



7. HARMONICA DE VERRE DU XVIII^e SIÈCLE ; l'axe qui porte les cloches de verre est entraîné par un pédalier. L'instrument a été modernisé : un moteur électrique entraîne maintenant les cloches, tandis qu'un brumisateur maintient les doigts humides.

mobile qui ne s'appuie que d'une jambe sur la caisse de résonance. Lors de la mise en vibration de la corde, cette jambe percute périodiquement une petite plaque de verre, engendrant un son sec. L'effet obtenu quand on ne joue que les notes harmoniques sur la corde est celui d'un cor ou d'une trompe de chasse. Cette plaque peut être également en métal ou en ivoire : le facteur d'instruments choisit le matériau selon le timbre qu'il souhaite donner à l'instrument.

Les aérophones dont la structure comporte du verre sont plus variés : des facteurs ont construit des orgues en verre (avec des tuyaux fermés, comme la flûte de Pan en verre), des flûtes traversières (tuyau ouvert), des trompes droites, des embouchures de clarinette et des saxophones de verre. Ces instruments (de construction difficile) sont superbes, et l'emploi de mélanges verriers pour leur réalisation se justifie par la très faible dilatabilité des verres d'oxydes. Les flûtes métalliques, par exemple, ont l'inconvénient de s'allonger ou de se raccourcir selon les variations de températures (de la pièce, de l'instrument chauffé par l'exécutant) : les facteurs doivent généralement construire le corps de ces instruments en plusieurs morceaux, que l'on enfonce plus ou moins les uns dans les autres. Ayant observé cette faible dilatation des verres, au début du XIX^e siècle,

le facteur français Claude Laurent eut l'idée de les employer pour construire ses belles flûtes de cristal ; aujourd'hui, d'autres verres peuvent être mis en œuvre à cette même fin. Cette faible dilatation a intéressé certains facteurs de flûte de Pan ou d'orgues. Ces derniers employèrent des bouteilles selon le principe des flûtes globulaires, faisant vibrer la colonne d'air interne à la cavité à partir du jet de l'air sur un rebord de bouteille. Les bouteilles étant de tailles différentes, on obtenait des notes différentes.

À la famille des idiophones appartiennent les harmonicas, séraphins, cloches déjà examinés, et aussi d'autres instruments, qui ont été inventés après la Renaissance. Par exemple, des cristallophones (vibraphones à lame de verre) furent perfectionnés. L'euphone, lui, se sert du verre comme corps excitateur. Au sein de ce groupe d'instruments, les verres musicaux et l'harmonica occupent une place à part : avec la scie musicale, ce sont les seuls instruments qui émettent par friction des sons de hauteurs différentes et déterminées. Le facteur de séraphin ou d'harmonica, qui n'est pas limité à l'utilisation de verres à boire, peut explorer des formes variées, qui facilitent le jeu, améliorent le timbre et augmentent la puissance sonore. Pour ces optimisations, il doit tenir compte de l'excitation particulière qui est mise en œuvre : les frottements du buvant,

dans le séraphin, ou de la zone plane qui jouxte le buvant pour l'harmonica, engendrent des sons différents. Ce qui est recherché ici, c'est un timbre « chaud et rond », et le son entretenu qui permet d'explorer de nouveaux horizons sonores par des notes maintenues.

D'autres améliorations sont possibles : par exemple, j'ai motorisé l'instrument (qui était naguère actionné par un système de pédalier) et l'ai équipé d'un brumisateur qui conserve l'exacte humidité des doigts de l'instrumentiste.

On comprend aujourd'hui les causes des vibrations inédites des instruments de verre, mais la compréhension des phénomènes physiques n'épuise pas la poésie qui se dégage des timbres, variés et rares, de cet instrumentarium. Le public contemporain ressent toujours la « nouveauté » et la richesse d'expression de ces instruments.

Jean-Claude CHAPUIS est musicien, compositeur et facteur d'instruments. Il a créé l'ensemble *TransparenceS*, où figurent des instruments décrits ici, à côté d'instruments plus connus.

Daniel MOUGIS et Michel BARQUINS, *Stick Slip and Peeling of Adhesive Tapes*, in *Adhesion*, vol. XII, pp. 205-222, K.W. Allen, Elsevier, Londres, 1988.

John PIERCE, *Le son musical*, Éditions Belin-Pour la Science.

La surveillance du climat

MICHAEL KING • DAVID HERRING

Un satellite qui embarque cinq groupes de capteurs collecte les données nécessaires à la prévision des évolutions climatiques.

Le satellite *Terra* survole notre planète à 705 kilomètres d'altitude. Chaque jour, il surveille les phénomènes qui déterminent le climat : les nuages, la croissance des végétaux, les variations du rayonnement solaire, la formation des glaces... Dans son orbite autour de la Terre, en passant par les pôles, il observe toutes les régions qui traversent son champ de vision et il dresse un état de santé du Globe.

Aujourd'hui, l'atmosphère et la biosphère se transforment avec une rapidité sans précédent dans l'histoire de la Terre. Chaque année, on allume des centaines de feux de forêts pour défricher : cette pratique a quadruplé au cours du XX^e siècle. On brûle en moyenne 142 000 kilomètres carrés de forêt tropicale par an, soit l'équivalent du quart de la surface de la France. Certains capteurs de *Terra* détectent les flammes, d'autres mesurent l'étendue des terres brûlées ou observent les déplacements des fumées et des gaz émis dans l'atmosphère. Grâce à la haute résolution de l'un de ses capteurs (15 mètres), *Terra* localise même les braises qui risquent de repartir en flammes. Il fait partie du Système d'observation de la Terre (SOT) de la NASA, un ensemble de satellites qui surveillent le climat global, afin de comprendre l'influence des facteurs naturels et humains et de prédire les changements futurs.

Depuis la formation de la Terre, il y a 4,5 milliards d'années, les bouleversements géologiques, telles les éruptions volcaniques, les variations des courants marins et les cycles de glaciations ont modifié la surface des terres émergées, ce qui a transformé le cli-

mat. Aujourd'hui, l'activité humaine est le principal facteur de changement (voir *Modifions-nous le climat ?*, par Thomas Karl et Kevin Trenberth, *Pour la Science*, janvier 2000).

Pour prévoir ces variations, un grand nombre de mesures, dans le monde entier, sur une période prolongée, doivent être collectées et prises en compte dans les simulations. Nous avons identifié 24 facteurs principaux qui influent sur le climat, notamment les flux d'énergie entre la surface de la Terre et l'atmosphère (les rayonnements visible et infrarouge), les concentrations en gaz à effet de serre, la couverture de neige et de glace, les nuages, les aérosols, les changements de végétation, etc. Le satellite *Terra* mesure 16 de ces facteurs (voir la liste page 78).

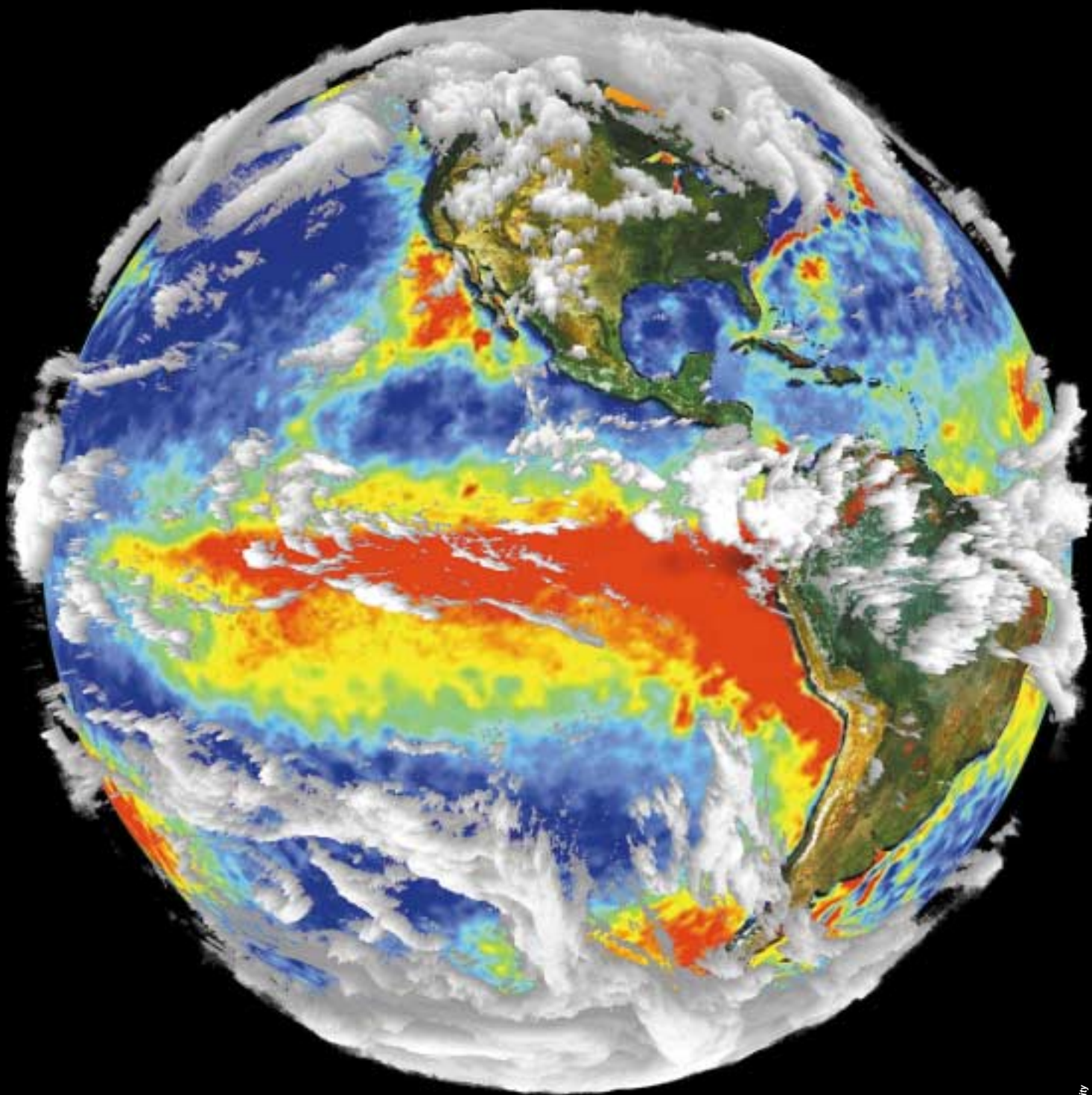
En 1988, la NASA avait proposé le lancement d'un satellite de surveillance du climat global, qui collecterait des données fiables en nombre suffisant (voir *La Terre vue du ciel*, par Diane Evans, Ellen Stofan, Thomas Jones et Linda Godwin, *Pour la Science*, février 1995). En 1991, le programme SOT fut décidé ; un budget de 44 milliards de francs fut alloué pour une durée de dix ans. La construction et le lancement de *Terra*, le satellite du SOT le plus récent, a coûté 55 milliards de francs.

Une nouvelle génération de systèmes de mesure

Depuis son lancement, le 18 décembre 1999, *Terra* est commandé depuis le Centre de Greenbelt, dans le Maryland. Contrairement aux instruments qui émettent des rayons laser ou des

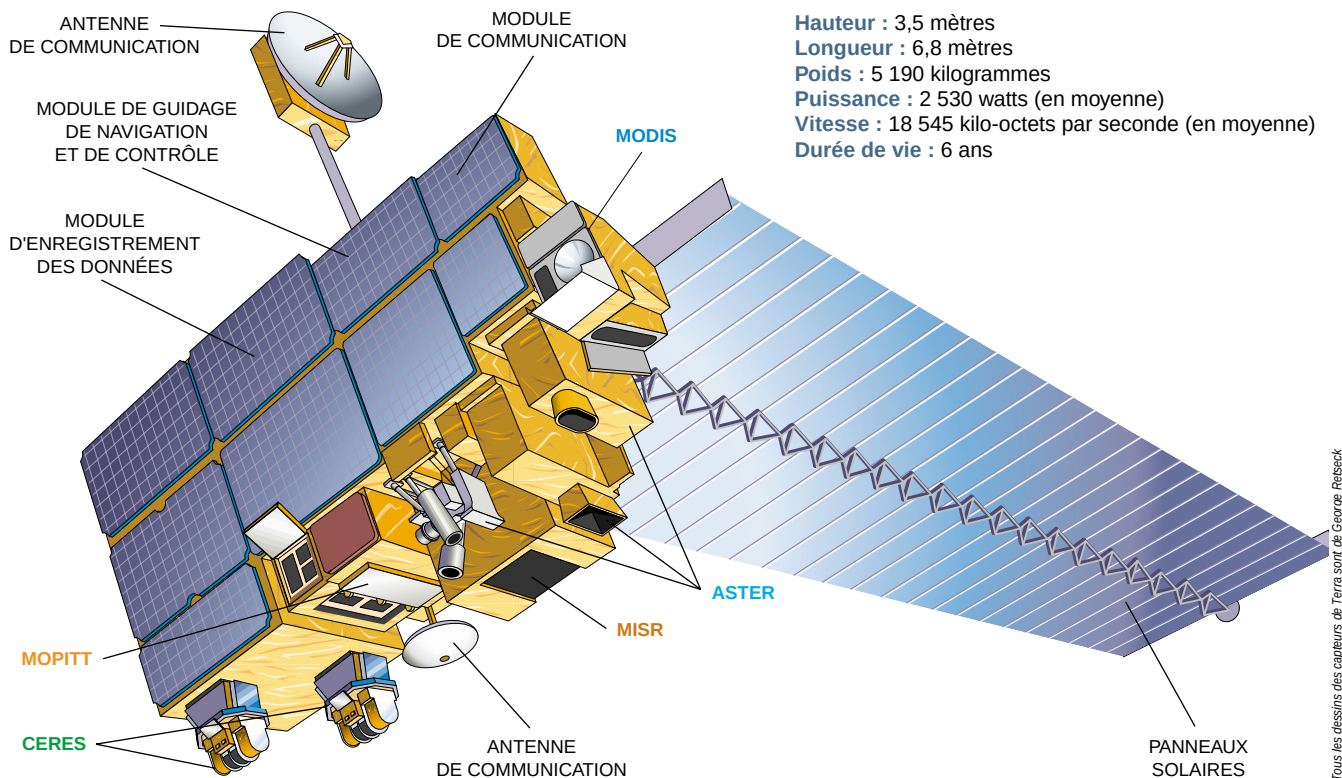
faisceaux radar, puis qui analysent leur réflexion sur la surface de la planète, les systèmes de mesure de *Terra* sont passifs. À la manière de caméras numériques, ils mesurent l'intensité de la lumière qui sort de l'atmosphère. Des détecteurs sont sensibles aux différentes plages de longueurs d'onde. À partir de la lumière visible, on forme alors des images qui sont de véritables photographies. À partir des rayonnements infrarouges et ultraviolets, on forme des images en «fausses couleurs».

Chaque jour, les satellites du SOT envoient sur Terre des dizaines de millions de méga-octets de données. Celles-ci sont traitées par ordinateur, mémorisées, puis interprétées par une équipe de 850 scientifiques du monde entier. Naguère, les données collectées par satellite n'étaient accessibles qu'aux organismes qui disposaient d'un budget suffisant pour les acheter. Les satellites *Landsat*, dont le premier date de 1972, produisent des images qui coûtent chacune des milliers, voire des dizaines de milliers de francs. En revanche, certaines données de *Terra* seront accessibles à toute personne en possession d'une station de réception adéquate et d'équipements capables de traiter et de mémoriser les informations. Les données sont exploitables commercialement : les cartes des zones océaniques de haute productivité intéressent les entreprises de pêche, car ces zones sont les plus poissonneuses ; grâce aux images des cultures, les agriculteurs identifient les terres les plus riches, les zones de ruissellement des eaux, etc., et ils peuvent améliorer l'irrigation et l'amendement des champs.



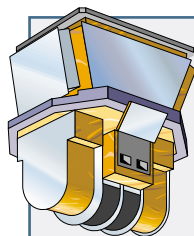
L'ÉTAT CLIMATOLOGIQUE DU GLOBE est analysé par le satellite Terra, lancé en décembre 1999. Des satellites plus anciens ont enregistré les données correspondant à cette image de synthèse, qui montre la végétation (en vert sur les continents), les feux de forêts (en rouge sur les continents), la température des

océans (croissante du bleu au rouge, en passant par le vert et le jaune) et la couverture nuageuse. Les eaux chaudes qui s'accumulent sur l'Ouest de l'Amérique du Sud, dans l'océan Pacifique (en rouge), sont dues à un système périodique de courants océaniques nommé El Niño.

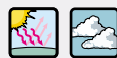


PARAMÈTRES MESURÉS PAR TERRA

- AÉROSOLS
- TEMPÉRATURE DE L'AIR
- NUAGES
- FEUX
- GLACIERS
- TEMPÉRATURE DU SOL
- ÉROSION
- CATASTROPHES NATURELLES
- PRODUCTIVITÉ DE L'OcéAN
- TEMPÉRATURE DE L'OcéAN
- POLLUTION
- BILAN RADIATIF
- COUVERTURE DE GLACE SUR LES OcéANS
- COUVERTURE NEIGEUSE
- VÉGÉTATION
- VAPEUR D'EAU



Paramètres mesurés :



Caractéristiques :

CERES est le seul système embarqué sur un satellite qui mesure les flux radiatifs dans toute l'atmosphère.

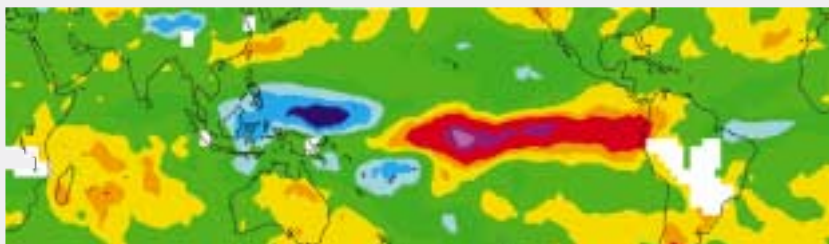
Systèmes de mesure : deux radiomètres à balayage, sur un large domaine spectral.

Résolution spatiale : 20 kilomètres.

CERES est l'acronyme de *Clouds and the Earth's Radiant Energy System*, soit «système de mesure des nuages et du bilan radiatif de la Terre». Pour prédire les variations des températures moyennes, on doit d'abord comprendre les échanges d'énergie

CERES

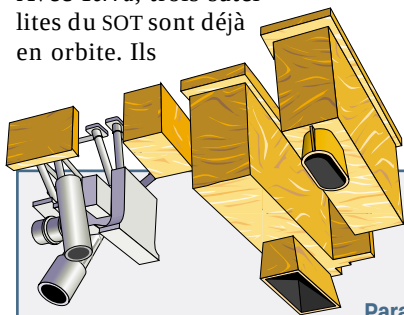
entre la surface de la Terre, l'atmosphère et l'espace. Aujourd'hui, on s'interroge sur le devenir de huit pour cent du rayonnement qui entre dans l'atmosphère. Cette fraction est-elle absorbée par les nuages et les aérosols (de petites particules de fumée et de poussière), puis dispersée dans l'atmosphère inférieure, où aucun satellite ne mesure les rayonnements? Pour comprendre le rôle des nuages dans la circulation de l'énergie à la surface de la Terre, CERES mesure les rayonnements à la limite supérieure de l'atmosphère et à la surface de la planète, avec une précision deux fois supérieure à celle des satellites précédents. Les mesures de CERES compléteront celles d'ERBE, un satellite qui fut mis en orbite pendant les années 1980.



L'INSTRUMENT CERES a enregistré la plus grande variation jamais observée de rayonnement réfléchi, dans l'Est de l'océan Pacifique, en février 1998. Le phénomène El Niño a réchauffé ses eaux, entraînant une formation accrue de cumulo-nimbus qui ont alors piégé une plus grande quantité de la chaleur émise par l'océan et par la couche inférieure de l'atmosphère (en rouge).

Des yeux dans le ciel

Avec *Terra*, trois satellites du SOT sont déjà en orbite. Ils



mesurent des paramètres en rapport avec le climat global, telles la réflexion du rayonnement solaire ou la force des vents au-dessus des océans. Dans le cadre du SOT, 15 autres satellites doivent être construits et mis en orbite. Ils devraient récolter des données pen-

dant 15 ans : pour faire des prévisions précises en matière de climat, nous aurons besoin de mesures sur de longues périodes.

Avec les systèmes de mesure de *Terra* et des autres satellites du SOT, on identifiera les phénomènes qui

ASTER

Paramètres mesurés :

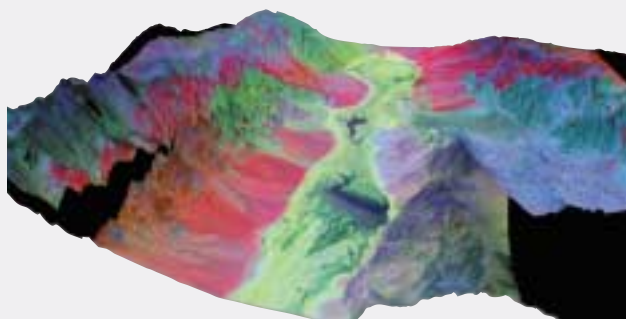


Caractéristiques : ASTER est le système de mesure de *Terra* qui a la meilleure résolution spatiale; on peut le pointer vers des cibles spécifiques.

Instruments : Trois systèmes orientables qui mesurent les longueurs d'onde dans le visible et l'infrarouge (proche, moyen et infrarouge thermique).

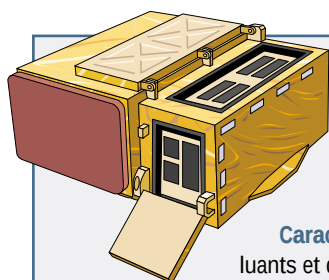
Résolution spatiale : de 15 à 90 mètres.

ASTER est l'acronyme de *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*, soit «radiomètre pour la mesure depuis l'espace des émissions thermiques et des réflexions de la lumière solaire». Les terres émergées émettent des rayonnements qu'ASTER mesure avec une très haute résolution. Grâce à ces données, on établira le bilan radiatif de la planète. On identifiera aussi la nature des roches, des sols et de la végétation qui émettent les rayonnements détectés : les agriculteurs comprendront comment les variations de température, la pente et le type de sol influent sur leurs cultures. ASTER surveille aussi le recul des glaciers et des calottes glaciaires, l'avancée des déserts, la déforestation, les inondations et les feux naturels : il aidera les climatologues à distinguer l'influence des facteurs naturels et humains sur le climat. Avec ses systèmes orientables, ASTER produit des cartes numériques plus précises que celles des satellites *Landsat*.



LES ROCHES ET LA VÉGÉTATION apparaissent en fausses couleurs sur ces images produites avec les mesures d'ASTER. Elles représentent un couloir de 60 kilomètres de large, dans la Vallée de la Mort, en Californie. ASTER détecte le rayonnement thermique (*en haut*), révélateur de la nature de la surface terrestre locale : le rouge correspond à des roches riches en quartz et le vert clair à des dépôts de sels. Il détecte aussi le rayonnement lumineux et infrarouge (*en bas*) : le vert correspond à la végétation, le bleu à l'eau et l'orange aux roches volcaniques riches en fer.

Avec l'autorisation de Michael Abrams, Jet Propulsion Laboratory/California Institute of Technology



MOPITT

Paramètres mesurés :



Caractéristiques : MOPITT détecte les polluants et détermine leur source.

Système de mesure : un radiomètre

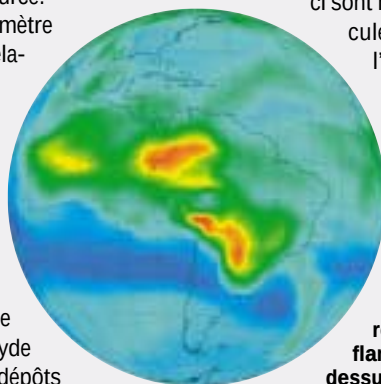
à balayage qui utilise la spectrométrie par corrélation des gaz.

Résolution spatiale : 22 kilomètres.

MOPITT (*Measurements Of Pollution In The Troposphere*, soit «mesure de la pollution dans la troposphère») mesure la concentration en méthane et en monoxyde de carbone dans la couche inférieure de l'atmosphère. Une molécule de méthane, un gaz à effet de serre, piège 30 fois plus de chaleur qu'une molécule de dioxyde de carbone. Les marécages, les animaux et des dépôts

solidifiés, sous le plancher océanique, sont des sources de méthane, mais on ignore combien de méthane est libéré dans l'atmosphère. La concentration en méthane dans l'atmosphère inférieure augmente au rythme d'environ un pour cent par an.

Le monoxyde de carbone produit par les industries, les automobiles et les feux de forêts réagit avec les radicaux hydroxyles, qui sont des «agents nettoyants naturels de l'atmosphère» : ceux-ci sont moins nombreux pour réagir avec d'autres molécules, et le monoxyde de carbone empêche ainsi l'atmosphère de se débarrasser d'autres produits chimiques nocifs. MOPITT, le premier satellite à utiliser la spectroscopie par corrélation des gaz, distingue le méthane et le monoxyde de carbone des autres gaz, tels le dioxyde de carbone et la vapeur d'eau.



DU MONOXYDE DE CARBONE s'accumule au-dessus de l'Amérique du Sud. Les concentrations élevées en ce gaz (*en rouge et en jaune*) résultent des feux de forêt. Les vents d'Est soufflant autour de l'équateur transportent ces gaz au-dessus de l'océan Pacifique.

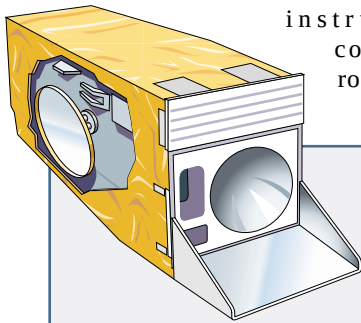
déterminent le climat. En comparant la déforestation à la pluviométrie et à la couverture nuageuse locales, par exemple, on comprendra comment la disparition des arbres perturbe le cycle de l'eau. Des mesures similaires

faites avec différents instruments confirmeront la vali-

dité de leur étalonnage. Enfin, on comparera les mesures prises par des instruments des satellites du SOT et les instruments au sol ou embarqués sur des avions, des bateaux, des bouées...

Le diagnostic du climat requiert des centaines d'heures de calcul par ordinateur : on devra attendre l'hiver prochain pour obtenir une nouvelle vision de la Terre, à partir des mesures de

Terra ; de nombreuses années seront peut-être nécessaires pour la confirmer. Le climat de la Terre résulte de l'influence de nombreux facteurs qui dépendent les uns des autres. L'ensemble des mesures de *Terra* apportera une meilleure compréhension du système climatique et des prévisions plus fiables qu'aujourd'hui de l'évolution de notre climat.



MODIS

Paramètres mesurés :



Caractéristiques : MODIS prend des mesures qui couvrent la totalité de la planète en un à deux jours.

Systèmes de mesure : quatre ensembles de détecteurs sensibles aux rayonnements dont la longueur d'onde est comprise entre celle du visible et celle des infrarouges thermiques.

Résolution spatiale : de 250 mètres à un kilomètre.

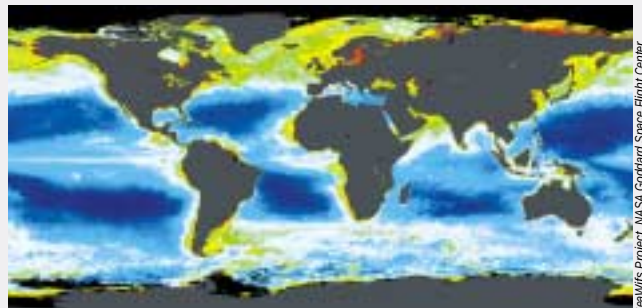
MODIS (*MODERate-resolution Imaging Spectroradiometer*) est un spectroradiomètre à résolution modérée. Il observe la Terre dans 36 intervalles de longueurs d'onde distincts. Parmi les systèmes de mesure de *Terra*, c'est celui qui surveille le plus large éventail de paramètres climatiques. Il mesure presque tous les jours la proportion de la surface terrestre qui est couverte par des nuages, grâce au balayage d'un couloir de 2 330 kilomètres de large. Avec une telle couverture spatiale, complétée par les mesures de MISR et CERES, on déterminera l'impact des nuages sur le bilan énergétique de la planète. L'influence des nuages sur le climat reste mal connue. MODIS est le seul instrument qui mesure le rayonnement infrarouge autour de 1,375 micromètre. Il détecte aussi les cirrus cotonneux qui contribueraient au réchauffement global en piégeant la chaleur émise par la surface de la Terre. MODIS surveille aussi le mélange des panaches de fumée et des aérosols avec les nuages, qui modifient leur capacité à absorber et à réfléchir l'énergie.

MODIS détecte les étendues de neige et de glace qui se déposent pendant l'hiver ou pendant les tempêtes. Il observe la « vague verte » qui déferle sur les continents au printemps, les éruptions volcaniques, les inondations, les cyclones, les sécheresses et les feux de forêts naturels. Grâce à lui, on déplacera des populations menacées. Les capteurs de MODIS sont particulièrement sensibles aux feux : ils distinguent les feux à flammes des feux qui couvent et estime la quantité d'aérosols et de gaz qu'ils libèrent dans l'atmosphère.

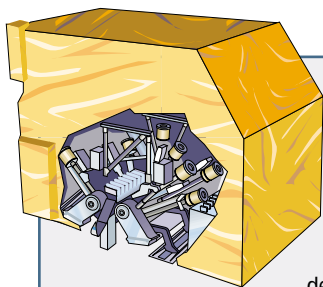
En surveillant les changements de la biosphère, MODIS améliorera notre compréhension du cycle du carbone. Aujourd'hui, aucun capteur embarqué sur un satellite ne mesure directement la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Cependant, MODIS quantifie l'activité photosynthétique des plantes et estime la quantité de gaz à effet de serre qu'elles absorbent. En outre, MODIS surveille la biosphère marine en mesurant la fluorescence de la chlorophylle dans l'océan (*figure ci-contre*).



LA COUVERTURE NEIGEUSE, visible sur cette image prise par le satellite *SeaWiFS*, est l'un des innombrables facteurs climatiques mesurés par MODIS. En bas, on aperçoit la Floride.

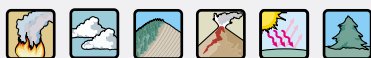


LA CHLOROPHYLLE du phytoplancton modifie la couleur des eaux, ce qui permet à des satellites, tel *SeaWiFS*, d'évaluer son abondance (*en jaune, rouge et vert sur la figure*). MODIS va plus loin en surveillant l'intensité de la fluorescence des plantes, un paramètre révélateur de leur productivité.



MISR

Paramètres mesurés :

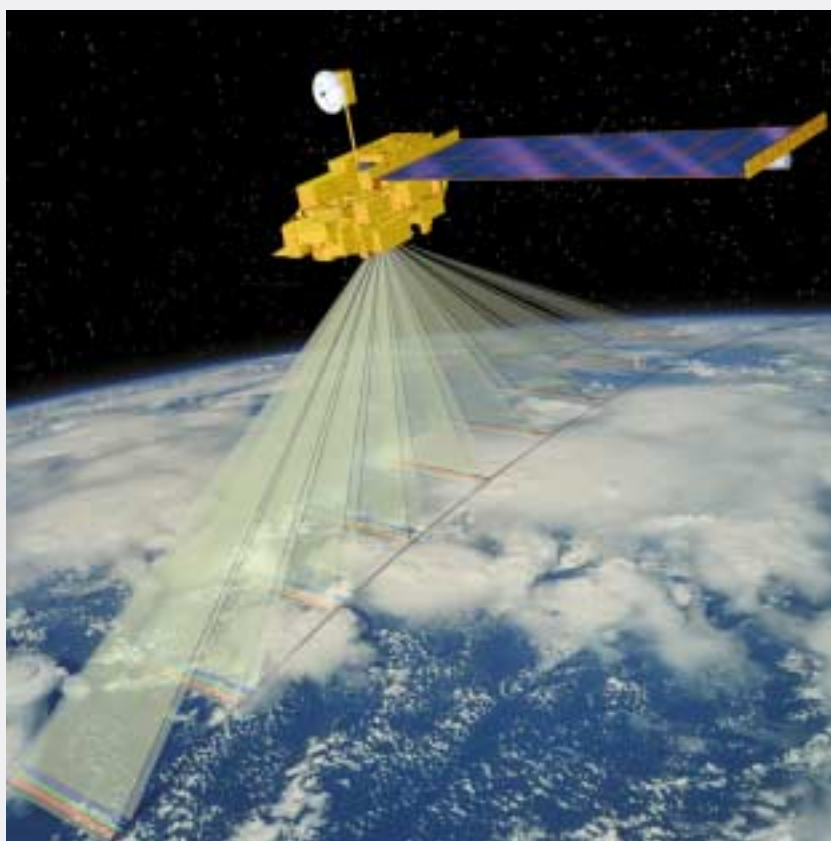


Caractéristiques : MISR produit des images stéréoscopiques des nuages et des panaches de fumée.

Systèmes de mesure : neuf caméras.

Résolution spatiale : de 275 mètres à 1,1 kilomètre.

MISR (*Multiangle Imaging SpectroRadiometer*, soit «spectroradiomètre à visées multiples») reconstitue des images de la Terre en l'observant sous neuf angles distincts, en quatre couleurs (bleu, vert, rouge et infrarouge proche), à partir de la lumière solaire réfléchi par la planète. Grâce aux variations de cette lumière, d'un angle de vue à l'autre, on distingue différents types de nuages, d'aérosols et de surfaces terrestres. On combine les images MISR à l'aide de techniques stéréoscopiques pour créer des modèles en trois dimensions, afin de déterminer la source des aérosols et des panaches de fumée.



Avec l'autorisation de Shigeru Suzuki et Eric M. De Jong. Solar System Visualization Project. Jet Propulsion Laboratory

GRÂCE À NEUF VISÉES SIMULTANÉES, l'instrument MISR mesure, par stéréoscopie, les interactions entre les aérosols, les nuages et les rayonnements.

Michael KING est le directeur scientifique du Système d'observation de la Terre de la NASA ; David HERRING est le directeur de la communication de ce système.

Bruce A. WIELICKI, Robert D. CESS, Michael D. KING, David A. RANDALL et Edwin F. HARRISON, *Mission to Planet Earth : Role of Clouds and Radiation in Climate*, in *Bulletin of the American*

Metropolitanological Society, vol. 76, n° 11, pp. 2125-2154, novembre 1995.

Claire L. PARKINSON, *Earth from Above : Using Color-Coded Satellite Images to Examine the Global Environment*, University Science Books, Sausalito, Californie, 1997.

Michael D. KING, *EOS Science Plan : The State of Science in the EOS Program*, NASA NP-1998-12-069-GSFC, 1998.

