

RECOMMANDATION UIT-R RS.1804*

**Caractéristiques techniques et opérationnelles des systèmes du service
d'exploration de la Terre par satellite fonctionnant
au-dessus de 3000 GHz**

(Question UIT-R 235/7)

(2007)

Domaine de compétence

Depuis de nombreuses années, des instruments sont utilisés sur des systèmes du service d'exploration de la Terre par satellite (SETS) au-dessus de 3 000 GHz. Ces instruments, qui comptent à la fois des dispositifs actifs et passifs, sont déployés sur des systèmes à satellites géostationnaires (OSG) ou non géostationnaires (non OSG) et utilisent des raies spectrales étroites ainsi que des bandes larges. La présente Recommandation fournit un récapitulatif des instruments, engins spatiaux, bandes de fréquences considérées et types de données collectées au-dessus de 3 000 GHz.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que des observations effectuées à des fréquences au-dessus de 3 000 GHz permettent d'obtenir des données essentielles pour l'étude des caractéristiques de la Terre et de ses phénomènes naturels, y compris des données relatives à l'état de l'environnement;
- b) que la technologie applicable aux détecteurs du service d'exploration de la Terre par satellite (SETS) fonctionnant au-dessus de 3 000 GHz évolue constamment de manière à offrir une précision et une résolution toujours meilleures des données de mesure;
- c) que le spectre au-dessus de 3 000 GHz est utilisé par des systèmes de détection actifs et passifs ainsi que par de nombreuses applications de télécommunication;
- d) que, en raison du développement et de l'augmentation rapides du nombre de ces systèmes, les brouillages préjudiciables entre détecteurs du SETS et d'autres services fonctionnant au-dessus de 3 000 GHz risquent d'augmenter;
- e) que les rayonnements laser dans le sens Terre vers espace utilisés par certaines stations optiques au sol pour faire des mesures précises de télémétrie par satellite et de télémétrie sur la Lune et mesurer des paramètres atmosphériques constituent une source de brouillage possible risquant de porter atteinte aux capteurs passifs, sensibles, qui sont installés à bord de satellites;
- f) qu'il y a des différences importantes entre les technologies utilisées dans cette partie du spectre et celles utilisées à des fréquences inférieures (nombre de photons décomptés en fonction de la puissance intégrée sur le temps), mais qu'il y a aussi beaucoup d'analogies;

* Cette Recommandation doit être portée à l'attention des Commissions d'études 1, 3, 4, 8 et 9 des radiocommunications.

g) que des mesures de protection et des considérations de partage ont été prises en compte afin d'assurer que les détecteurs du SETS puissent continuer à fonctionner à des fréquences supérieures à 3 000 GHz sans causer de brouillages préjudiciables,

recommande

1 que les opérateurs de systèmes du SETS fonctionnant au-dessus de 3 000 GHz tiennent compte, dans le choix des caractéristiques des missions et dans celui de la conception des capteurs, que des brouillages peuvent être causés par les émetteurs des services scientifiques (y compris ceux des systèmes du SETS);

2 que les études des brouillages à destination ou en provenance des systèmes du SETS tiennent compte des paramètres techniques et opérationnels décrits dans l'Annexe 1.

Annexe 1

1 Introduction

Depuis de nombreuses années, des instruments sont utilisés sur des systèmes du service d'exploration de la Terre par satellite (SETS) au-dessus de 3 000 GHz. Ces instruments fonctionnent selon différents modes et fournissent divers types de données. Ils comptent à la fois des dispositifs actifs et passifs, sont déployés sur des systèmes à satellites géostationnaires (OSG) ou non géostationnaires (non OSG) et utilisent des raies spectrales étroites ainsi que des bandes larges. Les informations contenues dans les paragraphes qui suivent constituent un récapitulatif des instruments, engins spatiaux, bandes de fréquences considérées et types de données collectées au-dessus de 3 000 GHz.

2 Instruments

Les instruments décrits seront classés dans les catégories suivantes: imageurs, radiomètres/spectromètres, ou altimètres LIDAR. Les imageurs sont des instruments qui visent essentiellement à fournir des représentations bidimensionnelles des phénomènes physiques comme les nuages ou la surface de la Terre. Les radiomètres/spectromètres sont des instruments qui mesurent les flux radiatifs électromagnétiques. Enfin, les altimètres LIDAR sont des instruments qui mesurent la hauteur entre l'engin spatial et la surface directement en dessous à l'aide de pulsions d'émissions lumineuses.

2.1 Caractéristiques techniques de l'imagerie

L'une des premières utilisations du spectre au-dessus de 3 000 GHz pour des applications des systèmes du SETS est l'imagerie de la surface de la Terre et de la nébulosité. Plus récemment, les systèmes d'imagerie ont été utilisés en vue de recueillir des données sur la distribution et la fréquence des éclairs. Les trois types de systèmes d'imagerie décrits ci-après sont représentatifs des capacités générales des systèmes du SETS qui s'acquittent de fonctions d'imagerie à des fréquences supérieures à 3 000 GHz. Un quatrième système, décrit ci-après, a pour objet de détecter par des moyens optiques les phénomènes météorologiques.

2.1.1 Imagerie multispectrale des nuages

Les Systèmes A1 à A3 utilisent un seul instrument qui recueille des images à 14 longueurs d'onde différentes comprises entre 0,5 et 12 μm . Cet instrument, appliqué à la surveillance des nuages à

long terme, fonctionne à des résolutions spatiales comprises entre 15 et 90 m en fonction de la longueur d'onde mesurée. L'instrument est divisé en trois systèmes distincts munis de leur propre télescope pour assurer une surveillance à des longueurs d'onde différentes. Les différentes bandes utilisées par les systèmes sont les suivantes:

- Spectre visible/proche infrarouge (VNIR, *visible/near infrared*) de 0,50 à 0,90 μm (600 à 333 THz¹).
- Infrarouge ondes courtes (SWIR, *short-wave infrared*) de 1,6 à 2,43 μm (187,5 à 123 THz).
- Infrarouge thermique (TIR, *thermal infrared*) de 8 à 12 μm (37,5 à 25 THz).

Cet instrument, avec sa résolution spatiale élevée, sa couverture spectrale étendue et sa capacité d'imagerie stéréo, permet de réaliser des mesures essentielles se rapportant aux nuages, à savoir: nébulosité, type, distribution spatiale, morphologie et propriétés radiatives. Alors que de nombreux instruments d'imagerie des nuages mesurent des ensembles de paramètres semblables, la capacité d'observation qu'offre cette résolution spatiale élevée permet d'obtenir des données qui peuvent être directement corrélées à des propriétés physiques détaillées. De plus, dans des zones caractérisées par l'absence de nébulosité, cet instrument étudie sur le long terme les changements locaux et régionaux apportés à la surface de la Terre qui se traduisent par des changements climatiques mondiaux ou qui en sont la résultante (par exemple, utilisation des terres, déforestation, désertification, changements enregistrés dans le niveau d'eau des lacs et des lacs temporaires et autres changements apportés à la végétation, aux mouvements des glaces et aux phénomènes volcaniques). Les paramètres techniques de cet instrument sont récapitulés dans le Tableau 1.

TABLEAU 1

Paramètres techniques des systèmes d'imagerie multispectrale des nuages

Système	A1	A2	A3
Champ de vision (degrés)	6,09	4,9	4,9
Champ de vision instantané (μrad)	21,5	42,6	128
Longueurs d'onde mesurées (μm)	0,52-0,60 0,63-0,69 0,76-0,86	1,60-1,70 2,145-2,185 2,185-2,225 2,235-2,285 2,295-2,365 2,360-2,430	8,125-8,475 8,475-8,825 8,925-9,275 10,25-10,95 10,95-11,65
Résolution spatiale (m)	15	30	90
Débit binaire (Mbit/s)	62	23	4,2
Pointage transversal (degrés)	± 24	$\pm 8,55$	$\pm 8,55$
Pointage transversal (km)	± 318	± 116	± 116
Largeur de la zone explorée (km)	60	60	60
Type de détecteur	Silicium (Si)	Platine siliciure-silicium (PtSi-Si)	Tellure de mercure et de cadmium (HgCdTe)
Quantification (bits)	8	8	12

¹ 1 THz = 1 000 GHz.

2.1.2 Imagerie multispectrale des surfaces de la Terre

Les Systèmes B1 à B5 utilisent un seul instrument pour recueillir des images à sept longueurs d'onde étroites comprises entre 0,45 et 12,5 μm ainsi que dans une gamme panchromatique de 0,5 à 0,9 μm . Cet instrument sert à décrire et à suivre l'évolution de la couverture terrestre et des processus à la surface des terres émergées. Grâce aux résolutions spatiales élevées (de 15 à 60 m en fonction des longueurs d'onde) et à la couverture mondiale saisonnière de cet instrument, il est possible de mesurer à la fois la vitesse des changements de la couverture terrestre et des processus locaux responsables de ces changements. Ainsi, la déforestation, la fragmentation des écosystèmes, la productivité agricole, la dynamique des glaciers, la vulnérabilité des côtes et la surveillance des volcans sont des objectifs scientifiques représentatifs pour cet instrument.

L'instrument réalise ces mesures par une ouverture unique dans quatre bandes:

- Spectre visible (VIS) de 0,45 à 0,69 μm (667 à 435 THz).
- Proche infrarouge (NIR) de 0,76 à 0,90 μm (395 à 333 THz).
- Infrarouge ondes courtes (SWIR) de 1,55 à 2,35 μm (194 à 128 THz).
- Infrarouge thermique (TIR) de 10,42 à 12,5 μm (28,8 à 24 THz).

Le Système B6 est un radiomètre fonctionnant dans le spectre visible et proche infrarouge, qui sert à observer les zones terrestres et côtières. Il fournit des cartes de la couverture terrestre et des cartes de classification de l'utilisation des terres pour la surveillance de l'environnement régional. L'instrument est doté d'une capacité de pointage transversal pour la surveillance des catastrophes.

Le Système B7 est un radiomètre panchromatique ayant une résolution spatiale de 2,5 m. Afin de recueillir des données topographiques, y compris sur l'élévation, cet instrument dispose de trois systèmes optiques pour réaliser des vues vers l'avant, le nadir et l'arrière. L'instrument fournit des observations géographiques précises permettant d'établir des cartes mondiales à l'échelle de 1/25 000.

Les paramètres techniques de ces systèmes sont résumés dans le Tableau 2.

TABLEAU 2

Paramètres techniques de l'imagerie multispectrale des surfaces de la Terre

Système	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Champ de vision instantané (μrad)	42,5	42,5	42,5 × 39,4	42,5 × 85,0	21,25 × 18,5	14,28	3,57
Longueurs d'onde mesurées (μm)	0,45-0,52 0,52-0,60 0,63-0,69	0,76-0,90	1,55-1,75 2,08-2,35	10,42-12,50	0,50-0,90	0,45-0,50 0,52-0,60 0,61-0,69 0,76-0,89	0,52-0,77
Résolution spatiale (m)	30	30	30	60	15	10	2,5
Débit binaire	Fusion des données en un flux de données de 150 Mbit/s					160 Mbit/s (après compression des données: 120 Mbit/s)	320 Mbit/s × 3 télescopes = 960 Mbit/s (après compression des données: 240 Mbit/s, 120 Mbit/s)
Largeur de la zone explorée	185 km (±7,5°). Chaque image représente un incrément de 170 km le long de la trajectoire au sol du satellite					70 km	Jusqu'à 70 km
Détecteurs par bande	16	16	16	8	32	7 000	40 000

2.1.3 Imagerie hyperspectrale

Cet instrument fonctionne de manière analogue aux imageurs multispectraux; toutefois, l'analyse hyperspectrale utilise des canaux spectraux contigus, permettant ainsi l'utilisation d'instruments dérivés et de techniques d'analyse poussées. La présence d'un nombre beaucoup plus important de bandes permet de recourir à des systèmes plus complexes sans faire appel au sous-échantillonnage inhérent aux systèmes multispectraux. L'imagerie hyperspectrale compte un large éventail d'applications: exploitation minière, géologie, foresterie, agriculture et gestion de l'environnement.

Le Système C d'imagerie hyperspectrale utilise 220 bandes sur une gamme spectrale comprise entre 0,4 et 2,5 μm (de 750 à 120 THz). Grâce à la classification détaillée des actifs fonciers réalisée par le Système C, il sera possible d'effectuer une prospection à distance plus précise des minéraux, de faire de meilleures prévisions et de meilleures évaluations des rendements des récoltes et enfin, d'établir une cartographie du confinement.

Les paramètres techniques de ce système sont résumés dans le Tableau 3.

TABLEAU 3

Paramètres techniques d'un système d'imagerie hyperspectrale

Système	C
Champ de vision instantané (μrad)	43
Longueurs d'onde mesurées (μm)	0,4 à 2,5 (contigu dans 220 bandes)
Résolution spatiale (m)	30
Débit binaire	250-500 MB sur des périodes de collecte de 8 à 12 secondes
Taille de l'image (km^2)	$7,6 \times 100$
Détecteurs par bande	1 (220 détecteurs individuels)

2.1.4 Détection des éclairs

Le Système D étudie l'incidence au niveau mondial des éclairs, la corrélation existant avec les pluies de convection ainsi que la relation avec l'ensemble du circuit électrique. Cet instrument comprend un imageur fixe optimisé pour localiser et détecter les éclairs avec une résolution à l'échelle des orages (de 4 à 7 km) s'étendant sur une vaste région ($600 \times 600 \text{ km}$) de la surface de la Terre. Le système peut surveiller des orages ponctuels dans son champ de vision pendant une durée de 80 s, qui suffit pour évaluer la vitesse de l'éclair. On combine quatre méthodes pour extraire les données relatives à l'éclair de l'image environnante. Pour appliquer ces méthodes, il faut pouvoir séparer les caractéristiques spatiales, temporelles et spectrales d'images consécutives afin d'identifier le profil des éclairs par rapport à d'autres émissions. Un filtrage temporaire est nécessaire pour confirmer que la durée de l'émission correspond approximativement à celle d'un éclair (en général $\sim 400 \mu\text{s}$). Un filtrage spectral est nécessaire pour confirmer la présence d'énergie au niveau du puissant multiplet OI(1) dans le spectre d'éclairs de $0,7774 \mu\text{m}$ (385,9 THz). Enfin, un filtrage spatial est requis pour identifier l'emplacement de l'éclair.

Les paramètres techniques de ce système sont résumés au Tableau 4.

TABLEAU 4

Paramètres techniques d'un système de détection des éclairs

Système	D
Champ de vision (degrés)	80 × 80
Champ de vision instantané (degrés)	0,7
Longueurs d'onde mesurées (µm)	0,7774
Résolution spatiale (km)	~5
Débit binaire (kbit/s)	6
Dimension de l'image (km)	600 × 600
Détecteur	CCD 128 × 128

2.2 Radiométrie et spectrométrie

La radiométrie et la spectrométrie sont des techniques de mesure particulières qui peuvent être réalisées à titre individuel ou être combinées pour surveiller la composition chimique de l'atmosphère (y compris les polluants), les profils météorologiques, la structure des nuages ainsi que les caractéristiques de la surface terrestre. Ces systèmes peuvent fonctionner à des fréquences allant de l'ultraviolet (c'est-à-dire des longueurs d'onde < 0,4 µm) jusqu'à l'infrarouge thermique (c'est-à-dire des longueurs d'onde > 10,0 µm). Ces instruments peuvent fonctionner sous la forme d'un détecteur en peigne, en mode de balayage ou en mode de pointage fixe avec des cibles placées à la surface de la Terre ainsi que sur son limbe.

Les mesures radiométriques s'appliquent généralement à moins de 50 bandes différentes, sans filtrage strict. En revanche, les mesures de spectrométrie peuvent collecter simultanément des données sur des milliers de bandes étroites. Des informations précieuses peuvent être tirées de ces deux techniques de mesure, non seulement grâce à un examen des données dans différentes bandes mais aussi grâce à l'évaluation de données différentielles obtenues à partir de données recueillies dans des bandes multiples.

Le Système E1 est un instrument spatioporté conçu spécialement pour mesurer les indicateurs du changement climatique mondial. Ce système, qui dispose d'une couverture spectrale comprise entre 3,7 et 15,4 µm (de 81 à 19,5 THz), peut mesurer très précisément les quantités de vapeur d'eau atmosphérique et de gaz à effet de serre et peut produire des cartes précises en 3D de la distribution de la vapeur d'eau et des gaz à effet de serre à l'état de trace dans l'atmosphère.

Le Système E2 joue un rôle vital dans l'établissement de modèles de systèmes interactifs, mondiaux et validés de la Terre, capables de prédire des changements dans le monde, en mesurant des paramètres tels que le terrain, les nuages, les limites des aérosols et les températures, la biogéochimie des océans ainsi que la hauteur du sommet des nuages. Cet instrument offre une sensibilité radiométrique élevée (12 bits) dans 36 bandes spectrales dont la longueur d'onde est comprise entre 0,4 µm et 14,4 µm (de 750 à 20,8 THz).

Le Système E3 permet d'obtenir, à l'échelle mondiale, des mesures à long terme, des composants essentiels de l'atmosphère de la Terre, le plus important étant la distribution verticale des aérosols, de l'ozone et de la vapeur d'eau dans la troposphère supérieure jusqu'à la stratosphère. Cet instrument est un spectromètre réseau qui mesure l'ultraviolet/le visible à l'aide d'une barrette de capteurs CCD de 800 éléments pour fournir une couverture spectrale continue entre 0,29 et 1,03 µm (de 1 034 à 291 THz). Des informations supplémentaires sur les aérosols sont fournies par une photodiode indépendante à 1,55 µm (193,5 THz).

Cette configuration permet à l'équipement de faire des mesures multiples des caractéristiques d'absorption des espèces gazeuses visées ainsi que des mesures dans de nombreuses longueurs d'onde de l'extinction large bande par les aérosols.

Le Système E4 est un capteur optique qui observe le rayonnement solaire réfléchi par la surface de la Terre, y compris les terres, les océans et les nuages et/ou le rayonnement infrarouge avec un système multicanal pour mesurer le contenu biologique comme la chlorophylle, les substances organiques et l'indice de biomasse ainsi que la température, la neige et la glace et la distribution nuageuse. Ces données sont utilisées pour comprendre les changements climatiques et la circulation du carbone à l'échelle de la planète.

Le Système E5 est un spectromètre qui observe le spectre d'absorption du limbe atmosphérique depuis la troposphère supérieure jusqu'à la stratosphère en utilisant la lumière du soleil comme source de lumière (technique de l'occultation solaire). Le spectromètre couvre les régions spectrales de 3 à 13 μm (100 à 23,1 THz) et de 0,753 à 0,784 μm (398 à 383 THz). Il a été élaboré pour surveiller l'ozone stratosphérique aux latitudes élevées. Le système a pour objectif de surveiller et d'étudier les changements intervenus dans la stratosphère du fait de la présence de chlorofluorocarbones (CFC) et d'évaluer l'efficacité des mesures de contrôle des émissions de CFC dans le monde. Ce système est conçu pour observer uniquement les régions de hautes latitudes (57-73° N, 64-90° S) en raison de la relation géométrique existant entre les événements d'occultation solaire et l'orbite héliosynchrone. A partir de ces observations spectrales, le système E5 peut mesurer les profils verticaux d'espèces liées aux phénomènes de diminution de l'ozone, dont l'ozone (O_3), le dioxyde d'azote (NO_2), l'acide nitrique (HNO_3), les aérosols, la vapeur d'eau (H_2O), CFC-11, CFC-12, le méthane (CH_4), l'oxyde de diazote (N_2O), le nitrate de chlore (ClONO_2), la température et la pression.

Le Système E6 est un spectromètre à transformée de Fourier avec débit optique et résolution spectrale élevés. Cet instrument est conçu pour détecter le spectre solaire SWIR réfléchi à la surface de la Terre ainsi que le spectre TIR rayonné par le sol et par l'atmosphère. L'instrument permet d'obtenir un interférogramme des rayonnements entrants. Celui-ci est alors traité avec l'algorithme de transformée de Fourier rapide (TFR) pour obtenir des spectres englobant les spectres d'absorption des gaz à effet de serre. En appliquant un algorithme de traitement pour supprimer la contamination par les nuages et par les aérosols des spectres transformés, on peut calculer la densité de colonne des gaz.

Le Système E7 est un système mixte de sondage optique/d'imagerie météorologique hyperfréquences, utilisé pour la détection à distance de la surface des océans et des terres ainsi que pour la mesure des profils de vapeur d'eau et de température de l'atmosphère dans le monde.

Le radiomètre hyperfréquences associé au Système E7 s'appuie sur la technologie qui consiste à combiner les mesures multifréquences et de polarisation dans l'espace et dans le temps. Il fonctionne à des fréquences situées dans les fenêtres transparentes de l'atmosphère à 6,9, 10,6, 18,7, 23,8, 31, 36,5, et 91 GHz ainsi que dans les raies d'absorption de l'oxygène à 52-57 GHz et de la vapeur d'eau à 183,31 GHz. En outre, cet instrument comprend des fréquences de fonctionnement complémentaires non typiques pour la recherche océanographique dans les bandes des 42 et 48 GHz. Il permettra de mesurer le profil de la température de l'atmosphère jusqu'à environ 42 km et celui de la vapeur d'eau jusqu'à 6 km.

En combinant les observations optiques et hyperfréquences dans le même instrument, on obtient des avantages mutuels bénéfiques pour déterminer les paramètres géophysiques. Les profils de la température et de l'humidité atmosphérique mais aussi les températures de la surface de la mer et la vitesse des vents à proximité de la surface, la couleur des océans ou encore les processus biologiques relevés au niveau de la couche supérieure de l'océan seront tous observés ensemble, ce qui permet de visualiser les courants océaniques et de mieux observer les zones d'émergence des eaux. Il sera également possible d'étudier les interactions entre l'océan et l'atmosphère. Grâce aux

capacités offertes par le Système E7, il est possible de supprimer les incertitudes que l'on rencontre souvent lorsque les observations multispectrales et multifréquences sont établies à partir d'instruments différents qui examinent des parties distinctes de l'atmosphère sous des angles différents et à des moments différents du temps.

Le Tableau 5 contient un récapitulatif des paramètres techniques de ces instruments spectroradiométriques représentatifs.

TABLEAU 5

Paramètres techniques des systèmes de radiométrie et de spectrométrie

Système	E1	E2	E3
Mesures	Sondeur infrarouge à résolution spectrale élevée	Spectroradiomètre d'imagerie	Occultation solaire et lunaire
Données	Profils de la température et de la vapeur d'eau, caractéristiques des nuages et distribution nuageuse	Température à la surface, couverture de la végétation à la surface de la Terre, masques des nuages, incendies	Profils verticaux de OClO, NO ₂ , NO ₃ , O ₃ et H ₂ O, dans la mésosphère, la stratosphère et la troposphère
Région spectrale (µm)	0,4-15,4 (2 378 canaux) 6.3, 9.6, 11 pour des profils précis	0,4-3,0 (21 canaux) 3,0-14,5 (15 canaux)	0,29-1,55 (9 canaux)
Champ de vision (degrés)	±49,5° (transversal)	±55°	±185° azimuth 13-31° élévation
Champ de vision instantané	13,5 km au nadir	250 m (2 canaux), 500 m (5 canaux), 1 000 m (29 canaux)	< 0,5 km @ 20 km hauteur de la tangente
Balayage	22,5 tours par minute (1 révolution/2,667 s) Balayage de la Terre/2,0 s; Etalonnage/0,667 s	20,3 tours par minute	Points sur le limbe
Débit binaire (Mbit/s)	1,44	6,2 (moyenne), 10,5 (jour), 3,2 (nuit)	0,115 pour 8 min; 3 fois/jour
Précision	Irradiance: 3%	Irradiance absolue: 5% < 3 µm; 1% > 3 µm	5-15% en fonction des produits chimiques mesurés

TABLEAU 5 (suite)

Paramètres techniques des systèmes de radiométrie et de spectrométrie

Système	E4	E5	E6
Mesures	Spectroradiomètre d'imagerie	Occultation solaire	Spectromètre à transformée de Fourier
Données	Chlorophylle, matière organique dissoute, température à la surface, distribution de la végétation, neige, glace	Profils verticaux de O ₃ , HNO ₃ , NO ₂ , N ₂ O, CH ₄ , H ₂ O, ClONO ₂ , de la température et de la pression	Concentration des gaz à effet de serre, mesure de O ₂ , CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O
Région spectrale (µm)	0,375-0,88 (23 canaux) 1,040-2,32 (6 canaux) 3,55-12,5 (7 canaux)	3,0-5,7 (Canal 1) 6,21-11,76 (Canal 2) 12,78-12,85 (Canal 3) 0,753-0,784 (Canal 4)	0,75-0,78 (Bande 1) 1,56-1,72 (Bande 2) 1,92-2,08 (Bande 3) 5,5-14,3 (Bande 4)
Champ de vision (degrés)	±45	0,017	±35 (transversal) ±20 (longitudinal)
Champ de vision instantané	250 m (6 canaux) 1 000 m (30 canaux)	1,0 km × 13,0 km (Canaux 1, 2) 1,0 km × 21,7 km (Canal 3) 1,0 km × 2,0 km (Canal 4)	10 km
Balayage	16,7 tours par minute	Non applicable	0,25, 0,5, 1 (interférogrammes)/s
Débit binaire (Mbit/s)	Canal, 1 km: 4 Mbit/s au maximum Canal; 250 m: 60 Mbit/s au maximum	54 kbit/s	8 Mbit/s
Précision	Au-dessous de 3 µm Irradiance relative: 5% Irradiance absolue: 10% Au-dessus de 3 µm Température: 0,6K	3% (O ₃), 5% (autres)	1% (CO ₂), 2%(CH ₄) (densité de colonne)

TABLEAU 5 (*fin*)**Paramètres techniques des systèmes de radiométrie et de spectrométrie**

Système	E7
Mesures	Système de sondage optique d'imagerie météorologique hyperfréquences
Données	Détection à distance du profil de la température atmosphérique (jusqu'à 42 km) et du profil de l'humidité atmosphérique (jusqu'à 6 km), de la température de la surface de la mer et de la vitesse du vent proche de la surface, des précipitations, de la couleur des océans et des processus de la couche active des océans, de la surveillance des glaces et des neiges
Région spectrale (μm)	0,37-0,45 0,45-0,51 0,58-0,68 0,68-0,78 3,55-3,93
Champ de vision (degrés)	120° par balayage (2 000 km de largeur), 19 km de longueur
Champ de vision instantané (km)	1,1 \times 1,1
Balayage	20,8 tours par minute (1/2,88 s)
Fréquence d'échantillonnage (données)	665,4 kbit/s, 30,7 Mbit/s
Précision	Résolution spatiale de 1,1 km, stabilité temporelle de 10^{-4}

2.3 Altimétrie – active

L'altimétrie est réalisée à partir de l'espace à l'aide de systèmes de détection et télémétrie par lumière (LIDAR, *light detection and ranging*) fonctionnant au voisinage de 1 064 μm (283 THz) et de 0,532 μm (566 THz). Le Système F1 est un système fonctionnant à 283 THz utilisé pour mesurer la topographie des nappes glaciaires et leurs changements temporels associés, les propriétés des nuages et de l'atmosphère, ainsi que la topographie longitudinale sur la Terre et sur l'eau. Pour les applications des nappes glaciaires, l'altimètre laser peut mesurer la hauteur à partir de l'engin spatial jusqu'à la nappe glaciaire avec une précision supérieure à 10 cm pour une dimension de 66 m du spot à la surface. Les mesures de la hauteur, couplées à la connaissance de la position orbitale, permettent de déterminer la topographie de la surface. On utilise les caractéristiques de l'impulsion d'écho pour déterminer la rugosité de la surface. Les variations de quelques dizaines de centimètres de l'épaisseur des nappes glaciaires mesurées sur une échelle temporelle fournissent des informations sur le bilan de masse des nappes glaciaires et peuvent étayer des analyses de prévisions de la réponse cryosphérique aux changements climatiques futurs. Il est également possible de surveiller le bilan de masse des nappes glaciaires et leur contribution aux modifications du niveau de la mer. La précision des mesures de la hauteur au-dessus des terres peut être évaluée à partir de la pente du sol et de la rugosité du terrain. Les échos de surface peuvent être numérisés sur une gamme dynamique totale de 30 m au-dessus des océans et de 80 m ailleurs.

Le Système F2 mesure les distributions longitudinales de la hauteur des nuages et des aérosols à 566 THz avec une résolution verticale de 75 à 200 m. La résolution horizontale peut varier de

150 m pour les nuages denses jusqu'à 50 km pour la structure des aérosols et la hauteur de la couche limite planétaire. Les mesures non ambiguës de la hauteur des nuages et de la structure verticale des nuages fins militent en faveur d'études sur l'influence des nuages pour le bilan radiatif et les rétroactions climatiques. Les détecteurs passifs permettent de détecter et d'échantillonner avec une plus grande sensibilité les nuages polaires ainsi que la brume, la résolution verticale et la précision fournies étant par ailleurs très élevées. La couche limite planétaire peut être mesurée directement et avec précision, données qui seront intégrées dans les flux de surface ainsi que dans les modèles d'interaction air-mer et air-terre. Des mesures directes des profils verticaux des aérosols permettront de comprendre les effets climatiques des aérosols et leur transport.

Le Tableau 6 contient un récapitulatif des paramètres techniques des systèmes spatiaux d'altimètre LIDAR.

TABLEAU 6

Paramètres techniques des systèmes d'altimétrie

Système	F1	F2
Longueur d'onde (μm)	0,532	1,064
Energie émise (mJ)	36	74
Fréquence de répétition des impulsions (Hz)	40	
Divergence du faisceau (μrad)	110	
Ouverture de l'émetteur LIDAR (cm)	15	
Empreinte au nadir (m)	66	
Ouverture du télescope de réception (m)	1	
Champ de vision du récepteur (μrad)	150	475
Rendement quantique du détecteur	0,6	0,3
Débit binaire (kbits/s)	~450	
Précision de pointage (arcsec)	1,5	
Précision de télémétrie (m)	75	0,15

A l'heure actuelle, les lasers orbitaux sont utilisés dans de nombreuses missions scientifiques programmées de la Terre. Dans la plupart de ces missions, il est prévu d'utiliser des lasers à d'autres longueurs d'onde que 0,532 μm et 1,064 μm . On citera, par exemple, une mission de mesure active du CO_2 dont les canaux lasers fonctionnent à 1,570 μm , 0,770 μm et probablement, 0,532 μm . D'autres missions envisagent de mesurer, par exemple, l'ozone à des longueurs d'onde inférieures à 0,400 μm ainsi que la vapeur d'eau, probablement dans la bande de 0,930 μm .

3 **Engin spatial**

Bien qu'il n'existe pas de procédure officielle pour enregistrer les systèmes du SETS qui utilisent les bandes de fréquences au-dessus de 3 000 GHz, ces instruments peuvent être présents sur près de la moitié de tous les engins spatiaux SETS. Dans un proche avenir, il est prévu de lancer chaque année entre un et trois nouveaux systèmes du SETS fonctionnant au-dessus de 3 000 GHz, avec des instruments supplémentaires déployés temporairement sur les navettes spatiales et la station spatiale internationale. La majorité des systèmes du SETS utilisent des orbites non géostationnaires, une partie non négligeable de ces systèmes étant située sur des orbites héliosynchrones.

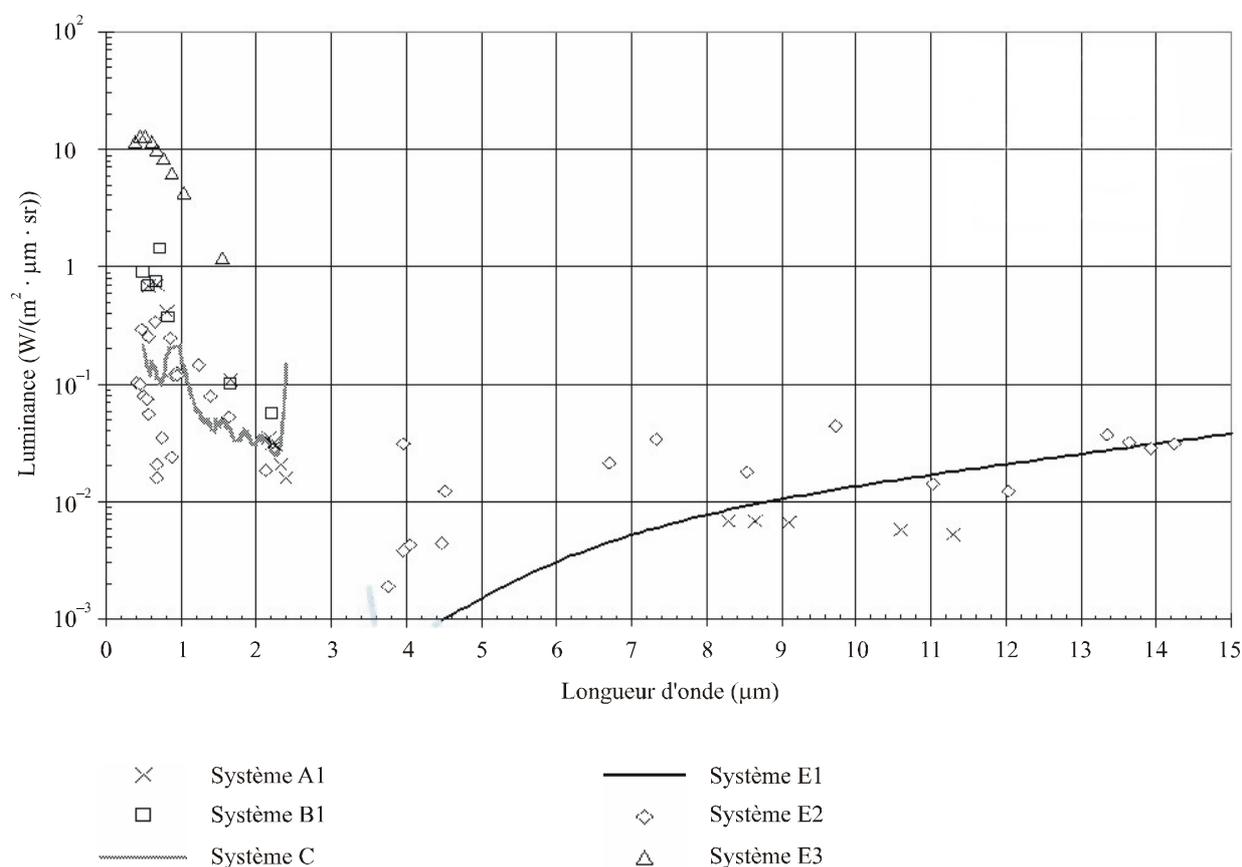
4 Sensibilité du système et émissions naturelles

Les systèmes du SETS recueillent des informations relatives aux caractéristiques de la Terre et de ses phénomènes naturels, dont des données se rapportant à l'état de l'environnement. Chaque système du SETS possède des caractéristiques techniques spécifiques et des missions particulières qui influent directement sur la sensibilité des instruments. Les spécifications de la sensibilité varieront également en fonction de l'éclairement solaire, de l'objet des mesures et même de l'âge des instruments.

4.1 Sensibilité des détecteurs

La sensibilité d'un détecteur du SETS fonctionnant à des fréquences supérieures à 3 000 GHz varie par type de détecteur. Des exemples de sensibilité minimale sont indiqués à la Fig. 1 pour six systèmes du SETS fonctionnant au-dessus de 3 000 GHz.

FIGURE 1
Luminance minimale détectable de plusieurs systèmes du SETS
fonctionnant au-dessus de 3 000 GHz



Note – Des points sont placés sur des raies spectrales utilisées pour les observations. Étant donné que le Système C réalise des observations dans plus de 200 bandes et le Système E1 dans plus de 2 300 bandes, les sensibilités des détecteurs sont représentées par une seule ligne.

1804-01

4.2 Température effective de la Terre

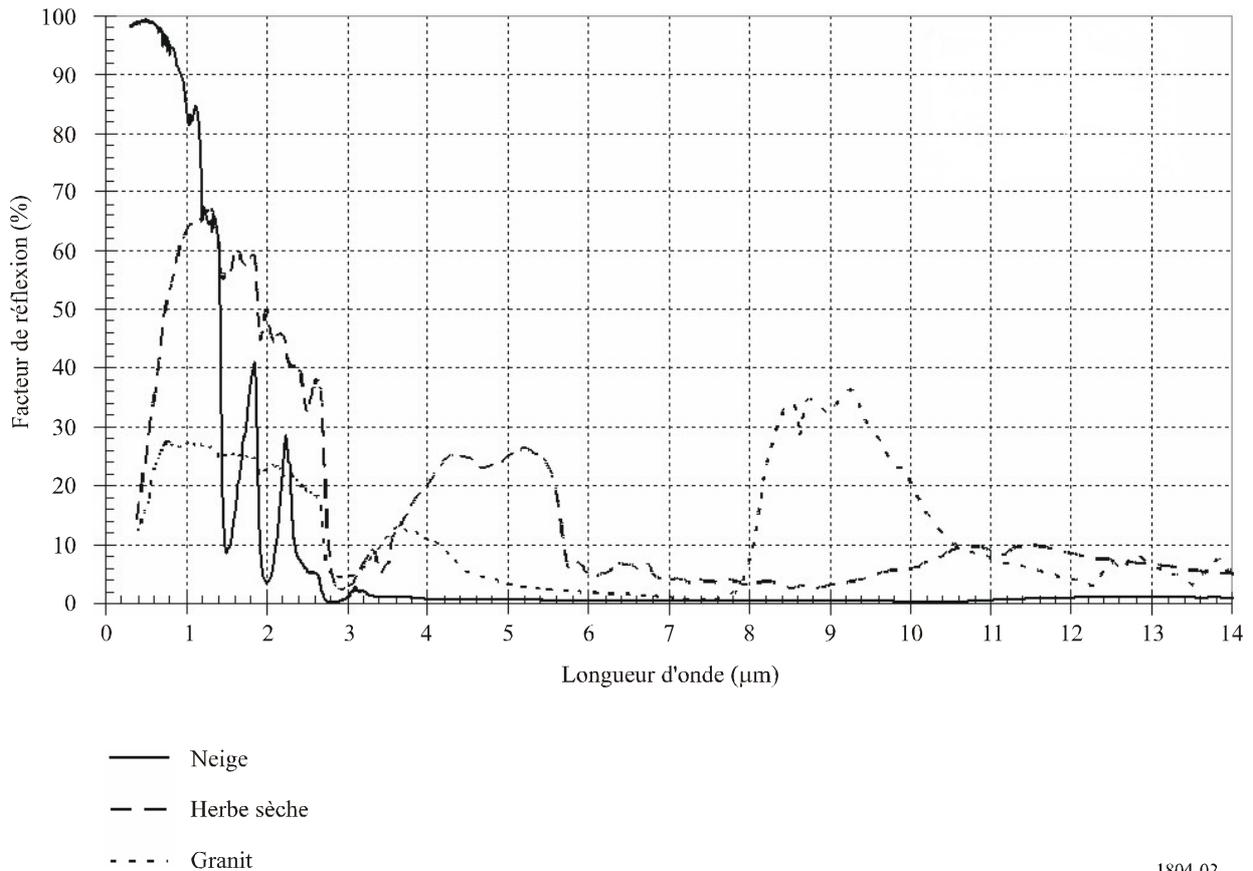
La température effective de la Terre varie en fonction du pouvoir émissif de l'objet dans le champ de vision du détecteur ainsi que du facteur de réflexion de l'objet dans les longueurs d'onde qui

l'éclairent. Les détecteurs du SETS fonctionnant à des fréquences supérieures à ~ 420 THz ($< 0,7 \mu\text{m}$) réalisent généralement des mesures fondées sur la réflectivité. Les détecteurs du SETS fonctionnant au-dessous ~ 420 THz, en particulier au-dessous de 100 THz, réalisent généralement des mesures fondées sur le pouvoir émissif.

Les systèmes du SETS fonctionnant au-dessus de 3 000 GHz sont en mesure de distinguer les différents matériaux observés au sol grâce à des profils du facteur de réflexion qui seront visualisés sur des gammes spectrales de plusieurs centaines de THz (plusieurs μm). Ces profils du facteur de réflexion sont illustrés, à titre d'exemple, à la Fig. 2.

FIGURE 2

Profils du facteur de réflexion de différents matériaux



1804-02

Les détecteurs du SETS fonctionnant au-dessus de 3 000 GHz qui mesurent le pouvoir émissif supposent généralement que l'objet émet des rayonnements à l'image d'un corps noir avec un pouvoir émissif moyen inférieur à 1,0. Selon la théorie du corps noir, une surface absorbe tous les rayonnements incidents et possède l'émission radiative maximale possible par rapport à sa température. Le pouvoir émissif d'un objet est régi par trois fonctions: la loi de déplacement de Wien, la loi de Stefan-Boltzmann et la fonction de Planck.

La loi de déplacement de Wien dispose que la longueur d'onde d'une émittance énergétique spectrale maximale, λ_M , est inversement proportionnelle à la température de l'objet.

$$\lambda_M = \frac{A}{T} \quad \mu\text{m} \quad (1)$$

où:

A : constante de Wien (2 897 K· μm)

T : température (K).

La loi de Stefan-Boltzmann dispose que la puissance totale émise par unité de surface d'un corps noir, S , est proportionnelle à la puissance quatre de sa température.

$$S = \sigma_B T^4 \quad \text{W/m}^2 \quad (2a)$$

où:

σ_B : constante de Stefan-Boltzmann ($5,671 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$).

Toutefois, dans la mesure où les matériaux naturels ne sont pas des corps noirs parfaits, la température de brillance effective est proportionnelle au pouvoir émissif moyen de la substance, ϵ , de sorte que la puissance émise s'exprime comme suit:

$$S = \sigma_B \epsilon T^4 \quad \text{W/m}^2 \quad (2b)$$

où:

ϵ : pouvoir émissif moyen ($0 \leq \epsilon \leq 1$).

On utilise la fonction de Planck pour calculer la luminance émise par des objets qui rayonnent comme un corps noir parfait.

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{k_B T \lambda}} - 1 \right)} \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr}) \quad (3)$$

où:

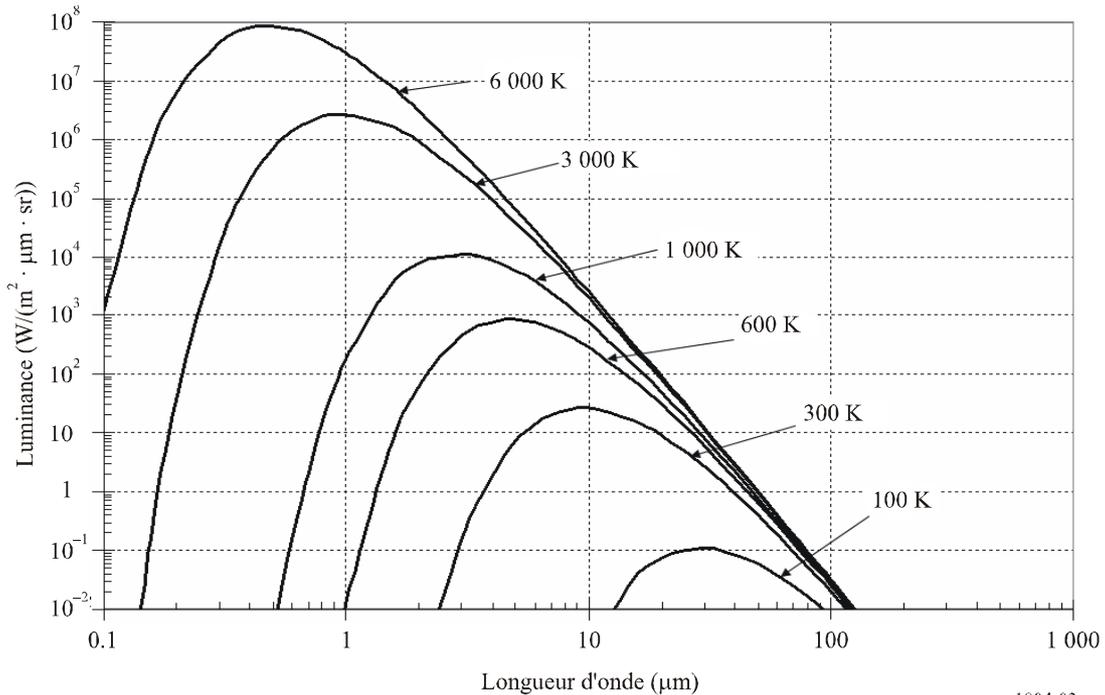
h : constante de Planck ($6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$)

c : vitesse de la lumière ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

k_B : constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$).

En appliquant ces principes, on obtient les relations indiquées à la Fig. 3 représentant la luminance théorique, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})$, pour plusieurs températures de brillance (K).

FIGURE 3

Luminance d'un corps noir parfait à plusieurs températures

1804-03

5 Résumé

Les bandes de fréquences supérieures à 3 000 GHz sont utilisées depuis de nombreuses années dans une série d'applications actives et passives du SETS. Il est prévu que ces utilisations se poursuivent, voire augmentent, dans l'avenir. Dans les études futures, il convient de tenir compte des caractéristiques techniques et opérationnelles de ces systèmes qui sont détaillées aux § 2 à 4. A titre de référence additionnelle, on trouvera dans l'Appendice 1 à la présente Annexe les adresses URL des pages web officielles de plusieurs missions qui ont servi de bases aux systèmes définis au § 2.

Appendice 1 à l'Annexe 1**Sites web officiels de différents détecteurs du SETS fonctionnant au-dessus de 3 000 GHz**

Advanced Along Track Scanning Radiometer (AATSR) (Radiomètre AATSR):

<http://envisat.esa.int>

Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) (Sondeur infrarouge de l'atmosphère):

<http://airs.jpl.nasa.gov/>

Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) (Radiomètre spatial de pointe pour l'étude de la réflectance et des émissions thermiques terrestres):

<http://asterweb.jpl.nasa.gov/>

Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) (Radiomètre perfectionné à très haute résolution):

<http://www.esa.int/esaLP/LSmetop.html>

Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type-2 (AVNIR-2) (Radiomètre de technologie avancée dans le visible et le proche infrarouge de type 2):

<http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/about/avnir2.htm>

Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) (Appareil de cartographie thématique amélioré):

<http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/etm+.html>

Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) (Altimètre laser pour les géosciences):

<http://glas.gsfc.nasa.gov/>

Geostationary Earth Radiation Budget (GERB) (Instrument de mesure du bilan radiatif terrestre sur orbite géostationnaire):

<http://www.esa.int/specials/msg>

Global Imager (GLI) (Imageur mondial):

<http://suzaku.eorc.jaxa.jp/GLI/ov/sensor.html>

Global Ozone Monitoring Experiment (GOME-2) (Expérience de surveillance mondiale de l'ozone):

<http://www.esa.int/esaLP/LSmetop.html>

Greenhouse gases Observing Sensor (GOS) (Détecteur d'observation des gaz à effet de serre):

http://www.jaxa.jp/missions/projects/sat/eos/gosat/index_e.html

High Resolution Infrared Sounder (HIRS) (Sondeur en infrarouge à haute résolution):

<http://www.esa.int/esaLP/LSmetop.html>

Hyperion (Hypériorion):

<http://eo1.usgs.gov/hyperion.php>

Improved Limb Atmospheric Spectrometer-II (ILAS-II) (Spectromètre perfectionné du limbe atmosphérique):

<http://www-ilas2.nies.go.jp/en/project/ilas2outline.html>

Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI) (Interféromètre de sondage atmosphérique dans l'infrarouge)

<http://www.esa.int/esaLP/LSmetop.html>

Lightning Imaging Sensor (LIS) (Imageur d'éclairs):

http://trmm.gsfc.nasa.gov/overview_dir/lis.html

Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) (Spectromètre imageur MERIS):

<http://envisat.esa.int>

Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding (MIPAS) (Interféromètre MIPAS):

<http://envisat.esa.int>

Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) (Spectromètre imageur à résolution moyenne):

<http://modis.gsfc.nasa.gov/>

Microwave Radiometer (MTVZA-OK) (Radiomètre hyperfréquences):

<http://kargonet.narod.ru/rab2/mtvza.htm> (russe seulement)

Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping (PRISM) (Instrument PRISM):

<http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/about/prism.htm>

SCIAMACHI:

<http://envisat.esa.int>

Space Environment Monitor (SEM) (Moniteur d'environnement spatial):

<http://www.esa.int/esaLP/LSmetop.html>

Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI) (Imageur visible et infrarouge amélioré non dégyré):

<http://www.esa.int/specials/msg>

Stratospheric Aerosol and Gas Experiment (SAGE III) (Expérience SAGE III):

<http://www-sage3.larc.nasa.gov/instrument/>

Stratospheric Aerosol and Gas Experiment (SAGE III) (Expérience SAGE III):

<http://www-sage3.larc.nasa.gov/instrument/>
