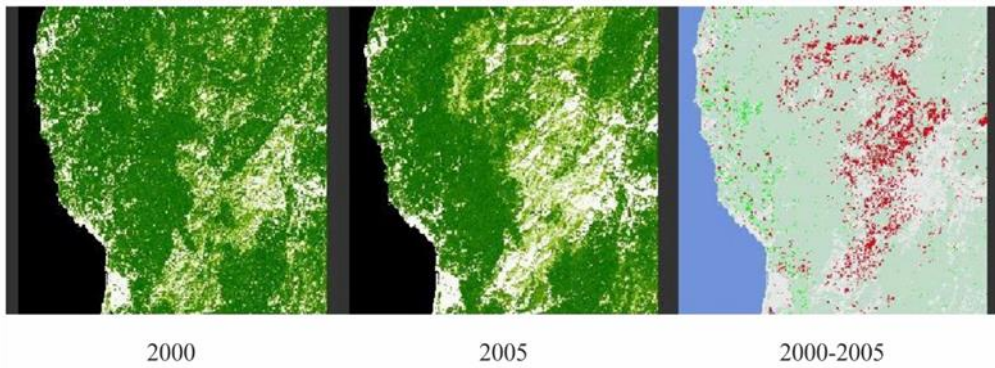
Les forêts agissent comme des filtres à air en piégeant le dioxyde de carbone présent dans l'air, pour ensuite restituer de l'oxygène et de l'eau. Les satellites peuvent surveiller l'état et l'étendue des forêts. Une cartographie des zones déboisées (voir la Fig. 9) ainsi que des zones reboisées (voir la Fig. 10) a été établie. Ces deux clichés ont été produits à partir des données fournies par le satellite Landsat. Les changements à long terme qui toucheront l'ensemble de la couverture forestière auront des répercussions sur le climat et devraient faire l'objet d'un suivi.

FIGURE 9
Déforestation en Amazonie



RS.1883-09

FIGURE 10
Déforestation et reboisement dans l'Oregon (Nord-Ouest des Etats-Unis),
couverture forestière observée par Landsat



RS.1883-10

L'avancée des déserts sur les terres agricoles n'a pas uniquement des conséquences sur l'approvisionnement en nourriture et la disponibilité de terres pour l'habitat humain, mais va également de pair avec la modification de l'albédo de la Terre, étant donné que le manque de couverture végétale influe sur le climat de la Terre. Le pâturage du bétail peut avoir des conséquences graves sur les environnements mis à rude épreuve, notamment les déserts. Les chèvres peuvent venir à bout de la vie végétale déjà fragile dans le désert, mais le simple fait d'employer des clôtures pour garder ces animaux en dehors de la zone clôturée peut rétablir l'équilibre de l'environnement (voir la Fig. 11).

FIGURE 11

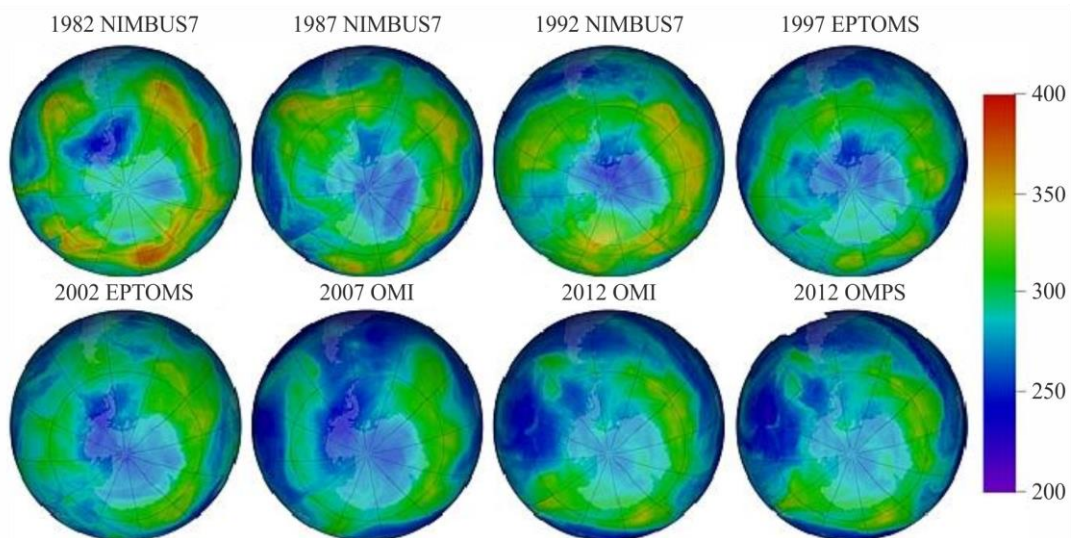
Restauration du Parc national Sidi Toui (Tunisie)

RS.1883-11

En 1987, la sécheresse, l'agriculture et l'élevage intensif avaient entraîné la désertification de la zone. En 1993, la Tunisie a créé le Parc national Sidi Toui, qu'elle a entièrement clôturé. En 1999, la prairie indigène était réapparue (image prise en hiver). La transformation des terres cultivables en désert n'est pas nécessairement un processus irréversible.

Les êtres humains ont également introduit des composants chimiques non naturels dans l'atmosphère. Au début des années 1980, on s'est rendu compte que la couche d'ozone de l'atmosphère, qui nous protège des rayons ultra-violet du soleil, était en train de s'amincir et, notamment, qu'un «trou» s'était formé au-dessus du pôle Sud, lequel ne cesse de croître au fil des ans. Cette observation a été réalisée pour la première fois au moyen de données satellitaires, puis confirmée par des observations au sol. Il a été déterminé que la cause de ce phénomène était la destruction catalytique de l'ozone par les molécules atomiques des halogènes, principalement issues de la photodissociation des halocarbures produits et utilisés par l'homme pour la réfrigération, les solvants ainsi que les agents propulseurs et d'expansion de la mousse.

FIGURE 12

Répartition de l'ozone au-dessus du pôle Sud

RS.1883-12

A la Conférence de Plénipotentiaires sur le protocole à la Convention de Vienne pour la protection de la couche d'ozone relatif aux chlorofluorocarbones (Montréal, 1987), les participants ont signé un protocole visant à limiter la production et l'utilisation de ces produits chimiques. Depuis lors, on a constaté une lente régénération de la couche d'ozone. Les instruments satellitaires ont surveillé en continu l'état de l'atmosphère (voir la Fig. 12), ce qui a permis de mettre en évidence l'effet des mesures adoptées à Montréal et des protocoles ultérieurs (Londres, 1990 et Copenhague, 1992).

La répartition de la population a également une incidence sur le climat. En effet, désormais plus de la moitié de la population de la Terre vit dans des zones urbaines. Les premières informations concernant la distribution des êtres humains sur la Terre ont été déduites de l'observation nocturne des lumières visibles émanant des zones peuplées (voir la Fig. 13).

FIGURE 13

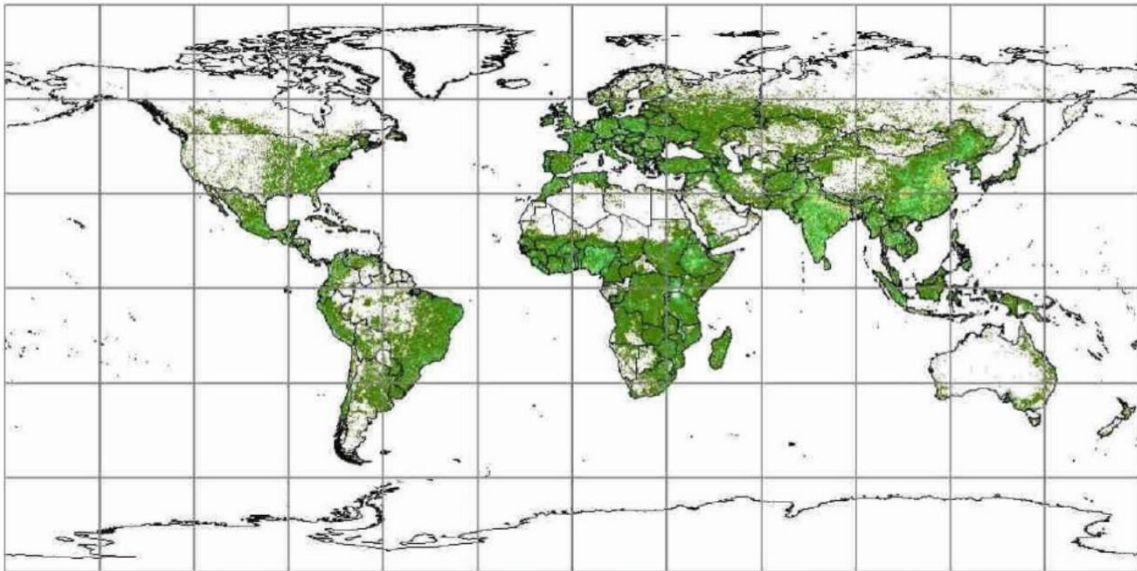
Observations nocturnes des lumières émanant des zones peuplées

RS.1883-13

(Données du satellite DMSP)

Cependant, on s'est rendu compte que ces observations entraînaient une sous-estimation de la population des pays en développement qui ne disposent pas d'éclairage public ou d'autres illuminations nocturnes propres aux pays développés. Un modèle de population élaboré par la suite prend en compte la proximité des routes, les pentes, la couverture terrestre et d'autres informations, en plus de l'observation nocturne des lumières. Les données relatives aux pentes, à la couverture terrestre et aux lumières nocturnes ont été recueillies par des satellites. Les résultats de ce modèle sont illustrés dans la Fig. 14 ci-dessous et représentent de façon plus fiable la population des pays en développement.

FIGURE 14

Répartition mondiale de la population

RS.1883-14

Les populations urbaines des littoraux sont plus susceptibles d'être touchées par l'augmentation du niveau de la mer. En outre, les populations urbaines nécessitent la concentration de davantage de ressources, telles que l'eau et la nourriture, et exerce une pression supplémentaire sur l'environnement local. Les îlots de chaleur propres aux grandes villes ont une incidence sur le climat local et régional, et auront certainement aussi des répercussions sur le climat mondial à long terme.

6 Conclusion

Les capteurs embarqués à bord de satellites ont fourni des données essentielles à notre compréhension de la planète et des effets des changements climatiques. Étant donné que ces instruments continuent de fournir des données de première importance, ils devraient être protégés dans l'avenir.

Annexe 2**Situation concernant les observations des principales variables climatiques et des principaux facteurs de forçage**

Le Tableau A2-1 établit une correspondance entre les mesures nécessaires – détaillées dans le Tableau A2-2 – et les technologies utilisées pour les réaliser. Les différentes mesures sont tirées du U.S. National Research Council's Report – Earth Science and Applications from Space, National Academies Press, Washington, DC, 2007 (Table 9.A.1, p. 298-303). Ce document est disponible à l'adresse: <http://www.nap.edu/catalog/11820.html>.

Le Tableau A2-2 énumère les aspects observés, en fonction de la technologie utilisée, et les missions disponibles pour effectuer ces mesures en 2016 (lorsque la présente annexe a été rédigée) et

ultérieurement. Ce tableau constitue une mise à jour des données fournies dans le Rapport susmentionné.

TABLEAU A2-1

Technologies utilisées pour obtenir des mesures relatives au climat

Objectif	Technologie	Imagerie SAR	Altimétrie radar	Diffusionnémie radar	Radar de mesure des précipitations/nuages	Occultation radio GPS	Imageurs hyperfréquences passifs	Sondeurs hyperfréquences passifs	LIDAR	Imagerie optique (UV-IR)	Imagerie optique multispect.	Sondeurs/spectromètres IR	Radiomètres optiques	Mesures au limbe	Mesures basées sur la gravité
Aérosols stratosphériques									X					X	
Aérosols troposphériques									X	X			X		
Profil température atmosph.						X		X							
Profil eau atmosphérique						X		X		X	X				
Total eau atmosphérique						X		X			X				
Propriétés des nuages					X		X		X	X			X		
Perturbations dues aux incendies										X					
Gaz, autres												X			
Gaz, ozone										X					
Gaz à l'état de traces contrôlant l'ozone								X				X			
Glaciers/glace de mer		X					X		X	X					X
Eaux souterraines							X								X
Niveau des lacs		X							X	X					
Biomasse terrestre										X					
Couvert terrestre		X								X					
Indice de surface foliaire										X					
Couleur de l'océan										X					
Niveau de l'océan (mer)		X	X												
Salinité de l'océan				X			X								
Hauteur de la surface de l'océan			X	X											X
Température à la surface de l'océan								X		X					
Vent océanique/état de la mer				X			X								
Permafrost, couverture neigeuse		X					X								
Précipitations					X		X								
Bilan du rayonnement										X					
Débit des rivières		X							X	X					
Elairement énergétique total du soleil													X		

TABLEAU A2-2

**Situation concernant les observations des changements climatiques
et de la variabilité du climat**

Technologie	Objectif	Mesure	Situation (en 2018)	Suivi (2018-2025)
Imagerie radar SAR	Permafrost, sol saisonnièrement gelé, couverture neigeuse (et équivalent en eau de neige)	Associée à des radiomètres hyperfréquences, permet d'obtenir des données combinées sur la zone, l'irrégularité et la topographie pour obtenir l'équivalent en eau de neige	SAR sur RADARSAT (1995, +), TSX (2007), TDX (2010), COSMO-SkyMeds (2007, +), C-SAR sur série Sentinel-1 (2014, +); HJ-1C (2012); COSI sur KOMPSAT-5 (2013); PALSAR-2 sur ALOS-2 (2014); RISAT-SAR sur RISAT-1 (2012); SAR-C sur RISAT-2 (2009); S-M OBRC sur METEOR-M2 (2014); SAR-10 sur Kondor-E1 (2013); X-SAR sur TECSAR (2008)	BRLK sur METEOR-MP (2021); S-SAR sur NovaSAR-S (2018); SAR-L sur SAOCOM-1,2 (2018); SAR-P sur BIOMASS (2020); SAR-X sur METEOR-MP (2021); SAR sur PAZ (2018), CSG (2018, +), constellation RADARSAT (2018, +), RISAT-1A (2019), TSX-NG (2018)
	Niveaux des lacs	Zone de lacs	SAR sur RADARSAT (1995, +), TSX (2007), TDX (2010), COSMO-SkyMeds (2007, +), C-SAR sur série Sentinel-1 -1B (2014, +); SIRAL sur CRYOSAT-2 (2010); SRAL sur série Sentinel-3 (2016, +)	Constellation RADARSAT (2019); InSAR sur NISAR (2021)
	Débits des rivières	Zones de lacs, de rivières		
	Couvert terrestre	Couvert terrestre par rétrodiffusion radar		
	Niveau de la mer	Etendue des zones côtières		
	Glaciers, glace de mer, calottes glaciaires	Zone de glace, flux des glaces, épaisseur de la glace de mer, à partir de la topographie		
Diffusiométrie radar	État de la mer, vent de surface	Vecteur de vent de surface	ASCAT sur MetOps (2006, +); SCAT sur HY-2A (2011); OSCAT sur OceanSat-2 (2009); DDMI sur CYGNSS (2016); OSCAR sur ScaSat-1 (2016)	OSCAT sur OceanSat-3 (2018) et SCA et METOP_SG-B (2020); SCAT et SWIM sur CFOSAT (2018); SCAT sur METEOR-MP, -M (2018); WindRAD sur FY-3 (2018)
	Salinité de la mer	Salinité à la surface, irrégularité de l'océan	KU-RFSCAT sur HY-2A (2011); MWRI sur HY-2A (2011)	
	Glace de mer	Type, étendue de la glace de mer		SCA sur METOP-SG-A (2022)
Radar de mesure des précipitations	Précipitations	Radar de mesure des précipitations: profil vertical de l'intensité de pluie	DPR sur GPM (2014)	
		Radar de mesure des nuages: intensité pour une bruine légère	CloudSat (2006)	

TABLEAU A2-2 (suite)

Technologie	Objectif	Mesure	Situation (en 2018)	Suivi (2018-2025)
Radar de mesure des nuages	Propriétés des nuages (emplacement, dimensions des gouttes, propriétés des cristaux de glace des nuages)	Radar de mesure des nuages: limites des nuages, répartition verticale de l'eau liquide, intensité de la bruine	CloudSat (2006)	
Altimétrie radar	Niveau de la mer	Hauteur du niveau de la mer, de l'océan	SSALT sur série JASON (2001, +); Altika-AMU sur SARAL (2013); RA sur HY-2A/(2011); SRAL sur série Sentinel-3 (2016, +); JASON-3 (2016)	KaRIN sur SWOT (2020); SRAL sur JASON-CS/ SENTINEL-6 (2018, +); SHIOSAI sur COMPIRA (2019)
	Surface de l'océan, courants sous la surface	Hauteur de la surface de l'océan à partir de laquelle sont calculés les courants	POSEIDON sur série JASON (2001, +); RA sur HY-2A (2011); SRAL sur série Sentinel-3 (2016, +)	SRAL sur JASON-CS/ SENTINEL-6 (2018, +); KaRIN sur SWOT (2020)
Occultation radio GPS	Température: profils verticaux	Profils de température atmosphérique avec une résolution verticale allant jusqu'à 0,5 km à proximité de la surface	CHAMP (2000), COSMIC/ FORMOSAT-2 (2006); KOMPSAT-5 (2013); FY-3 -C (2013); MetOp (2006, 2012); TDX (2010); TSX (2007); Megha-Tropiques (2011); OceanSat-2 (2009); DDMI sur CYGNSS (2016)	COSMIC-2/ FORMOSAT-7 (2018); FY-3D, -3F (2016-2020); JASON-CS/ SENTINEL-6 (2021); GRACE-FO (2018); METEOR-M-N3, METEOR-MP-N1, -N3 (2018); METOP-SG-A, -B (2022)
	Vapeur d'eau: quantité dans une colonne, profils verticaux	Profils de vapeur d'eau avec une résolution verticale allant jusqu'à 0,5 km à proximité de la surface		
LIDAR	Aérosols troposphériques: emplacement et propriétés	Profil vertical de la concentration en aérosols, dimensions et forme	CALIPSO (2006)	ATLID sur EarthCare (2019)
	Aérosols stratosphériques: emplacement et propriétés	Profil vertical de la concentration en aérosols, dimensions et forme		
	Propriétés des nuages (emplacement, dimensions des gouttes, propriétés des cristaux de glace des nuages)	Limite supérieure pour les nuages de faible profondeur optique avec polarisation, phase particulaire		
	Glaciers, glace de mer, calottes glaciaires	Altitude de la glace	GLAS sur ICESat (2003)	
	Niveaux des lacs	Altitude de la surface de l'eau		
Débit des rivières	Altimètre Lidar: niveaux des rivières	ICESat (2002)		

TABLEAU A2-2 (suite)

Technologie	Objectif	Mesure	Situation (en 2018)	Suivi (2018-2025)
Imageurs hyperfréquences passifs	Propriétés des précipitations et des nuages	Intensité de pluie et eau liquide dans les nuages	GMI sur GPM (2014); SSM/I sur série DMSP (1987, +), SSMIS sur série DMSP (2003, +); MWRI sur série FY-3 (2008, +); MWR sur série Sentinel-3 (2016, +)	SSM/IS sur DMSP (2020); MWI sur METOP-SG-A (2022); MWR sur Sentinel-3B (fin 2017)
	Glaciers, glace de mer, calottes glaciaires	Étendue des glaciers et de la glace de mer	SSM/I sur série DMSP (1987, +), SSMIS sur série DMSP (2003, +); AMSR-2 sur GCOM-W1 (2012); MWRI sur HY-2A (2011)	
	Masse de neige	Équivalent en eau de neige	SSM/I sur DMSP (1995, +); AMSR-2 sur GCOM-W1 (2012)	
	Eaux souterraines	Humidité du sol sauf pour les zones couvertes de neige ou de glace et les zones fortement boisées	MIRAS sur SMOS (2009); radiomètre sur SMAP (2015); SSM/I sur série DMSP (1987, +), SSMIS sur série DMSP (2003, +); MWRI sur série FY-3 (2008, +); VIIRS sur SNPP (2011) et NOAA-20 (2018)	
	Salinité de la mer	Salinité à la surface	Radiomètre SMAP sur SMAP (2015), MIRAS sur SMOS (2009);	
	Etat de la mer, vent de surface	Vitesse du vent de surface	SSM/I sur série DMSP (1987, +), SSMIS sur série DMSP (2003, +); Windsat sur Coriolus (2003), AMSR-2 sur GCOM-W1 (2012); MTVZA-GY sur série Meteor-M (2009, +) MWRI sur HY-2A (2011)	

TABLEAU A2-2 (suite)

Technologie	Objectif	Mesure	Situation (en 2018)	Suivi (2018-2025)
Sondeurs hyperfréquences passifs	Température: profils verticaux	Profil de température atmosphérique	MSU depuis 1979 actuellement sur série NOAA (2002, +); SSM/I sur DMSP (1995, +); AMSU sur Aqua (2002), MetOp (2006, +); DFMRM sur FAST-T; MTVZA-GY sur série Meteor-M (2009, +); MWTS sur série FY-3 (2003, +) CrIS, ATMS sur SNPP (2011) et NOAA-20 (2018)	MWS, MWI sur METOP-SG-A (2022); MTVZA-GY-MP sur METEOR-MP (2021)
	Propriétés de l'eau atmosphérique	Profils de la vapeur d'eau atmosphérique et quantités totales	SSM/I sur série DMSP (1995, +); ATMS sur SNPP (2011) et NOAA-20 (2018); Altika-RMU sur SARAL (2013); AMSU sur AQUA(2002), série NOAA (1998, +); AMSU-A sur série MetOp (2006, +); SSM/T sur série DMSP (1999, +); SAPHIR sur Megha-Tropiques (2011); MTVZA-GY sur METEOR-M-1 (2009), -M2 (2014); MWRI sur série FY-3 (2008, +) et HY-2A (2011); MWR sur série Sentinel-3 (2016, +); AMR-2 sur JASON-3 (2016)	AMR sur SWOT (2020); AMR-C sur JASON-CS/ SENTINEL-6 (2018); MTVZA-GP-MP sur METEOR-MP (2021); MWI et MWS sur METOP-SG-A (2022)
	Vapeur d'eau: quantité dans une colonne, profils verticaux	Radiomètres hyperfréquences à balayage du limbe, dans le domaine de l'infrarouge: quantités de vapeur d'eau dans les couches, dans la partie supérieure de la troposphère, la stratosphère	TES, MLS sur Aura (2004); MWR sur série Sentinel-3 (2016,+)	
	Gaz présents à l'état de traces contrôlant l'ozone (HCl, N ₂ O, CH ₄ , H ₂ O, HNO ₃)	Sondage hyperfréquences du limbe: profil vertical de l'ozone stratosphérique	MLS sur Aura (2004)	

TABLEAU A2-2 (suite)

Technologie	Objectif	Mesure	Situation (en 2018)	Suivi (2018-2025)
	Surface de l'océan, température sous la surface	Sondage hyperfréquences dans le domaine de l'infrarouge: température à la surface de la mer	AVHRR sur série NOAA (2000, +); AIRS, MODIS sur Aqua (2002); MODIS sur Terra (1999); VIIRS, CrIS, ATMS sur SNPP (2011) et NOAA-20 (2018); GMI sur GPM (2014); AMSR-2 sur GCOM-W1 (2012); MWRI sur HY-2A (2011); MIRAS sur SMOS (2009); WindSat sur Coriolus (2003)	
Imagerie optique multispectrale	Bilan radiatif de la Terre	Associé à des radiomètres large bande: identification de scènes, couche supérieure des flux atmosphériques	MODIS, CERES sur Terra (1999), Aqua (2002); VIIRS, CERES sur SNPP (2011) et NOAA-20 (2018)	
	Bilan du rayonnement en surface			
	Aérosols troposphériques: emplacement et propriétés	Profondeur optique, quelques conclusions concernant les dimensions au-dessus de l'océan et des surfaces sombres	AVHRR depuis 1981, actuellement sur série NOAA (2002, +); MODIS, MISR sur Terra (1999); MODIS sur Aqua (2002); VIIRS sur SNPP (2011) et NOAA-20 (2018)	
	Propriétés des nuages (emplacement, dimensions des gouttes, propriétés des cristaux de glace des nuages)	Propriétés d'une seule couche nuageuse. AVHRR – dimensions des hydrométéores VIIRS, MODIS, et VIIRS – obtention de données sur la phase des hydrométéores		
	Quantité de vapeur d'eau dans une colonne, profils verticaux	Quantités mesurées dans une colonne depuis des canaux de vapeur d'eau dans le proche infrarouge	MODIS sur Terra (2000), Aqua (2002)	
	Couvert terrestre et albédo de surface (couverture neigeuse, glaciers, calottes glaciaires ailleurs)	Indice de végétation, conclusions sur les albédos de surface	AVHRR sur série NOAA (2002, +): conclusions sur les albédos spectraux avec correction atmosphérique; MODIS sur Terra (2000), Aqua (2002); Landsat depuis 1973, -7, -8 (1999, 2013); VIIRS sur SNPP (2011) et NOAA-20 (2018); MSI sur Sentinel-2A/B (2015/2017)	

TABLEAU A2-2 (suite)

Technologie	Objectif	Mesure	Situation (en 2018)	Suivi (2018-2025)
	Couvert terrestre et albédo de surface (hors couverture neigeuse, glaciers, calottes glaciaires)	Images hyperspectrales: types de végétation, couvert terrestre	Hyperion sur EO-1 (2000)	
	Niveaux des lacs, des rivières	Images haute résolution: zones de lacs, de rivières	Landsat depuis 1973, -7, -8 (1999, 2013)	
	Biomasse terrestre, fraction du rayonnement photosynthétiquement utilisable; indice de surface foliaire	Indice de végétation	Données AVHRR depuis 1979, sur série NOAA (2002, +); MODIS sur Terra (2000), Aqua (2002); MISR sur TERRA (1999); SeaWiFS (1997); VIIRS sur SNPP (2012) et NOAA-20 (2018); MSI sur Sentinel-2A/B (2015/2017)	FLORIS sur Flex (2023)
	Indice de surface foliaire	Indice de végétation à une meilleure résolution spatiale	Landsat depuis 1973, -7, -8 (1999, 2013); ASTER sur Terra (2000); Hyperion sur série EO-1; SPOT (1994, +)	FLORIS sur Flex (2023)
	Glaciers, glace de mer, calottes glaciaires	Couverture de zones	AVHRR depuis 1979, sur série NOAA (2002, +); MODIS sur Terra (2000), Aqua (2002); Landsat depuis 1973, -7,-8 (1999, 2013); VIIRS sur SNPP (2011) NOAA-20 (2018)	
	Surface de l'océan, température sous la surface	Température à la surface de mer	Données AVHRR depuis 1981, sur série NOAA (2000, +); MODIS sur Terra (2000), Aqua (2002); VIIRS sur SNPP (2011) et NOAA-20 (2018)	
Imagerie optique (UV – IR)	Ozone dans la stratosphère, troposphère	Imageur-radiomètre UV: teneur en ozone de la troposphère, profils à faible résolution verticale de l'ozone stratosphérique	OMI sur Aura (2004); OMPS sur SNPP (2011) et NOAA-20 (2018)	UVNS (Sentinel-5) sur Metop-SG-A (2020); UVNS (Sentinel-4) sur MTG (2020)
	Perturbations dues aux incendies	Imageurs thermiques dans le proche infrarouge: détection à haute résolution spatiale des foyers d'incendie	Données AVHRR depuis 1981, sur série NOAA (2002, +); MODIS sur Terra (2000), Aqua (2002); VIIRS sur SNPP (2012) et NOAA-20 (2018)	UVNS (Sentinel-5) sur Metop-SG-A (2020); UVNS (Sentinel-4) sur MTG (2020)

TABLEAU A2-2 (suite)

Technologie	Objectif	Mesure	Situation (en 2018)	Suivi (2018-2025)
Radiomètres/ polarimètres optiques (UV – IR)	Eclairement énergétique total du soleil	Mesure directe	SORCE (2003); TIM sur Glory (2008)	
	Aérosols troposphériques: emplacement et propriétés	Imageur-radiomètre UV: profondeur optique, quelques conclusions sur l'absorption pour les couches d'aérosols élevées	OMI sur Aura (2004); OMPS sur SNPP (2011) et NOAA-20 (2018)	
		Polarimètre: profondeur optique, dimensions, forme, albédo à diffusion unique		
	Propriétés des nuages (emplacement, dimensions des gouttes, propriétés des cristaux de glace des nuages)	Sondeurs, imageurs 15 µm: pression d'une couche nuageuse pour un système nuageux à une seule couche, même pour des cirrus de faible profondeur optique	HIRS sur série NOAA (2002, +); MODIS sur Terra (1999), Aqua (2002); AIRS sur Aqua (2002); CrIS sur SNPP (2011) et NOAA-20 (2018)	
		Radiomètres, polarimètres multivue	MISR sur Terra (1999); altitude des nuages à partir d'images stéréo	

TABLEAU A2-2 (*fin*)

Technologie	Objectif	Mesure	Situation (en 2018)	Suivi (2018-2025)
Sondeurs dans le domaine de l'infrarouge	Gaz à l'état de traces contrôlant l'ozone (HCl, N ₂ O, CH ₄ , H ₂ O, HNO ₃)	Profils verticaux de l'ozone troposphérique et de l'ozone stratosphérique	AIRS sur Aqua (2002)	
	CO ₂ , CH ₄	Sondeurs dans le domaine de l'infrarouge	AIRS sur Aqua (2002); CO ₂ seulement avec OCO-2 (2014)	
	CH ₄	Spectromètre dans le domaine de l'infrarouge: mesures de haute précision de la concentration de CH ₄ dans une colonne	TES sur Aura (2004); AIRS sur AQUA (2002)	
	Vapeur d'eau: quantités dans une colonne, profils verticaux	Quantités de vapeur d'eau dans les couches avec une résolution verticale relativement faible dans la troposphère	Données HIRS depuis 1979, sur série NOAA (2002, +); CrIS sur SNPP (2011) et NOAA-20 (2018)	
		Radiomètres à haute résolution spectrale dans le domaine de l'infrarouge: mesures des quantités de vapeur d'eau dans les couches avec une meilleure résolution verticale dans la troposphère	AIRS sur Aqua (2002); TES sur Aura (2004); CrIS sur SNPP (2011) et NOAA-20 (2018)	
Mesures au limbe	Aérosols stratosphériques: emplacement et propriétés	Mesures au limbe et en occultation solaire: profil de l'extinction des aérosols	Radiomètre dans l'infrarouge; SAGE II sur ERBS (1984-2006); SAGE III sur Meteor (2002-2006) SciSat (Canada-E.-U.)	
		Dispersion de la lumière au limbe: profil de la profondeur optique des aérosols	OMPS sur SNPP (2011) et NOAA-20 (2018)	
Mesures basées sur la gravité	Glaciers, glace de mer, calottes glaciaires	Masse des glaces combinée avec la mesure de la topographie		GRACE-FO (2018)
	Eaux souterraines	Eaux souterraines de grande étendue (nécessite des observations auxiliaires in situ)		
	Surface de l'océan, courants sous la surface	Variations de masse sous la surface ou barotropes (combinée aux mesures de la surface par l'altimètre)		