

II^{ème} partie

L'étude du climat et de l'environnement : les apports de l'espace

Isaac REVAH *

L'ensemble des nations a pris la dimension des risques majeurs que font peser sur notre planète les activités humaines, liées notamment aux développements économique et technique. Qu'il s'agisse de l'émission dans l'atmosphère de substances chimiques, telles que les chlorofluorocarbures qui appauvrissent la couche d'ozone, ou de l'accroissement de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre, qui pourrait conduire à un réchauffement de la planète, ces phénomènes menacent gravement notre environnement.

Au-delà de ces perturbations et par suite des interactions fortes qui existent entre développement et environnement, ce sont les politiques et stratégies en matière de développement durable qui pourraient être compromises.

La communauté internationale a donc pris conscience de la nécessité d'approfondir

* Cette conférence a repris pour l'essentiel le texte publié dans la revue "L'Aéronautique et l'Astronautique" n°s 154-155 1992 - 3/4 qui figure ici.

I. REVAH

nos connaissances des processus physiques, chimiques et biologiques qui régissent l'évolution du climat et de l'environnement et de mieux en appréhender les conséquences.

Elle a très tôt perçu le rôle clé que pouvait jouer l'espace dans l'étude de la planète. En effet, la compréhension de la variabilité naturelle du climat ou de son évolution sous l'effet de facteurs humains passe par l'observation du système couplé que forment l'atmosphère, les océans et les continents, siège d'interactions complexes. Or les satellites, véritables observatoires en orbite, sont seuls capables de fournir de longues séries de mesures, précises, continues, homogènes et globales, compatibles avec la dimension planétaire des phénomènes du climat et de l'environnement. Ces possibilités ont déjà été exploitées et, au cours des vingt dernières années, les quantités importantes de données recueillies par les satellites météorologiques opérationnels (satellites NOAA, Météosat, Goes, Météor, GMS) et par les satellites scientifiques expérimentaux (Nimbus, Seasat, Mos) ont fait considérablement progresser notre connaissance du fonctionnement de la planète. Plus récemment, cette connaissance aux échelles globale et régionale s'est enrichie des apports des satellites de ressources terrestres (Landsat, Spot) ou des satellites lancés en 1991, UARS de la Nasa et Ers-1 de l'Agence Spaciale Européenne.

Les activités spatiales sont actuellement dans une période charnière. En effet, d'ici à 1996, d'autres projets spatiaux, conçus au cours de la décennie passée et répondant aux préoccupations de recherche sur le climat global, seront mis en oeuvre et étudieront l'océan, l'atmosphère et les continents (Topex-Poséidon, Radarsat, Adeos). Dans l'intervalle, les grandes puissances spatiales, Etats-Unis, CEI, Europe, Japon, Canada, se seront engagées dans la préparation des systèmes spatiaux du futur (mise en orbite à la fin du siècle, à partir de 1998-1999).

Ces systèmes de la fin du siècle, utilisant des technologies nouvelles, doivent répondre de façon plus appropriée et exhaustive aux objectifs scientifiques de l'étude du climat et de l'environnement global, et assurer la continuité requise pour les observations.

Il est important également de noter, à ce stade, que si la communauté scientifique internationale a, depuis le début des années 80, abordé la question du climat, l'analyse de ce problème est devenue plus formelle et politique en 1988 lorsque

l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) ont mis en place le Groupe d'experts Intergouvernemental pour l'Evolution du Climat (GIEC, ou IPCC : «Intergovernmental Panel on Climate Change»). Ce groupe a été chargé d'établir un rapport d'évaluation scientifique sur les problèmes relatifs à l'évolution du climat due aux activités humaines : état des connaissances, impacts et stratégies de prévention. Le rapport produit en 1990 appelle l'attention des décideurs politiques sur la gravité de la menace et sur l'urgence qui s'attache, en particulier, à renforcer et organiser l'effort d'observation et de recherche. C'est la voie qui semble la plus appropriée pour réduire l'incertitude qui subsiste encore dans les prévisions établies par les modèles climatiques, et il y a maintenant un consensus dans les instances scientifiques sur les données à acquérir, sur les orientations des programmes de recherche qui permettront d'améliorer la compréhension et de progresser dans la prévision. Ce consensus est illustré par l'existence de grands programmes de recherche internationaux : le Programme International Géosphère-Biosphère (PIGB), le Programme Mondial de Recherche sur le Climat (PMRC).

1. L'effort des agences spatiales internationales : les grands projets de l'an 2000

Les agences spatiales américaine (Nasa), japonaise (Nasda) et européenne (Esa) préparent actuellement des projets qui seront lancés à partir de 1998 et qui mettront en orbite des instruments de nouvelle génération. Ces capteurs complexes fourniront des séries continues d'observations bien adaptées à une analyse systématique en termes de grandes tendances d'évolution du climat et de l'environnement global.

La Nasa est à la tête d'un programme très ambitieux, le Earth Observing System (EOS), qui prévoit le lancement entre 1998 et 2000 d'une série de quatre satellites consacrés à l'étude des paramètres physiques du climat (satellite AM-1 en 1998, Aero et PM-1 en 2000) et du rôle de l'océan dans le cycle du carbone (satellite Color en 1998).

S'agissant des objectifs scientifiques qui orientent ce programme, on notera qu'ils s'inscrivent dans les recommandations émises par l'IPCC, en 1990, dans son rapport d'évaluation.

I. REVAH

L'investissement total consenti pour ce programme est de quelque 11 milliards de dollars d'ici à l'an 2000, dont 40% environ sont consacrés au segment spatial et 60% à l'infrastructure au sol, aux systèmes d'information et bases de données, et à la formation scientifique universitaire.

L'Europe de son côté, avec la mission Polar Orbit Earth Observation Mission de l'Esa (Poem), participe à l'effort international par un important projet de plate-forme polaire dont le coût, pour la première mission, est de l'ordre de 1,3 milliard d'Ecus, soit environ 9 milliards de francs. Le dernier scénario de l'Agence Spatiale Européenne, dit « de Munich », rassemble sur une seule plate-forme Columbus, considérée comme base technique de référence, l'instrumentation météorologique opérationnelle, des instruments pour l'observation des océans, de la physico-chimie atmosphérique et des continents. La mission répond principalement aux objectifs du PIGB et à ceux de l'étude des interactions océan-atmosphère. Elle permettra d'assurer la continuité des observations engagées avec les satellites Ers, et fournira une occasion de vol de démonstration à une charge utile météorologique opérationnelle placée sur orbite polaire.

Dans le scénario actuel, la mission Poem 1 pourrait ouvrir des perspectives dans les domaines de la météorologie opérationnelle et de la recherche scientifique. En effet, elle devrait permettre la mise en orbite ultérieure de deux missions :

- l'une opérationnelle, qui serait prise en charge par Eumetsat et qui comprendrait les instruments météorologiques ;

- l'autre, scientifique et expérimentale, développée et exploitée sous la responsabilité de l'Esa, qui comprendrait des instruments pour l'étude de l'environnement, pour l'étude de la physico-chimie atmosphérique.

De son côté, le Japon (Nasda) envisage de compléter le dispositif mondial mis en place en lançant à la même période la plate-forme J-Pop (Japanese POLar Platform).

Les instruments qui équiperont ces satellites de la fin du siècle couvriront un large éventail de capteurs nouveaux, tels que des caméras, des spectromètres optiques, des interféromètres, des radiomètres, des altimètres, des radars...et fonctionneront dans

une gamme étendue de longueurs d'onde (visible, infrarouge, hyperfréquences).

2. Le Programme spatial français d'observation de la Terre : une stratégie a double dimension

Par les initiatives qu'elle a prises dans le passé dans la conception de satellites de météorologie ou d'observation de ressources terrestres, la France a joué un rôle de pionnier en Europe dans le domaine de l'observation spatiale de la Terre. C'est ainsi que le CNES s'est intéressé dès 1968 à la météorologie spatiale en concevant le projet Météosat qui a été ensuite européenisé au sein de l'Esa et utilisé sur une base opérationnelle dans le cadre de l'organisation Eumetsat (premier lancement en 1977).

De même, le projet Spot, défini en 1977 et n'ayant pu être pris en compte dans le programme de l'Esa, a été engagé par le gouvernement français en 1978, sur une base essentiellement nationale, avec la participation de la Suède et de la Belgique. Le système Spot est constitué, d'une part, d'une série de satellites -Spot 1 lancé en 1986, Spot 2 lancé en janvier 1990, Spot 3 prêt pour le lancement, et Spot 4 en cours de réalisation- et, d'autre part, d'infrastructures terrestres de contrôle, de programmation des prises de vues et de production d'images.

La stratégie du programme spatial français actuel et sa contribution à l'effort international d'étude de l'environnement prennent deux formes complémentaires qui permettent d'aborder l'étude des phénomènes aux échelles globale ou locale et régionale :

- la première consiste à mettre en oeuvre des expériences spatiales conçues sur une base scientifique qui est celle développée par le PIGB (Programme International Géosphere-Biosphère) et le PMRC (Programme Mondial de Recherche sur le Climat); elles visent la compréhension des processus du climat, la prévision de son évolution au cours des prochaines années, et l'impact de cette évolution sur les écosystèmes. Entrent dans cette catégorie le projet Topex-Poséidon, les programmes Ers et Poem de l'Esa, auxquels la France participe et, notamment, les instruments Scarab (SCanner for RAdiation Budget), Polder (Polarization and biDirection ality of Reflectance), VMI (Vegetation Monitoring Instrument) et Iasi (Improved Atmospheric Sounding Interferometer) ;

I. REVAH

- la seconde fait principalement appel au système Spot et à ses caractéristiques inédites (résolution, stéréoscopie, répétitivité) pour recueillir des données à l'échelle locale sur l'occupation des sols, sur les zones vulnérables (déforestation, érosion, désertification, environnement urbain), et sur l'impact des grands travaux sur l'environnement. Les informations ainsi obtenues sont incluses dans des bases de données statistiques multiples permettant la surveillance de l'environnement, de ses tendances et de son évolution.

3. L'étude du climat et de l'environnement global : le programme du CNES

Les thèmes retenus s'inscrivent dans l'axe des objectifs du PIGB (Programme International Géosphère-Biosphère) et PMRC (Programme Mondial de Recherche sur le Climat) et prennent en compte les spécificités et les besoins de la communauté scientifique nationale :

- pour le thème «interactions entre biosphère et géosphère», l'effort est centré sur la chimie de l'atmosphère (évolution de la couche d'ozone, gaz actifs du point de vue radiatif) et la dynamique des écosystèmes continentaux et marins ;

- pour le thème d'étude des facteurs physiques du climat, le choix porte sur l'étude de l'océan mondial (dynamique) et de l'atmosphère (flux d'énergie, cycle de l'eau, bilan radiatif).

Le programme élaboré par le CNES pour répondre à ces objectifs a été établi en gardant une cohérence avec les initiatives des autres acteurs internationaux. Il a en particulier pris en compte l'existence d'un programme européen d'observation de la Terre et la stratégie des autres grandes puissances spatiales.

Tenant compte du fait que les programmes de l'ESA sont fortement orientés par les objectifs du PIGB (Programme International Géosphère-Biosphère) et l'étude des échanges océan-atmosphère, le CNES a décidé, d'une part, de concentrer ses programmes en coopération bilatérale sur les objectifs du climat global définis par le PMRC (Programme Mondial de Recherche sur le Climat) que sous-tendent des

enjeux tant scientifiques qu'économiques (politiques énergétiques) et, d'autre part, de contribuer au programme Poem 1 (Polar Orbit Earth Observation Mission) de l'ESA pour satisfaire les besoins des scientifiques ressortissant au Programme International Géosphère-Biosphère.

La filière

"interactions géosphère-biosphère"

Dans ce cadre, le CNES a étudié un concept de mission pour un satellite d'environnement, intitulé Globsat, visant l'étude des équilibres physico-chimiques de la stratosphère et de la troposphère (variabilité naturelle de l'ozone dans la stratosphère et son évolution sous l'effet des activités humaines, cycles de l'ozone, processus photochimiques) et celle de l'évolution de la concentration des gaz actifs du point de vue radiatif (CO_2 , O_3 , CH_4 , CO ...) de la pénétration du gaz carbonique dans l'océan et de sa fixation par la biosphère continentale.

Le concept Globsat est celui d'une mission en orbite héliosynchrone comportant dans sa définition préliminaire des instruments optiques, dont la combinaison est essentielle :

- un spectromètre infrarouge, Iasi, destiné à la détermination avec une haute résolution spatiale des profils de température et d'humidité atmosphériques, à l'étude des propriétés radiatives des surfaces (nuages, sols) et à la mesure des contenus intégrés de constituants tels que le méthane, le monoxyde de carbone, l'ozone ;

- un spectrophotomètre à occultation stellaire, Gomos, capable de mesures au limbe et d'imagerie au nadir, destiné à la détermination de profils stratosphériques de composés minoritaires (dont l'ozone), de la température, des aérosols, du contenu intégré de l'ozone ;

- un radiomètre à large bande, dérivé de l'instrument Scarab, pour la mesure du bilan radiatif au sommet de l'atmosphère.

Il était prévu de compléter cette charge utile par des instruments de l'Esa (Meris).

Les études techniques de faisabilité du projet Globsat ont été achevées en 1991.

I. REVAH

Comme indiqué précédemment, l'approche nationale a été complétée par une démarche au sein de l'Esa, conjointe avec d'autres Etats membres, pour que la première mission européenne Poem 1 s'inscrive dans les objectifs du PIGB. La réunion du conseil de l'Esa au niveau des ministres (Munich, novembre 1991) a décidé d'engager, dans une première phase de son programme d'environnement, le développement d'un ensemble d'instruments formant la charge utile de Poem 1, qui répondent pour l'essentiel aux mêmes objectifs de mission et reprennent la plupart des capteurs de Globsat. Dans ces conditions, la France se prépare à contribuer au programme optionnel Poem 1 de l'Esa et envisage de retirer Globsat de sa programmation.

Toujours dans le cadre des objectifs du PIGB, la communauté scientifique européenne de la biosphère a récemment montré l'intérêt d'un instrument, VMI (Vegetation Monitoring Instrument), techniquement identique au capteur Végétation du CNES, pour le suivi de la dynamique de la végétation et des sols à l'échelle globale.

Les caractéristiques spectrales de VMI ont été choisies pour permettre d'accéder aux paramètres des couverts végétaux, tout en réduisant la sensibilité aux effets perturbateurs atmosphériques. Sa résolution spatiale de 1 km, constante dans le champ de vue de l'instrument, est bien adaptée pour les études régionales des couverts végétaux et représente un bon compromis sur l'ensemble des régions continentales pour la détermination de paramètres biophysiques. On pourrait ainsi disposer quasi quotidiennement des cartes de la couverture végétale sur l'ensemble des terres émergées avec une résolution de 1 km. Au-delà de son intérêt pour améliorer notre connaissance de la biosphère et des écosystèmes continentaux, VMI ouvre également des perspectives dans le domaine de l'agriculture et du développement. C'est en raison de ce double intérêt que la Communauté européenne soutient financièrement ce projet et que le CNES propose, si d'autres pays européens se montrent également intéressés, d'accompagner cet effort européen et d'offrir l'emport et le lancement de l'instrument à bord du satellite Spot 4 en 1996.

La filière "processus physiques du climat" : les grands projets de satellites et les programmes instrumentaux en coopération internationale

Le CNES a réservé des investissements majeurs au projet en coopération avec

la Nasa, Topex-Poséidon (1992), et aux projets Ers 1 et Ers 2 de l'Esa (1991 et 1994). Ces projets sont les principales initiatives spatiales des cinq prochaines années pour améliorer la compréhension de la circulation océanique.

L'étude de l'océan

Le programme franco-américain Topex-Poséidon a été placé dès l'origine dans la perspective de l'étude du climat et des changements climatiques. En effet, si l'on dispose aujourd'hui d'une bonne connaissance de la circulation atmosphérique et de son rôle dans le transport de l'énergie des basses latitudes vers les hautes latitudes, il n'en va pas de même en ce qui concerne la circulation océanique. On sait qu'en moyenne, l'océan et l'atmosphère contribuent de manière comparable au transport méridien, mais on ne peut estimer directement le transport par les courants océaniques, faute d'un réseau de mesures suffisant. Si les variations climatiques interannuelles sont dominées par la réponse de la circulation des couches superficielles de l'océan aux modifications de la tension du vent (cas du phénomène El Nino), les variations à plus long terme sont liées à la circulation profonde océanique dont on n'a qu'une description qualitative. La réalisation d'une mission altimétrique optimisée pour l'étude de la circulation océanique a été considérée comme une condition nécessaire pour décider le lancement de l'expérience Woce (World Ocean Circulation Experiment) du PMRC prenant en compte l'océan dans sa globalité.

La mission Topex-Poséidon vise donc la détermination de la circulation océanique globale et de sa variabilité à mésoéchelle. Le choix de la plate-forme, des paramètres d'orbite et du cycle de répétition ainsi que les spécifications instrumentales ont été dictés par les contraintes liées à la mesure de la topographie dynamique de l'océan avec la plus grande précision possible inférieure à la dizaine de centimètres. Ces options constituent l'originalité de Topex-Poséidon.

L'accord signé par la Nasa et le CNES en mars 1987 prévoit le lancement par Ariane à la mi-1992 d'un satellite fourni par la Nasa et emportant des instruments français et américains :

- un altimètre radar de la Nasa, à deux fréquences (pour la correction de trajet ionosphérique du signal radar) ;

I. REVAH

- un altimètre radar du CNES, monofréquence et d'une technologie nouvelle;
- un radiomètre hyperfréquences à trois canaux pour la correction de trajet troposphérique des signaux radar ;
- plusieurs systèmes de localisation à haute précision du satellite ; Nasa : réflecteurs laser, récepteurs GPS (Global Positioning System) ; CNES : récepteur Doris, qualifié par un vol sur Spot 2, et qui a été développé pour connaître l'orbite de Topex-Poséidon avec une précision subdécimétrique.

A partir de mesures altimétriques effectuées à une altitude de 1 336 km, on déterminera, avec une précision de 10 cm, la déformation de la surface océanique dont on déduira le sens du courant et sa vitesse.

Trente-huit équipes scientifiques de neuf nationalités dont treize équipes françaises se préparent à l'exploitation des données qui seront également disponibles pour l'ensemble de la communauté scientifique mondiale.

La France contribue également à Ers (Earth Remote sensing Satellite), important programme d'océanographie spatiale de l'Esa. Ce programme comprend le satellite Ers 1, lancé en juillet 1991 par Ariane, et un deuxième satellite, Ers 2, qui prolongera le service d'Ers 1 à compter de 1993/1994.

Le satellite Ers 1 a une charge utile nouvelle d'instruments hyperfréquences adaptés à l'observation de l'océan de jour comme de nuit, par tous les temps : un ensemble complet d'instruments (radar SAR - Synthetic Aperture Radar -, diffusionomètre, altimètre) conçus pour observer la structure des vents et des vagues à la surface, un radiomètre infrarouge pour la surveillance de la température de la surface de la mer (ATSR-IR) et un sondeur hyperfréquences pour les corrections atmosphériques (instrument français ATSR-M). Les mesures sont transmises, traitées, puis distribuées et utilisées par les laboratoires scientifiques. L'Ifremer, avec le soutien du CNES et de Météo-France et l'aide financière accordée par l'Esa, a mis en place en France le Cersat, qui est un centre d'archivage et de traitement des données de ce satellite.

Le cycle énergétique de l'atmosphère

Un des problèmes auxquels se heurte actuellement le développement de modèles climatiques est celui de l'imprécision des connaissances sur le bilan hydrique

global de la planète et des cycles énergétiques de l'atmosphère auxquels il est relié (plus du tiers de l'énergie absorbée par l'atmosphère est transmise sous forme de flux de chaleur latente à l'interface avec le sol et l'océan). Le PMRC, devant l'importance du cycle de l'eau pour l'étude du climat, et également pour les progrès de la prévision météorologique à échéance de quelques semaines ou saisonnière, a mis en place le programme Gewex (Global Energy and Watercycle Experiment) qui, pour son volet expérimental, vise la mesure fine du vent et des précipitations à une échelle compatible avec la maille des modèles de circulation générale, mesure actuellement hors d'atteinte des instruments passifs existants.

Du fait de leur caractère très ambitieux sur le plan instrumental, de telles missions, centrées sur les régions tropicales, ne sont pas concevables avant 2005.

Les instruments envisagés sont :

- un lidar Doppler pour étudier les profils de vent dans la troposphère et la couche limite planétaire, évaluer le transport d'humidité et la divergence à grande échelle du vent ;

- un radar "pluie" pour observer le taux de précipitation dans la troposphère et la couche limite planétaire et évaluer la libération de chaleur latente.

Dans la programmation du CNES ces objectifs étaient pris en compte dans le projet Best, qu'on prévoit maintenant d'éclater en deux projets de satellites plus petits et plus focalisés thématiquement, pour des raisons financières et des raisons tenant à la faisabilité technique (en particulier l'embarquement de deux types d'instruments actifs sur la même plate-forme) et à la possibilité de coopération. En effet, les discussions sont en cours avec nos partenaires de la Nasa (pour le lidar) et, la Nasda -Japon- (pour le radar) afin d'examiner les possibilités éventuelles de partenariat sur ces programmes.

***Les projets instrumentaux :
une contribution significative aux investigations sur le climat global***

Quelques possibilités d'emports sont offertes à la communauté internationale à bord de satellites nationaux dont le lancement est prévu entre 1995 et 1998, ce qui

I. REVAH

doit permettre de disposer, au plus tôt, d'informations cruciales relatives aux processus ayant un effet direct sur l'homme et le milieu dans lequel il vit.

Dans cette perspective, la France a choisi de jouer pleinement la carte de la coopération internationale en participant avec l'Italie à l'étude de l'instrument Iasi et en prenant l'initiative de réaliser les instruments Scarab et Polder dont l'embarquement est prévu respectivement sur les satellites Météor de la Russie et Adeos (Advanced Earth Observation Satellite) du Japon.

Scarab (Scanner for Radiation Budget) est un radiomètre à balayage destiné à l'étude du bilan radiatif du système Terre-atmosphère sur une longue période, conduit en coopération franco-russe avec une participation allemande. Le bilan radiatif au sommet de l'atmosphère traduit la différence entre le flux solaire entrant et les flux radiatifs réfléchis et émis par l'atmosphère et les surfaces terrestres. C'est une grandeur directement mesurable par satellite, et l'indice possible d'une tendance à un réchauffement global. Scarab permettra de quantifier l'effet des nuages sur l'accroissement de l'effet de serre. L'embarquement de radiomètres Scarab devrait se faire sur des satellites russes de type Météor 3, à partir de 1993.

Polder (Polarization and biDirectionality of Reflectances) est un instrument équipé d'un objectif à grand champ qui prend des images bidimensionnelles à intervalles réguliers, à différentes longueurs d'onde dans le visible et le proche infrarouge, avec ou sans filtre polariseur.

Ce concept instrumental conduit à observer le même point sous différents angles durant la même orbite, avec une résolution au sol de 6 x 7 km et d'en déterminer la polarisation et la réflectance spectrale. Ces informations fourniront des moyens de caractérisation des cibles océaniques, terrestres et atmosphériques, complémentaires des autres instruments d'Adeos.

Les capacités propres de Polder et la synergie avec les autres instruments d'Adeos qui en comporte sept, dont cinq ont été sélectionnés par voie d'appel d'offres international, devraient permettre à la communauté scientifique de progresser de façon significative en matière, notamment, d'interactions aérosols-nuages-rayonnement, de cycle de CO₂, d'échanges océan-atmosphère. Polder donnera accès, d'autre

part, à la dynamique des écosystèmes marins et continentaux.

Iasi (Improved Atmospheric Sounding Interferometer) est un spectromètre infrarouge à grand champ et à haute résolution spectrale dont le concept a été défini en coopération franco-italienne (Cnes-Asi). Il permet de mesurer les profils de température et d'humidité, avec une précision et une résolution verticale grandement améliorées par rapport aux performances des instruments actuels, ainsi que le contenu intégré des composants mineurs, O_3 , CH_4 , N_2O , CO . Il permet également une caractérisation spectrale nouvelle des propriétés des nuages et des surfaces, et des mesures de très grande précision des températures de la mer et des terres émergées.

Par la voix d'Eumetsat, la communauté météorologique opérationnelle a récemment exprimé le besoin d'amélioration sensible du système de sondage atmosphérique depuis l'orbite basse. Parallèlement, pour la communauté scientifique impliquée dans la recherche atmosphérique et l'étude du changement global, la disponibilité d'un système de sondage à haute résolution constitue une étape déterminante pour la compréhension des interactions nuages-rayonnement, de l'évolution de la concentration de certains gaz à effet de serre, et des bilans de certaines espèces chimiquement actives dans la troposphère (tenue en janvier 1992 d'un séminaire " utilisateurs Iasi"). La plate-forme d'accueil envisagée pour le vol de démonstration est la plate-forme polaire européenne du programme Poem 1 (lancement en 1998).

4. L'effort de modélisation

Le traitement et la gestion des données

Les données recueillies par les capteurs installés à bord d'engins spatiaux ou par les instruments placés au sol sont utilisées dans des modèles de prévision du climat et de son évolution. Le CNES se propose de conduire une politique volontariste dans ce domaine, en soutenant les actions conduites par Météo-France, l'Université et le CNRS. Parmi les initiatives qui seront soutenues, on notera la modélisation de la dynamique de l'atmosphère (CNRS et Météo-France), de la circulation océanique (CNRS), des divers facteurs d'origine naturelle ou anthropogénique du changement climatique (Météo-France, CNRS, Université, Cerfacs).

I. REVAH

En outre, l'effort du CNES de mise en oeuvre des systèmes d'observation sera complété par une action d'accompagnement dans les domaines de la formation des chercheurs et de la mise à disposition des données. En effet, l'accroissement significatif du nombre de systèmes spatiaux consacrés à l'étude du climat et de l'environnement global, au cours de la prochaine décennie, va conduire à une augmentation considérable du volume de données à traiter par les scientifiques. Les principaux défis de cette période seront certainement la formation de cette communauté, l'accessibilité aux données et les moyens de traitement en masse. Pour faire face à ces flots de données, la conception et la réalisation de centres et de systèmes de traitement et de gestion de données suffisamment opérationnels et bien dimensionnés doivent être engagées parallèlement au développement des programmes spatiaux.

Un effort sans précédent de traitement et de diffusion de données doit être consenti et des exemples de telles entreprises, à l'état préliminaire, peuvent être donnés en Europe (réflexions au sein de l'Esa sur le réseau Genius ; centre thématique CEO du Centre Commun de Recherches de la CEE ; centre d'information international sur les données d'observation de la Terre, EOWIC, en Italie ; système Geodis en France...); aux Etats-Unis (Eos Dis, système d'informations et de données de la Nasa associé à Eos) ; au Japon, etc.

En France, les activités liées aux programmes Ers et Topex-Poséidon ont donné lieu à la mise en place de deux ensembles spécifiques.

Il s'agit, d'une part, du Cersat, développé à Brest au profit de l'Agence Spatiale Européenne par l'Ifremer avec le concours du CNES et de Météo-France pour traiter en temps différé, archiver et distribuer des données issues du diffusiomètre, de l'altimètre et du sar-vagues d'Ers 1. Le Cersat est donc un centre primaire centré sur les données élémentaires issues d'une mission.

En aval de ces centres primaires, les centres de traitement thématique ont pour vocation d'élaborer, à partir des données élémentaires d'un ou plusieurs capteurs et éventuellement de données externes, des produits directement assimilables par la recherche.

La mise en place de tels systèmes suppose une interaction étroite avec les laboratoires et la communauté utilisatrice pour la définition des produits d'intérêt

général et leur validation. Le concept Aviso, système distribué organisé en réseau, proposé par les huit organismes du Greos (Groupement pour la Recherche et les Etudes en Océanographie spatiale) est un exemple d'un tel centre thématique.

5. Spot : un outil d'aide au suivi et à la gestion de l'environnement à l'échelle locale et régionale

La gestion efficace des problèmes d'environnement nécessite de disposer d'un large éventail d'informations qui décrivent l'état initial du milieu et qui, parce qu'elles sont mises à jour régulièrement, permettent de discerner les tendances de l'évolution de ce milieu.

Les caractéristiques inédites des satellites de la filière Spot, c'est-à-dire la précision (10 et 20 m), la répétitivité (2 à 5 jours), la prise de vues stéréoscopique et la continuité des observations jusqu'à la fin du siècle sur l'ensemble du globe, en font un outil privilégié pour la gestion de l'environnement.

Spot fournit ainsi, rapidement, des informations pertinentes sur le milieu, caractérisant, par exemple :

- l'occupation des sols agricoles et urbains et ses changements (utilisation des terres, urbanisation, etc.) ;
- l'extension des forêts ;
- la délimitation des zones vulnérables, touchées par des calamités naturelles (inondations, incendies de forêts, érosion, désertification).

Actions vers les pays en voie de développement

Spot est un des éléments de la politique de dialogue entre la France et les pays en voie de développement dans la construction de leur avenir. Les informations qu'il permet d'élaborer sur l'état et l'évolution des territoires sont complétées, le cas échéant par des données exogènes et permettent une meilleure gestion de leurs ressources.

I. REVAH

Il en est ainsi de la cartographie de l'occupation du sol, réalisée par une société suédoise, aux Philippines (3 millions de kilomètres carrés) dont les résultats servent de référence pour l'établissement d'une politique de développement des ressources et de gestion de l'environnement (soutenue par la Banque mondiale). De même, on peut citer l'exemple de l'aménagement agricole et l'aide à la gestion des périmètres irrigués au Maroc sur financement du ministère des Affaires étrangères, en Indonésie avec la FAO (Food & Agriculture Organization), au Burkina Faso sur fonds CEE et FAO. Par ailleurs, des sociétés françaises d'ingénierie utilisent les données Spot pour optimiser la planification et l'aménagement rural de pays en pleine restructuration : Tchad, Indonésie (bassin de la Musi-River).

Suivi de l'environnement

La commission des Communautés européennes utilise la télédétection spatiale comme outil de base pour la réalisation d'un inventaire de l'occupation biophysique du sol de l'ensemble des Etats membres, dans le cadre du programme Corine. Il vise à la mise en place d'une base de données sur l'environnement de la Communauté européenne. Les données Spot sont utilisées en complément à d'autres données (Landsat) pour étudier plus particulièrement certaines zones complexes, des zones soumises à des pressions fortes et à des évolutions rapides. Ces inventaires exhaustifs permettent une connaissance globale du territoire (cartographie et statistique), un suivi de l'évolution, la prise en compte des interfaces et des interdépendances entre les différents milieux.

La forêt

Les écosystèmes terrestres peuvent être également étudiés individuellement ; un bon exemple de cet effort international est la forêt. La couverture exhaustive de Spot permet une évaluation précise des surfaces et la caractérisation des produits de la forêt, à savoir la composition des peuplements en termes d'essences, d'âges et de densité. Les inventaires des ressources ligneuses du Mali et des forêts en Tunisie ont ainsi été réalisés.

La forêt est un écosystème complexe qui subit d'importantes pressions. Ainsi, la déforestation sauvage a des conséquences écologiques qui peuvent avoir des ré-

percussions à l'échelle de la planète. La rapidité de l'extension des phénomènes de déforestation et les larges zones géographiques impliquées nécessitent qu'une surveillance et un suivi efficaces soient effectivement réalisés.

Ainsi, les études menées depuis deux ans par le Centre spatial brésilien (INPE) montrent aujourd'hui qu'environ 5 % des 500 millions d'hectares de la forêt amazonienne ont disparu, soit environ 25 millions d'hectares. La résolution de Spot permet de surveiller le "mitage" progressif des massifs forestiers.

Dans ce domaine d'études, on peut également citer le projet Seameo (SouthEast Asia Ministries of Education Organization) qui porte sur cinq pays d'Asie du Sud-Est et qui vise à établir un état des lieux et à évaluer l'importance de la déforestation au cours des dix dernières années (1980-1990). Les données Noaa (National Oceanic and Atmospheric Administration, Etats-Unis) constituent la base de cette évaluation; dans cette approche, les données Spot sont utilisées, d'une part, pour caler les mesures et l'interprétation qui en est faite, et, d'autre part, pour étudier plus précisément le devenir des zones déforestées.

Les risques naturels

La dégradation des terres par processus de désertification et d'érosion, due en particulier à la suppression du couvert végétal, est un problème mondial. Spot permet de localiser l'étendue globale des dégâts, sur de vastes étendues, et d'accéder aux indices majeurs de dégradation :

- cartes des pentes et des expositions grâce aux vues en trois dimensions ;
- entités morphologiques, géologiques et pédologiques ;
- couvert végétal.

Ces éléments, confrontés à des données exogènes (climatologiques, socio-économiques), permettent de mettre en oeuvre les mesures conservatoires. En prévention, ces études permettent de dresser des cartes de sensibilité à l'érosion et d'élaborer les mesures de protection à adopter.

Les possibilités stéréoscopiques de Spot, ainsi que sa répétitivité, sont des atouts

I. REVAH

considérables pour l'étude des glissements de terrain. Une étude est conduite actuellement en Bolivie (La Cuenca de La Paz) et en Colombie (Sogamoso Paz de Rio) pour évaluer le potentiel des données numériques Spot et leurs produits dérivés, pour l'établissement des cartes de vulnérabilité aux mouvements de terrain en fonction des paramètres géologiques, tectoniques, morphologiques, etc. Cette étude permettra de mettre au point des méthodes d'analyse multiparamètres nécessaires à la conception de ces cartes.

6. L'avenir : renforcer les coopérations internationales

Comme indiqué précédemment, la France est déjà largement engagée dans les programmes d'observation de la Terre à partir de l'espace et elle compte développer son action dans le cadre de coopérations internationales. C'est ainsi qu'elle participera, au sein de l'Esa, au programme Poem 1, qui verra la mise en orbite, à partir de 1998, d'instruments permettant de clarifier les processus biologiques, chimiques et physiques qui fixent le fonctionnement du système climatique et de l'environnement terrestre.

Son intérêt pour la météorologie opérationnelle, qui est à l'origine d'une part importante de nos connaissances en matière de climatologie, est illustré par son soutien des projets de météorologie de l'ESA.

Dans sa programmation des projets qui seront mis en oeuvre à l'aube du XXI^e siècle, la France a choisi de développer, dans la ligne des orientations du PMRC, des systèmes spatiaux emportant des instruments dits actifs, tels que des lidars et des radars. Ces instruments novateurs sont susceptibles de percées scientifiques nouvelles en climatologie. Les missions spécifiques les mettant en oeuvre sont à l'étude en coopération internationale sur des thèmes précis : dynamique (cycles énergétiques) et composition de l'atmosphère par une mission lidar ; cycle de l'eau et précipitations par une mission radar.

C'est dans un même esprit d'ouverture et de coopération que la France envisage avec des partenaires internationaux la poursuite du système Spot au-delà de Spot 4 avec des instruments optiques de résolution améliorée (5 mètres) ou des radars pour l'étude des ressources terrestres et de l'environnement local et régional.

La lutte pour la sauvegarde de l'environnement et la stabilisation du climat concerne l'ensemble des nations. L'attention de l'opinion publique et celle des politiques est à juste titre sollicitée par des signes révélateurs d'une possible détérioration des milieux naturels : appauvrissement de la couche d'ozone dans la stratosphère, accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, régression des forêts, pluies acides, désertification... Les analyses scientifiques récentes montrent que si l'on veut réduire les incertitudes actuelles sur les prévisions climatiques ou être en mesure de mieux estimer les effets anthropogéniques, il est nécessaire de renforcer le dispositif mondial d'observation afin de disposer des données requises par les modèles de prévision climatique. Les principales nations spatiales sont elles aussi engagées dans cette dynamique de coopération internationale et préparent des systèmes et des instruments du futur. La France est déterminée à y jouer un rôle important.

Isaac REVAH
Directeur, chargé de la mission environnement
au Centre National d'Etudes Spatiales