L'imagerie géostationnaire et son évolution

Alain Ratier[1], **Hervé Roquet**[2], **Johannes Schmetz**[1] **et Stéphane Sénési**[3]

(1) Eumetsat, Am Kavalleriesand 31, D-64295 Darmstadt - ALLEMAGNE
ratier@eumetsat.de
(2) Météo-France, Direction de la production,
Centre de météorologie spatiale - Lannion
(3) Météo-France, Direction de la prévision - Toulouse

Résumé

Après un bref rappel sur le programme *Météosat*, l'évolution de l'imagerie géostationnaire est illustrée par une description du potentiel de l'imagerie des satellites européens *Météosat de seconde génération (MSG)*, cette mission étant représentative de l'évolution constatée au plan international. Les bénéfices attendus de ces nouvelles observations, tant pour la météorologie opérationnelle que pour les disciplines connexes, sont brièvement présentés. La nécessité d'un effort de développement soutenu est soulignée comme une condition de l'usage optimal des données produites par le système *MSG*. Les perspectives ultérieures d'évolution sont esquissées.

Abstract

Geostationary imagery and its evolution

Following a brief summary of the *Meteosat* programme, the evolution of geostationary imagery is illustrated by the description of the potential of the European *Meteosat Second Generation (MSG)* mission, considered to be representative of current international developments. The benefits expected from these new observations in the field of operational meteorology and other related disciplines are introduced. The need for a sustained research and development effort is stressed as a condition for the optimum use of *MSG* output. The prospects for future evolution are sketched.

De Météosat à MSG

Les satellites météorologiques opérationnels constituent depuis plusieurs décennies une composante essentielle de la Veille météorologique mondiale, en fournissant des observations répétitives et cohérentes de l'atmosphère et des surfaces sous-jacentes.

En Europe, les satellites géostationnaires de la série *Météosat* produisent depuis vingt-cinq ans des images du disque terrestre dans trois bandes spectrales, à la cadence d'une prise de vue toutes les 30 minutes (figure 1). *Météosat 1* a été lancé en 1977 pour une mission expérimentale, mais il a remporté un tel succès que le service a pris une dimension opérationnelle dès le lancement de *Météosat 2* en 1981. Quatre autres satellites ont été lancés en 1988, 1989, 1991 et 1993, le premier sous l'égide de 1'Agence spatiale européenne (ESA en anglais), les trois suivants devenant la propriété d'Eumetsat. Un septième satellite de même conception a été construit dans le cadre du programme *Météosat de transition* d'Eumetsat et lancé en 1997. Actuellement, les satellites *Météosat 5*, *6* et *7* fournissent des observations à partir de 0 degré de longitude et de 63 degrés de longitude est. Ils couvrent une zone géographique qui s'étend de l'Atlantique à l'océan Indien. Ce service devrait être poursuivi jusqu'en 2005.

Le canal visible à large bande (0,4 - 1 µm) de l'imageur de *Météosat* offre une résolution spatiale de 2,5 km au nadir, tandis que les deux canaux infrarouges ont une résolution de 5 km. L'un des canaux infrarouges est centré dans une fenêtre de transparence atmosphérique (à 11 µm), alors que l'autre opère dans une bande d'absorption de la vapeur d'eau à 6,7 µm.

Malgré leur caractère multispectral assez limité, ces images disponibles en temps réel sont déjà très utiles pour la caractérisation et la classification des systèmes nuageux et des phénomènes météorologiques à évolution rapide, grâce à leur répétitivité, à leur qualité géométrique et à leur cohérence spatiale et temporelle. En outre, la corrélation d'images successives dans chacun des trois canaux permet d'analyser le déplacement de traceurs atmosphériques comme les nuages (dans le visible et à 11 µm) et les structures du champ de vapeur d'eau (à 6,7 µm), puis d'extraire des estimations quantitatives du champ de vent à l'altitude représentative de ces traceurs (Schmetz et al., 1993 ; Velden et al.,

Figure 1 - Juxtaposition d'images prises le 19 novembre 2002 par *Météosat 7* dans les trois canaux. De gauche à droite, canal visible (12 h UTC), canal infrarouge thermique (12 h UTC) et canal vapeur d'eau (6 h 30 UTC). (© Eumetsat, 2002)

Figure 2 - Le satellite *MSG 1* est fixé sur le lanceur, dans un bâtiment du Centre spatial guyanais, à Kourou, quelques jours avant son lancement en août 2002. (© ESA & CNES/Service optique CSG)

1997). Ces mesures de vent sont assimilées par les modèles de prévision numérique (Pailleux, 2002), au même titre que les informations sur le contenu intégré en vapeur d'eau extraites des observations à 6,7 µm. Le traitement des images produit d'autres paramètres semi-quantitatifs, notamment la température de surface de la mer (à 11 µm) et des indicateurs de précipitations convectives utilisés par le Programme mondial de recherche sur le climat (Levizzani et al., 2001).

Il y a tout lieu de penser que le rôle de l'imagerie géostationnaire restera central au cours des prochaines décennies, les progrès de la technique et de la science permettant de répondre à l'évolution parallèle des besoins des utilisateurs opérationnels. C'est pourquoi l'Europe s'est engagée dans le développement d'un nouveau satellite appelé *Météosat de seconde génération* ou *MSG* (figure 2), dont le premier exemplaire *MSG 1* a été lancé en août 2002. Plus généralement, la mission d'imagerie des satellites *MSG* illustre parfaitement l'évolution constatée au plan international et préfigure les capacités d'imagerie dont les satellites géostationnaires américains *Goes* disposeront dans le futur.

Avec ce système *MSG* mis au point grâce aux efforts conjugués de l'ESA, d'Eumetsat et de l'industrie européenne, les États membres d'Eumetsat disposeront en 2003 de la mission d'imagerie géostationnaire la plus performante au monde. Cette mission sera complétée par l'emport du radiomètre bicanal à large bande Gerb (Geostationary Earth Radiation Budget) destiné à la mesure du bilan radiatif. Le saut quantitatif et qualitatif sera considérable, l'imageur Seviri de *MSG* devant produire environ 18 fois plus de données que son prédécesseur sur *Météosat*. La capacité multispectrale sera multipliée par 4, puisque l'on disposera de deux canaux visibles, de neuf canaux dans le domaine infrarouge (de 1,6 à 13,4 µm) et d'un douzième canal visible HRV à large bande ne couvrant qu'une partie du disque terrestre (figure 3 et tableau 1). Il en va de même de la résolution spatiale qui passera de 2,5 km à 1 km au nadir pour le canal visible à large bande et de 5 à 3 km pour tous les autres canaux. La cadence de prise de vue sera doublée et passera à une prise de vue toutes les 15 minutes.

Tableau 1 - Les douze canaux de l'imageur Seviri de *MSG* et leurs applications.

Canal	Bande spectrale (µm)	Objectif - Utilisation
HRV	0,5 - 0,9	Vent à l'altitude des nuages (haute résolution). Texture des nuages.
VIS 0,6 & VIS 0,8	0,56 - 0,71 & 0,74 - 0,88	Nuages, discrimination nuages-végétation. Vent à l'altitude des nuages (de jour). Index de végétation. Aérosols. Albédo de surface.
SWIR 1,6	1,50 - 1,78	Discrimination neige-nuages. Aérosols (en combinaison avec les canaux VIS). Stress de la végétation.
IR 3,9	3,48 - 4,36	Nuages bas, détection des brouillards. Température de surface de la mer et des surfaces continentales (de nuit).
IR/WV 6,2 & IR/WV 7,3	5,35 - 7,15 & 6,85 - 7,85 (Bandes d'absorption de H_2O)	Contenu en vapeur d'eau et vent dans la moyenne et la basse troposphère (en air clair). Contribution au calcul d'indices d'instabilité. Altitude des cirrus.
IR 8,7	8,30 - 9,10	Détection des cirrus fins. Phase des nuages (eau-glace).
IR 9,7	9,38 - 9,94 (Bande d'absorption de O_3)	Ozone total. Vent au voisinage de la tropopause (air clair). Contribution au calcul d'indices d'instabilité.
IR 10,8 & IR 12,0	9,80 – 11,80 & 11,00 – 13,00	Température du sommet des nuages. Index de précipitations (convectives). Détection des cirrus. Inertie thermique des sols et hydrologie. Température de surface de la mer et des surfaces continentales.
IR 13,4	12,40 – 14,40 (Bande d'absorption de CO_2)	Discrimination des cirrus et des nuages semi-transparents. Altitude du sommet des nuages fins. Contribution au calcul d'indices d'instabilité.

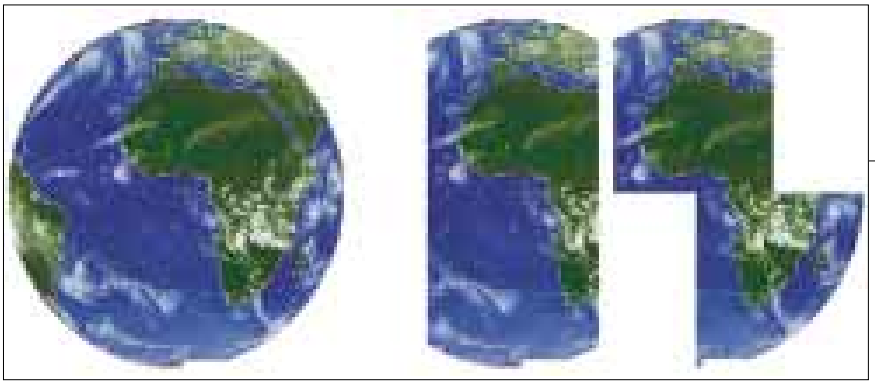

Figure 3 - Couverture de l'imagerie *MSG* pour le canal visible à bande large (à droite, 1 km de résolution au nadir, couverture programmable) et pour tous les autres canaux (à gauche, 3 km de résolution au nadir). Dans tous les cas, la cadence de prise de vue est d'une image toutes les 15 minutes.

Cet accroissement des capacités par rapport à *Météosat* répond avant tout à l'évolution des besoins de la prévision immédiate et de la prévision à très courte échéance, mais améliorera également la couverture, la qualité et la résolution des mesures assimilées par les modèles de prévision numérique à moyenne échéance, comme le vent et l'humidité dans la basse et la moyenne troposphère.

L'imagerie par Seviri, un outil privilégié de la prévision immédiate

La prévision immédiate s'appuiera notamment sur la diversité spectrale des sept canaux situés dans des « fenêtres » atmosphériques et sur l'accroissement de la résolution horizontale pour cartographier les propriétés des nuages (phase, propriétés optiques, température du sommet, texture, propriétés radiatives, etc.) et relier leur évolution à la dynamique des systèmes météorologiques observés (figure 4).

La combinaison de ces canaux, de canaux infrarouges situés dans deux bandes d'absorption de la vapeur d'eau correspondant à deux tranches verticales distinctes de l'atmosphère et de canaux infrarouges situés dans les bandes d'absorption du dioxyde de carbone et de l'ozone produira une description de la structure verticale de l'atmosphère. Bien que très sommaire par rapport aux capacités des futurs sondeurs en orbite basse (Phulpin et al., 2003) – on parle de la mission de **pseudo-sondage** de *MSG* –, cette description permettra d'estimer différents indices d'instabilité de la basse troposphère, par exemple l'instabilité potentielle de la couche 850-500 hPa (figure 5) dont l'évolution temporelle est souvent annonciatrice de développements convectifs intenses (voir aussi le site Internet [www.eumetsat.de/GII]).

Globalement, le potentiel multispectral et la grande cadence de prise de vue offriront une capacité d'alerte supérieure à celle de *Météosat* dans les cas de phénomènes à développement très rapide. L'imageur Seviri de *MSG* deviendra, au même titre que les radars météorologiques et les systèmes de détection des éclairs, un outil privilégié de la prévision immédiate et de la gestion du risque météorologique à courte échéance, grâce à sa capacité de caractériser les systèmes météorologiques actifs, leur évolution rapide et leur probabilité de développement.

L'intégration des observations de Seviri avec d'autres observations et avec des produits de modèles numériques doit être un moteur du progrès de la prévision immédiate. Elle sera réalisée par des outils et des logiciels semi-automatisés d'aide à la prévision qui seront utilisés par des prévisionnistes expérimentés et familiarisés avec ces nouvelles sources d'information. L'un des éléments distribués du secteur sol d'Eumetsat, le Centre d'applications satellitaires (SAF en anglais) pour la prévision immédiate, contribuera au développement de tels outils en fournissant aux services météorologiques européens des logiciels de base pour l'extraction d'informations des images Seviri et leur combinaison avec d'autres sources de données (voir le site Internet [www.inm.es/wwg/safhome0]).

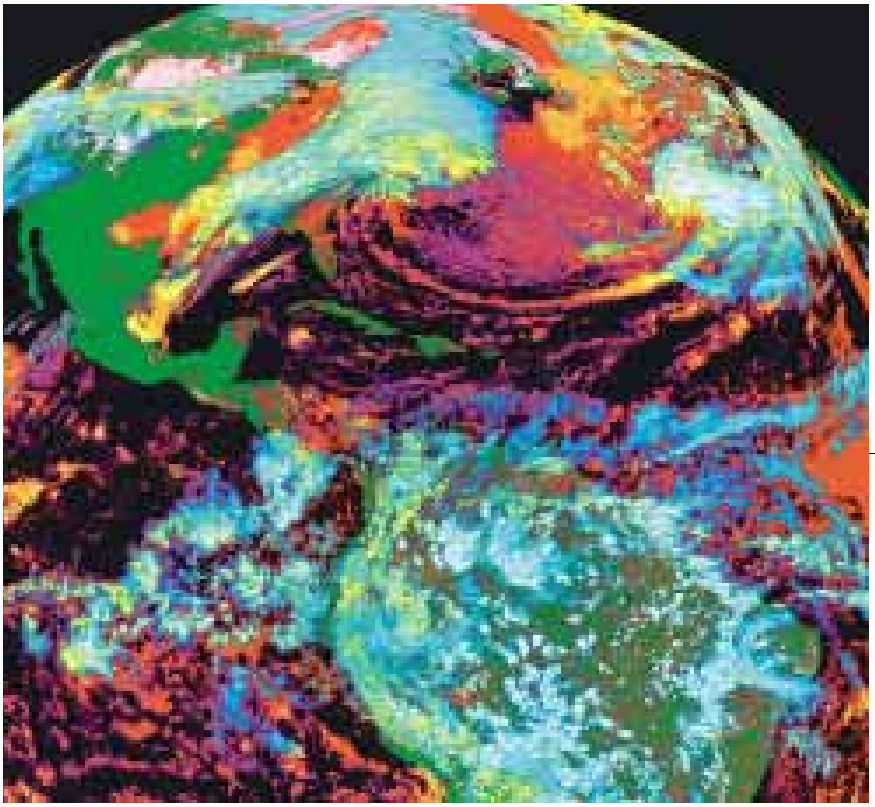

Figure 4 - Cartographie des différents types de nuages produite à partir de l'imagerie *MSG* (simulation à partir d'images *Goes 8*) en utilisant les logiciels développés par le Centre d'applications satellitaires (SAF) d'Eumetsat pour la prévision immédiate (voir aussi le site Internet [www.meteorologie.eu.org/safnwc]). Le code couleur choisi représente dans les teintes blanches les nuages à fort développement vertical (de type cumulonimbus), dans les teintes bleues les nuages élevés semi-transparents (de type cirrus), dans les teintes jaunes et brunes les nuages moyens et bas (de type stratus et stratocumulus) et en rose la neige au sol. On reconnaît le continent américain en vert. (D'après Le Gléau, 2001)

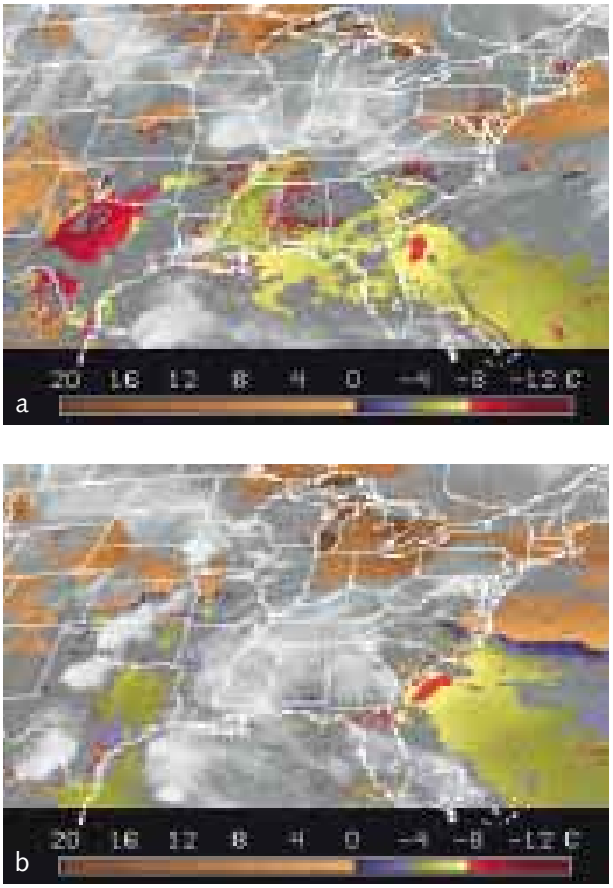

Figure 5 - Indices d'instabilité atmosphérique en air clair et développements convectifs. Les deux images présentent en superposition la nébulosité (caractérisée par l'image infrarouge de *Goes 8* sur les États-Unis, température du sommet des nuages décroissant du gris au blanc) et l'instabilité potentielle en air clair de la couche 850 - 500 hPa (exprimée en termes de différence de températures, voir code couleur) extraite des mêmes images *Goes 8* (fournies gracieusement par la NOAA) en utilisant l'algorithme de production *MSG*.
5a - Les produits *MSG* mettent en évidence le 4 juin 2001 à 16 h UTC des zones de forte instabilité (en rouge).
5b - Ces zones deviennent le siège, douze heures plus tard, de développements convectifs intenses, caractérisés par des températures du sommet des nuages très basses et correspondant à une forte extension verticale.
(D'après Koenig et al., 2001)

En s'appuyant sur ces logiciels, Météo-France a entrepris un effort de développement plus spécifique, qui produira notamment une description synthétique de chaque système convectif observé intégrant :
– le produit SAF de signalisation et de suivi des systèmes convectifs à développement rapide à partir de l'imagerie Seviri (voir le site Internet [www. meteorologie. eu.org/RDT/]) ;
– une caractérisation de l'activité électrique des orages reposant sur l'intégration spatio-temporelle des données d'un réseau au sol de détection de la foudre (Soula, 2003) ;
– des estimations des intensités de précipitations déduites des observations du réseau de radars Aramis (Parent du Chatelet, 2003) ;
– une description des effets des systèmes convectifs en termes de temps sensible fournie par le réseau Radome d'observations de surface à mésoéchelle (Tardieu et Leroy, 2003).

La synthèse sera visualisée sur le terminal des prévisionnistes, qui pourront ainsi établir des diagnostics consolidés et des prévisions intégrant leur expertise propre. Par apprentissage, ces nouveaux outils intégrés devraient aussi favoriser le développement des connaissances et améliorer, par recoupement d'informations, la fiabilité des prévisions. Ils devraient enfin étendre le potentiel de prévision aux zones les plus mal observées par les systèmes au sol. Par exemple, la corrélation des différentes sources d'informations en fonction du type de situation et du type de système observé (figure 6) permettra de produire des diagnostics et des prévisions de meilleure qualité sur des zones où l'imagerie Seviri est la seule source d'informations disponible. La couverture large et systématique de l'imagerie Seviri deviendra alors un outil d'extrapolation précieux, non seulement sur les zones océaniques, mais aussi au cœur du continent africain qui sera prochainement équipé de stations de réception *MSG* dans le cadre du projet Puma de la Commission européenne.

Météo-France développe en parallèle des méthodes d'analyse du brouillard combinant la classification nuageuse Seviri (figure 4), des sorties de modèle de prévision numérique et des données d'observation en surface. L'analyse produite constituera un apport considérable à la connaissance en temps réel du brouillard et, in fine, à sa prévision.

Un apport significatif à la prévision numérique

Le doublement de la cadence de prise de vue de l'imageur va permettre de corréler davantage de traceurs atmosphériques et, ainsi, d'améliorer le nombre des observations de vent et leur couverture spatio-temporelle (figure 7). La description du champ de vent gagnera aussi en résolution horizontale (jusqu'à 25 km avec le canal HRV) dans un facteur comparable à l'accroissement de la résolution des images ; elle gagnera également en représentativité spatiale puisque les canaux dans les bandes d'absorption de la vapeur d'eau et de l'ozone permettront d'identifier des traceurs de la dynamique atmosphérique en air clair à trois niveaux sur la verticale.

Par ailleurs, les observations de la vapeur d'eau, représentatives de la basse et de la moyenne troposphère, sont directement assimilables par les modèles de prévision numérique, tout comme celles du contenu intégré en ozone (figure 8).

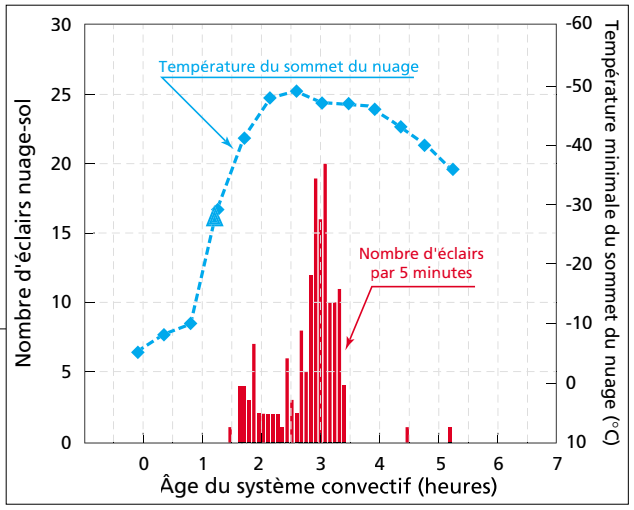

Figure 6 - Approche intégrée pour la prévision immédiate. Suivi automatisé de l'évolution d'un système convectif caractérisé par la température du sommet du nuage (courbe en pointillés bleus, échelle en degrés Celsius à droite) et par son activité électrique en termes de nombre d'éclairs nuage-sol par tranche de 5 minutes (bâtons rouges, échelle à gauche). Le premier éclair (triangle noir) est accompagné d'un refroidissement du sommet du nuage ; cette conjonction est statistiquement vérifiée et permet de prévoir l'occurrence de la foudre avec une pertinence notable. (D'après Koffi et al., 2001)

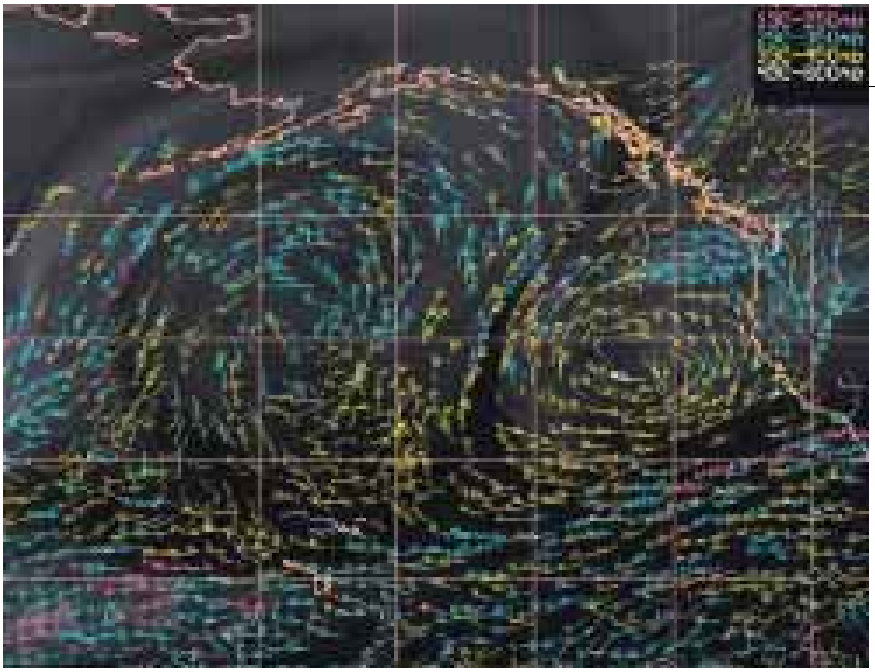

Figure 7 - Champ de vent à haute densité dérivé de l'imagerie *Goes*. Des produits comparables sont attendus de *MSG*. (D'après Menzel et al., 1983)

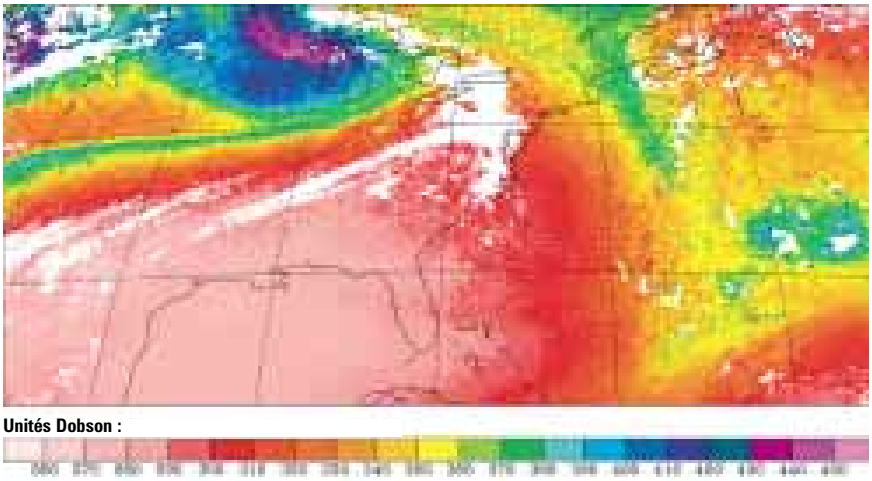

Figure 8 - Champ du contenu intégré en ozone en unités Dobson, le 23 février 1996 à 23 h 28 UTC, produit à partir de l'imagerie *MSG* (simulation à partir d'images *Goes 8*) ; 1 unité Dobson équivaut à un contenu intégré en ozone de 1 mm dans des conditions de pression standard. (D'après Orsolini et Karcher, 2000)

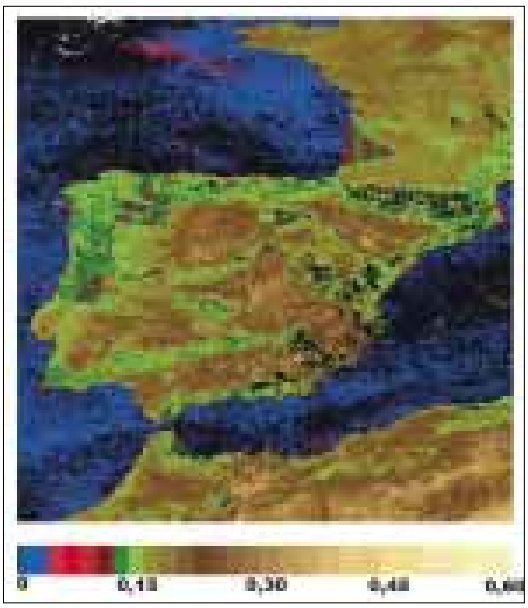

Figure 9 - Albédo de surface (rapport entre le rayonnement solaire réfléchi et le rayonnement solaire incident, ramené à l'unité de surface) estimé à partir de l'imagerie *Météosat*. Ces produits pourront être utilisés en synergie avec les observations du radiomètre Gerb de *MSG*. (D'après Pinty et al., 2000)

L'étude des océans et des surfaces continentales

Le choix des météorologistes de privilégier sur *MSG* une mission d'imagerie a des répercussions intéressantes pour les utilisateurs non météorologistes, notamment pour ceux concernés par l'observation des surfaces océaniques et continentales. En effet, en ciel clair, les canaux opérant dans les « fenêtres » atmosphériques du domaine visible et moyen infrarouge serviront à caractériser le couvert végétal et les propriétés radiatives des surfaces (figure 9) dans les zones homogènes à l'échelle du pixel de Seviri (Eumetsat et SAI, 1999). Par ailleurs, les canaux opérant dans les « fenêtres » de l'infrarouge thermique (11 et 12 µm) donneront accès à des mesures à haute cadence de la température de surface de l'océan et des terres continentales. Dans le cas des terres émergées, le fait d'avoir accès au cycle diurne sera essentiel pour l'étude des processus hydrologiques, notamment en Afrique.

Dans le domaine de l'océan et des interactions océan-atmosphère, le Centre d'applications satellitaires pour l'océan et les glaces de mer, piloté par Météo-France (voir le site Internet [www.meteorologie.eu.org/safo]), produira notamment des cartes de flux à l'interface et de température de surface de la mer destinées à l'océanographie opérationnelle (figure 10).

Perspectives

La mise en service d'un nouveau système de satellites crée à la fois des opportunités et des défis ; *MSG* n'échappera pas à cette règle. Il s'agira à court et moyen terme de se donner les moyens d'exploiter pleinement les informations devenues disponibles, par des efforts de recherche et de développements ciblés, efforts soutenus par des interactions organisées entre les acteurs opérationnels et la communauté scientifique. Cette dernière est désormais formellement associée au programme *MSG*, suite à la sélection de cinquante « investigateurs principaux » dans le cadre de l'appel à propositions de recherche émis conjointement par l'ESA et Eumetsat.

À moyen terme, la coordination internationale devrait stimuler la mise en place de missions d'imagerie géostationnaire du niveau de performances de

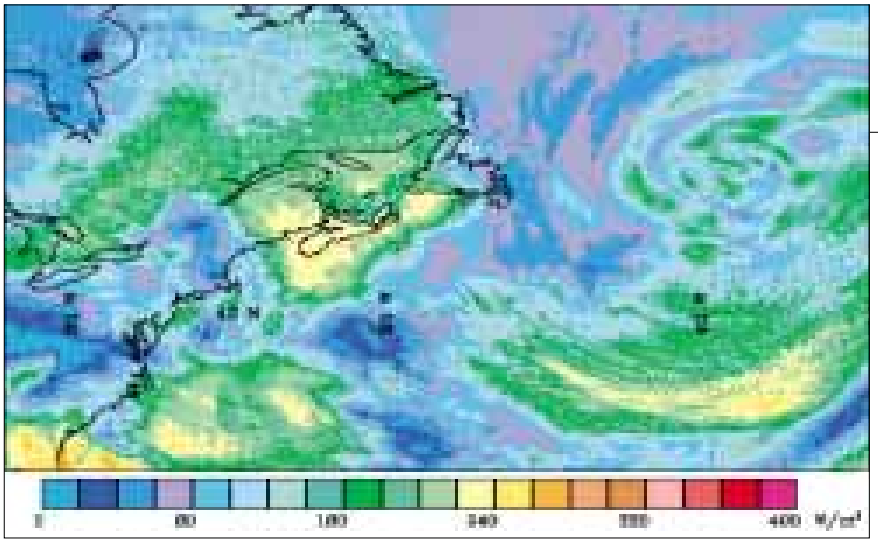

Figure 10 - Flux visible incident à la surface intégré sur 24 heures le 19 mars 2002, extrait de l'imagerie géostationnaire (produit de démonstration *MSG* obtenu à l'aide de données de *Goes 8*). (D'après Le Borgne et Marsouin, 2001)

MSG par les partenaires d'Eumetsat. Ainsi, aux États-Unis, la NOAA prévoit la mise en place d'un imageur de classe Seviri sur ses futurs satellites *Goes* opérationnels au-dessus du Pacifique est et de l'Atlantique ouest. Cet imageur devrait entrer en service avec *Goes R* dont le lancement est désormais prévu en 2012. À terme, la coordination internationale renforcera la contribution des satellites géostationnaires à la Veille météorologique mondiale, en harmonisant la définition des produits de ces systèmes et en stimulant leur échange et leur usage en temps réel.

Parallèlement, Eumetsat a entrepris une consultation des utilisateurs opérationnels afin d'évaluer l'évolution prévisible de leurs besoins à l'horizon 2015 et d'en déduire la définition des concepts préliminaires d'une mission *Météosat de troisième génération*, à étudier dans les prochaines années. Cette consultation a confirmé que l'imagerie géostationnaire resterait, grâce à sa capacité unique de suivi temporel, l'outil spatial privilégié de la prévision immédiate. Elle a également montré que, au-delà de la mission de pseudo-sondage de *MSG*, se poserait à l'échéance 2015 la question de l'intégration optimale de missions géostationnaires d'imagerie et de sondage infrarouge. La mission expérimentale Gifts (Geostationary Imaging Fourier Transform Spectrometer) du satellite *EO 3* de la Nasa (programme New Millenium), dont le lancement est prévu en 2005, devrait permettre une première analyse scientifique et opérationnelle de cette question.

Bibliographie

Eumetsat et **SAI,** 1999 : Meteosat Second Generation opportunities for land surface applications. Rapport compilé par J. Cihlar, A. Belward et Y. Govaerts à partir d'ateliers tenus à Eumetsat et à l'Institut d'applications spatiales (SAI) du Centre commun de recherche d'Ispra. EUM SP 01, 67 p.

Koenig M., S. Tjemkes et **J. Kerkmann,** 2001 : Atmospheric instability parameters derived from MSG SEVIRI observations. The 2001 Eumetsat Meteorological Satellite Data Users' Conference, p. 133-140. Disponible sur le site [www.eumetsat.de], rubrique « publications ».

Koffi E. N., S. Sénési et **C. Morel,** 2001 : Early convective development study using combined satellite and lightning data. The 2001 Eumetsat Meteorological Satellite Data Users' Conference, p. 669-676. Disponible sur le site [www.eumetsat.de], rubrique « publications ».

Le Borgne P. et **A. Marsouin,** 2001 : Ocean and Sea Ice SAF sea surface temperature and radiative fluxes: pre-operational results (2 articles). The 2001 Eumetsat Meteorological Satellite Data Users' Conference, p. 152-159 et p. 160-167. Disponible sur le site [www.eumetsat.de], rubrique « publications ».

Le Gléau H., 2001 : SAF on Nowcasting and Very Short Term Forecasting: SEVIRI cloud products. The 2001 Eumetsat Meteorological Satellite Data Users' Conference, p. 193-200. Disponible sur le site [www.eumetsat.de], rubrique « publications ».

Levizzani V., J. Schmetz, H. J. Lutz, J. Kerkmann, P. P. Alberoni et **M. Cervino,** 2001 : Precipitation estimation from geostationary orbit and prospects for Meteosat Second Generation (MSG). *Met. Applications,* 8, 23-41.

Menzel W. P., W. L. Smith et **T. R. Stewart,** 1983 : Improved cloud motion wind vector and altitude assignment using VAS. *J. Climate Appl. Meteor.,* 22, 377-384.

Orsolini Y. J. et **F. Karcher,** 2000 : Total-ozone imaging over North America with GOES-8 infrared measurements. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.,* 126, 1557-1561.

Pailleux J., 2002 : Les besoins en observations pour la prévision numérique du temps. *La Météorologie* 8e série, 39, 29-35.

Parent du Chatelet J., 2003 : Aramis, le réseau français de radars pour la surveillance des précipitations. *La Météorologie* 8e série, numéro 40.

Phulpin T., F. Rabier et **L. Lavanant,** 2003 : Le sondage satellitaire et son évolution. *La Météorologie* 8e série, numéro 40.

Pinty B., F. Roveda, M. M. Verstraete, N. Gobron, Y. Govaerts, J. V. Martonchik, D. J. Diner et **R. A. Kahn,** 2000 : Surface albedo retrieval from Meteosat. Part 2: Applications. *J. Geophys. Res.,* 105, 18113-18134.

Schmetz J., K. Holmlund, J. Hoffman, B. Strauss, B. Mason, V. Gaertner, A. Koch et **L. Van de Berg,** 1993 : Operational cloud motion winds from Meteosat infrared images. *J. Appl. Meteor.,* 32, 1206-1225.

Soula S., 2003 : Les réseaux d'observation des éclairs. *La Météorologie* 8e série, numéro 40.

Tardieu J. et **M. Leroy,** 2003 : Radome, le réseau temps réel d'observation au sol de Météo-France. *La Météorologie* 8e série, numéro 40.

Velden C. S., C. M. Hayden, S. J. Nieman, W. P. Menzel, S. Wanzong et **J. S. Goerss,** 1997 : Upper-tropospheric winds derived from geostationary satellite water vapor observations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.,* 78, 173-195.