

# **DOCUMENT DE PROSPECTIVE**

**du comité**

**TAOB**

**et**

**Contributions des Organismes**

**BRGM, CEA, CIRAD, IFREMER, INRA,  
INSUE/CNRS, METEO-FRANCE**



<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>7</b>
1.1. ACTIONS ENGAGÉES SUITE AU PRÉCÉDENT COLLOQUE DE PROSPECTIVE .....	7
1.2. DÉMARCHE SUIVIE PAR LE COMITÉ TAOB POUR LE COLLOQUE DE PROSPECTIVE DE 2002.....	8
<b>2. LA PLANÈTE TERRE.....</b>	<b>8</b>
2.1. SYSTÈMES DE RÉFÉRENCE.....	9
2.2. TERRE PROFONDE .....	10
2.2.1. <i>Questions scientifiques</i> .....	10
2.2.2. <i>Stratégie et observables</i> .....	11
2.2.2.1. Champ de gravité.....	11
2.2.2.2. Tomographie sismologique.....	12
2.2.2.3. Champ magnétique terrestre .....	12
2.3. TERRE SUPERFICIELLE.....	13
2.3.1. <i>Questions scientifiques</i> .....	13
2.3.2. <i>Stratégie et observables</i> .....	14
2.3.2.1. Mouvements verticaux et horizontaux de la croûte terrestre .....	14
2.3.2.2. Variations relatives de l'état de surface sur les terres émergées .....	14
2.3.2.3. Variations temporelles du champ de gravité.....	15
2.3.2.4. Paramètres de subsurface .....	15
2.4. SURFACES CONTINENTALES.....	15
2.4.1. <i>Questions scientifiques</i> .....	15
2.4.1.1. Ecosystèmes terrestres .....	16
2.4.1.2. Interactions surface – atmosphère.....	17
2.4.1.3. hydrologie de surface .....	18
2.4.2. <i>Stratégie et observables</i> .....	18
2.5. OCÉAN.....	20
2.5.1. <i>Questions scientifiques</i> .....	20
2.5.1.1. Circulation .....	20
2.5.1.2. Interfaces .....	21
2.5.1.3. Ecosystèmes marins et bio-géo-chimie.....	22
2.5.1.4. Environnement littoral et côtier .....	23
2.5.2. <i>Stratégie et observables</i> .....	23
2.5.2.1. Topographie océanique .....	23
2.5.2.2. Paramètres de surface.....	24
2.5.2.3. Flux de surface .....	25
2.5.2.4. Glaces de mer.....	26
2.5.2.5. Bio-géo-chimie marine.....	26
2.5.2.6. Littoral et côtier.....	27
2.6. ATMOSPHÈRE .....	29
2.6.1. <i>Questions scientifiques</i> .....	29
2.6.1.1. Physique de l'atmosphère .....	30
2.6.1.2. Interactions nuages/aérosols/rayonnement : bilan énergétique .....	31
2.6.1.3. Chimie atmosphérique .....	31
2.6.2. <i>Stratégies et observables</i> .....	32
2.6.2.1. Dynamique et Physique .....	32
2.6.2.2. Systèmes nuageux et précipitations.....	33
2.6.2.3. Interactions nuages/aérosols/rayonnement.....	34
2.6.2.4. Chimie atmosphérique .....	36
<b><u>LE CYCLE DE L'EAU.....</u></b>	<b>39</b>
<b><u>LES GAZ A EFFET DE SERRE.....</u></b>	<b>45</b>
<b>3. L'HOMME ET L'ENVIRONNEMENT NATUREL.....</b>	<b>49</b>
3.1. RESSOURCES NATURELLES .....	49
3.1.1. <i>Géologie, métallogénie</i> .....	49
3.1.2. <i>Ressources hydriques</i> .....	50
3.1.3. <i>Ressource halieutiques et agricoles</i> .....	50
3.2. RISQUES NATURELS.....	51
3.2.1. <i>Terre solide</i> .....	51
3.2.1.1. Détecter et Prévoir .....	51
3.2.1.2. Apport du spatial.....	52
3.2.2. <i>Surfaces continentales</i> .....	53
3.2.3. <i>Océan</i> .....	54
3.2.4. <i>Atmosphère</i> .....	54
3.2.4.1. Prévision des risques .....	54
3.2.4.2. L'apport du spatial .....	56

3.3. DÉTECTION, QUANTIFICATION ET SUIVI DE L'IMPACT ANTHROPIQUE .....	56
<b>LA POLLUTION</b> .....	<b>59</b>
<b>4. BESOINS PRINCIPAUX EN MATIÈRE D'OBSERVATIONS SPATIALES .....</b>	<b>65</b>
4.1. STRATÉGIE D'UTILISATION DU SPATIAL.....	65
4.2. CONTINUITÉ DES MESURES : OBSERVATOIRES SPATIAUX .....	66
4.3. ETUDES DU SYSTÈME TERRE : MISSIONS NOVATRICES.....	68
4.3.1. Missions en préparation ou réalisables à moyen terme (dans les 10 ans) .....	68
4.3.2. études amont en préparation des missions futures.....	69
4.4. MOYENS COMPLÉMENTAIRES À L'OBSERVATION SPATIALE.....	72
4.4.1. instrumentation sol ou aéroportée .....	72
4.4.2. Ballons.....	73
4.4.3. réseaux d'observation in situ .....	73
4.4.4. Centres de données thématiques .....	74
<b>5. SYNTHÈSE ET PRIORITÉS .....</b>	<b>74</b>
<b>ANNEXE 1 : LISTE DES MEMBRES DU COMITE TAOB .....</b>	<b>77</b>
<b>ANNEXE 2 : LISTE DES PROPOSITIONS REÇUES À L'APPEL À IDÉE POUR LA PRÉPARATION DE LA PROSPECTIVE.....</b>	<b>79</b>
<b>ANNEXE 3 : EVALUATION DES MOYENS CONSACRÉS À L'ETUDE À L'OBSERVATION DE LA TERRE DEPUIS L'ESPACE DANS LES LABORATOIRES FRANÇAIS POUR L'ANNÉE 2001.....</b>	<b>83</b>
1) LISTE DES LABORATOIRES AYANT RÉPONDU AU QUESTIONNAIRE :.....	83
2) TOTAL DES PERSONNELS CONSACRÉS À L'ETUDE ET À L'OBSERVATION DE LA TERRE DEPUIS L'ESPACE (CHERCHEURS ET ITA PERMANENTS ET TEMPORAIRES) :.....	83
3) RÉPARTITION PAR TYPE DE POSTE DES PERSONNELS ÉQUIVALENT TEMPS PLEIN : .....	83
4) RÉPARTITION PAR THÉMATIQUE DU COMITÉ TAOB : .....	83
5) RÉPARTITION PAR TYPE D'ACTIVITÉS : .....	84
<b>BRGM : PROPOSITION DE CONTRIBUTION À LA RÉFLEXION PROSPECTIVE SUR L'UTILISATION DES MOYENS SPATIAUX DANS NOS DOMAINES DE RECHERCHE.....</b>	<b>85</b>
<b>CEA : POSITION DANS LE CADRE DE LA PROSPECTIVE SCIENTIFIQUE DU CNES POUR LE DOMAINE DE L'ÉTUDE ET L'OBSERVATION DE LA TERRE.....</b>	<b>87</b>
<b>CIRAD : BESOINS DANS LE DOMAINE DE L'ETUDE ET DE L'OBSERVATION DE LA TERRE.....</b>	<b>89</b>
<b>IFREMER : AVIS SUR LA PROSPECTIVE CNES .....</b>	<b>91</b>
<b>INRA : CONTRIBUTION À LA PROSPECTIVE SCIENTIFIQUE DU CNES .....</b>	<b>93</b>
<b>INSUE DU CNRS : POSITIONNEMENT SUR LA PROSPECTIVE TAOB DU CNES .....</b>	<b>95</b>
<b>MÉTÉO-FRANCE : PRÉPARATION DU SÉMINAIRE DE PROSPECTIVE DU CNES .....</b>	<b>99</b>
1- INTRODUCTION .....	99
2 – LES SATELLITES MÉTÉO OPÉRATIONNELS ET LEUR DEVENIR.....	99
MSG.....	99
EPS/METOP.....	100
Réanalyses.....	100
3 - LES SATELLITES DE RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT .....	100
3A) - Atmosphère - Interaction aérosol-nuage-rayonnement .....	100
3B) - Cycle de l'eau.....	101
3C) - Chimie atmosphérique.....	102
3D) - Océan.....	104
3E) - Risques Météo.....	105
4 - AXES DE DÉVELOPPEMENT TECHNIQUE .....	105
TROC et le concept de visée «intelligente» .....	105
AGIRS.....	106
Lidar.....	106
Radar altimètre.....	106
Ballons.....	106
Avions.....	106

5 - UTILISATION DES DONNÉES-BASES THÉMATIQUES.....	107
6 - CONCLUSION.....	107



# 1. INTRODUCTION

Si la mesure in situ fut la première et reste irremplaçable, l'observation spatiale de la Terre apparaît désormais indispensable par ses capacités de surveillance globale, condition nécessaire à l'appréhension de l'ensemble des phénomènes naturels ou anthropiques qui contrôlent notre environnement et son évolution. Le système Terre est complexe et est le siège d'interactions nombreuses à toutes les échelles entre les différents milieux. Les missions imparties aux satellites d'observation de la Terre répondent ainsi principalement à deux besoins : d'une part décrire et comprendre les processus encore mal connus propres à chaque milieu et les interactions entre les différents milieux, d'autre part suivre en permanence l'évolution des paramètres clés pour l'étude des variations du système ainsi que la surveillance et la prévision opérationnelles. Ces dernières applications sont plus du ressort des agences chargées du suivi de notre environnement que des organismes de recherche, mais il y a continuité et complémentarité entre les deux aspects.

Le développement de l'étude de notre planète depuis l'espace est donc d'abord conduit par les questions scientifiques. Quels processus sont mal documentés ? Quelle est l'évolution globale des variables clé du système Terre ? Telles sont les questions qui conduisent la communauté scientifique à proposer une nouvelle mission. Sa réussite repose ensuite sur l'exploitation optimale des mesures, incluant la modélisation numérique des phénomènes observés et l'analyse conjointe avec des mesures in situ lors de campagnes spécifiques.

La compréhension, le suivi, la surveillance et la prévision de l'évolution de notre planète, naturelle ou forcée par l'activité humaine, appellent un effort considérable à la fois des agences opérationnelles et de la communauté scientifique. Le développement d'une recherche reposant sur l'observation de la Terre depuis l'espace est dans ce contexte un enjeu considérable.

La présence d'une agence spatiale nationale forte est un atout essentiel pour la communauté scientifique française, ainsi que le montrent les résultats remarquables obtenus grâce au CNES dans de nombreux domaines de l'observation de la Terre.

## 1.1. ACTIONS ENGAGEES SUITE AU PRECEDENT COLLOQUE DE PROSPECTIVE

Regardons tout d'abord en arrière : que s'est-il passé depuis le dernier colloque de prospective (Arcachon, 1998). La géodésie spatiale a bénéficié du développement du réseau GPS et de la multiplication des instruments DORIS. Pour l'étude de la Terre Solide, le lancement de CHAMP, puis de GRACE, a représenté l'ouverture attendue depuis plus de 20 ans vers des missions de gravimétrie spatiale, avec à la clé des améliorations considérables de la connaissance du champ de pesanteur. En océanographie, JASON-1 a succédé à TOPEX-POSEIDON et participe au lancement de l'océanographie opérationnelle. Les missions d'imagerie comme POLDER ont permis de bien mieux maîtriser la réflectance bidirectionnelle pour les études de la biosphère terrestre et marine, tout en contribuant à l'amélioration des connaissances des aérosols et des nuages. L'instrument VEGETATION-1 a montré ses capacités à suivre quotidiennement la végétation de la planète. La nouvelle génération de sondes pour la météorologie opérationnelle comme AIRS et IASI vont permettre de considérables progrès dans la détermination des profils de température et d'humidité. L'imposant satellite ENVISAT a commencé sa moisson de résultats scientifiques tant en chimie de l'atmosphère qu'en océanographie. Dans le cadre des filières mini- et micro-satellites, le développement de plusieurs missions a été engagé :

Etudes de processus concernant le cycle de l'eau et le bilan d'énergie :

- Participation à la mission CALIPSO, et développement d'un microsatellite complémentaire PARASOL pour l'étude des nuages et des aérosols, en synergie avec d'autres missions météorologiques (AQUA et CLOUDSAT);
- Participation au projet de l'Agence Spatiale Européenne SMOS pour la première mesure spatiale de l'humidité superficielle des sols et de la salinité océanique;
- Proposition de la mission franco-indienne MEGHA-TROPIQUES pour l'étude des processus contribuant aux cycles hydrologiques et énergétiques dans les Tropiques, dans le contexte de la constellation internationale Global Precipitation Mission;

Etudes novatrices utilisant la filière micro-satellite :

- DEMETER pour la détection des signaux électromagnétiques associés aux tremblements de Terre;
- PICARD pour l'étude du flux d'énergie en provenance du soleil.

Il faut également mentionner l'intérêt de la communauté scientifique française pour d'autres projets en développement à l'ASE : CRYOSAT pour l'étude de la cryosphère, GOCE pour l'étude du géoïde et AEOLUS pour la détermination du champ de vent.

Enfin, la poursuite de filière imagerie à haute résolution avec le lancement de SPOT-5 (porteur de l'instrument VEGETATION-2) contribue à fournir des données utilisables dans plusieurs domaines scientifiques comme le suivi de l'occupation des sols et le fonctionnement des écosystèmes.

Conjointement à cet effort, la communauté scientifique s'est structurée, développant des compétences à tous les niveaux, depuis la conception de missions jusqu'à l'exploitation des données dans des études scientifiques du système Terre. En effet, une quarantaine de laboratoires participent directement au développement et à l'utilisation des missions spatiales en observation de la Terre, et près de 500 personnes équivalent temps plein exploitent les données satellites dans le cadre de projets scientifiques, comme le montrent les résultats de l'enquête réalisée par le CNES (voir Annexe 3). Un autre indice révélateur est le nombre d'Investigateurs Principaux sélectionnés sur des missions d'envergure telles que JASON (sur 298 personnes physiques PI et/ou coI : 111 sont françaises) et ENVISAT (700 PI européens).

## **1.2. DEMARCHE SUIVIE PAR LE COMITE TAOB POUR LE COLLOQUE DE PROSPECTIVE DE 2002**

Chaque colloque de prospective scientifique spatiale est un événement très important pour les laboratoires impliqués dans le spatial qui peuvent réfléchir à leurs priorités tout en permettant au CNES de rester au contact des besoins de la communauté scientifique, ainsi régulièrement actualisés. Mais c'est également l'occasion pour chaque groupe de la communauté centrée sur l'observation de la Terre d'écouter d'autres préoccupations et de réfléchir à des recherches à spectre plus large, chevauchant largement les limites classiques des domaines thématiques. C'est pourquoi les quatre groupes «Terre », «Océan », «Surface continentale » et «Atmosphère » qui travaillent régulièrement ensemble au sein du comité TAOB en raison des fortes et multiples interactions existant entre leurs objets d'études sont réunis pour cette réflexion prospective.

Le comité Terre-Atmosphère-Océan-Biosphère (TAOB) s'est livré à un exercice de réflexion à moyen terme, prenant en compte les missions en préparation dans les grandes agences spatiales partenaires. Il ne s'agit pas d'une prospective scientifique complète, celle-ci s'effectuant au sein des organismes de recherche pour les divers secteurs. Les scientifiques du TAOB se sont limités ici aux nombreuses questions auxquelles le spatial peut contribuer avec une attention particulière sur les axes de R&T à développer pour pouvoir réaliser les missions du futur.

Chacun des quatre groupes du comité TAOB représentant la communauté d'observation de la Terre a tout d'abord tenté d'identifier au mieux les questions scientifiques d'actualité, les processus qui restent à comprendre, les bilans qui font défaut, quelles variables sont les plus pertinentes et quelles sont les observables sur lesquelles il faut focaliser nos actions futures. Ils ont également distingué ce qui relève de la "recherche fondamentale" et ce qui se rapproche des "applications". Quelques grands problèmes transversaux ont été mis en exergue, dont certains sont d'ailleurs issus des demandes de la société, et méritent une grande attention : le CNES n'a pas seulement pour objectif de faire évoluer les sciences, il doit aussi répondre aux attentes parfois fluctuantes de nos concitoyens, faire rêver mais aussi faire réfléchir. Dans cette logique, outre les quatre domaines thématiques du comité TAOB, ont été identifiés les cycles de l'eau, du carbone et des constituants de l'atmosphère ayant un effet radiatif, qui recoupent ces quatre domaines, et des questions environnementales, comme les ressources et les risques, en mettant en exergue le défi que représente le suivi de la pollution. La dernière partie du document présente les priorités retenues par le comité TAOB en considérant que les missions en cours de réalisation seront effectivement conduites à leur terme. Le bon achèvement des missions entreprises suite aux recommandations des précédents séminaires est en effet nécessaire avant de définir de nouveaux concepts de missions pour lesquels les priorités sont regroupées en trois catégories : les mesures exigeant la continuité des observations, celles destinées à l'amélioration des connaissances et les axes de R&T. Les besoins en moyens d'accompagnement, incluant en particulier les ballons, sont ensuite présentés.

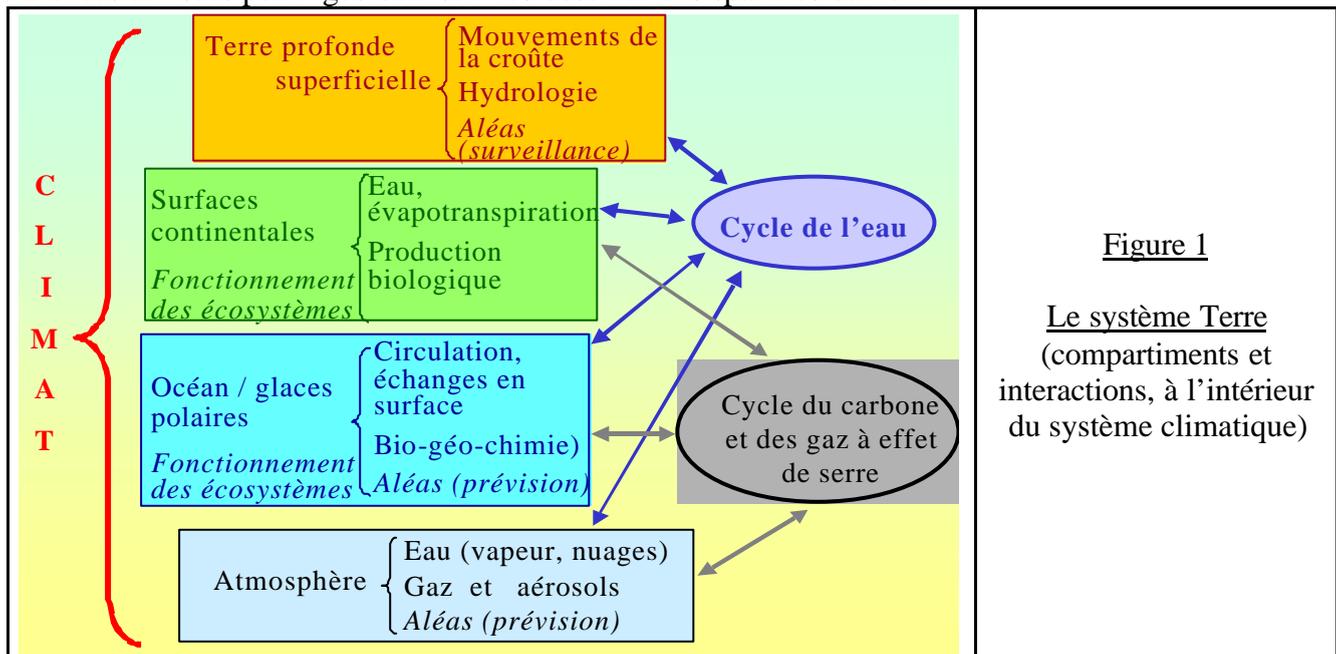
## **2. LA PLANETE TERRE**

La planète Terre est un système dynamique complexe dans lequel chaque composante interagit avec les autres sur des échelles de temps variées. Celles auxquelles nous nous intéressons sont les suivantes :

- La graine solide et le noyau liquide affecté de mouvements hydrodynamiques responsables de la dynamo terrestre;
- Le manteau, siège de mouvements de convection;
- La lithosphère mobile et déformable sous l'effet de la tectonique des plaques;
- Les surfaces continentales, support des écosystèmes et des activités humaines;
- L'océan, depuis les abysses jusqu'à sa surface, du grand large à la côte;
- Les réservoirs d'eau continentale : nappes, mers intérieures, lacs, fleuves;
- La cryosphère continentale et marine;
- Les couches limites océaniques et atmosphériques;
- L'atmosphère libre ou troposphère avec ses météores, et
- La stratosphère où ont lieu de nombreux phénomènes chimiques sous l'action du rayonnement solaire.

Il est important de caractériser non seulement l'état moyen des divers sous-systèmes de cet ensemble, mais aussi de déterminer leur variabilité spatio-temporelle pour étudier les interactions multiples qui conduisent à l'environnement climatique que nous connaissons. Il n'est désormais plus possible d'étudier un compartiment en ignorant les autres : les questions scientifiques et les interrogations de la société nécessitent des approches prenant en compte les multiples couplages et rétroactions existant entre eux. Pour illustrer ces interactions, deux exemples ont été choisis et placés en encart à la fin de ce chapitre : le cycle de l'eau et le cycle du carbone et des gaz à effet de serre.

Pour chacun des compartiments, depuis la Terre profonde jusqu'à la stratosphère, nous allons examiner quelles sont les principales questions scientifiques pour lesquelles l'espace peut contribuer à donner une réponse, mais avant nous nous intéresserons à l'utilisation de l'espace dans la définition même des références utilisées pour "géolocaliser" les observations spatiales ou non.



## 2.1. SYSTEMES DE REFERENCE

La **géodésie** se définit comme l'étude et la mesure de la forme et des dimensions de la Terre, ainsi que de sa rotation dans l'espace. Il s'y ajoute depuis longtemps l'étude et la mesure du champ de pesanteur terrestre et du géoïde, ainsi que celles des évolutions temporelles de tous ces paramètres. Les études ne se limitent plus seulement aux *vitesse*s, mais l'étude des variations de vitesses et plus généralement des *transitoires* est également à l'ordre du jour, et ceci se fait désormais au travers de séries temporelles, bien plus riches que de simples estimations de vitesses moyennes.

La définition des systèmes de référence se trouve en amont de nombreux domaines scientifiques et techniques, et beaucoup de problèmes conceptuels ont commencé à se poser vers la fin des années 80 lorsque les mesures réalisables sont devenues très précises grâce aux techniques spatiales. La situation a complètement changé durant cette période.

Les outils de géodésie fondamentale (la VLBI, méthode de radioastronomie interférométrique, le SLR, télémétrie laser sur satellites, DORIS, GPS, toutes méthodes extrêmement complémentaires et remarquablement cohérentes) permettent de calculer les positions d'un ensemble de points (quelques centaines) à la surface de la Terre. Ces stations forment ainsi un polyèdre dans l'espace qui est extrêmement précis. Mais ce polyèdre se déforme sans arrêt sous l'effet des marées terrestres et des mouvements tectoniques. On ne peut plus définir le système de référence sans utiliser des modèles géophysiques. Si la géodésie donne accès à la tectonique des plaques, à l'inverse on ne peut pas bien définir les systèmes de références mondiaux sans une excellente connaissance de la tectonique globale.

Les irrégularités de la rotation de la Terre dans l'espace présentent un très grand intérêt : cette rotation est un sous-produit automatique de la géodésie, et cette mesure est complètement indissociable de la définition des systèmes de références. Elle est connue avec une excellente précision (le pôle instantané moyenné sur un jour est déterminé à mieux qu'un centimètre), et ce type de résultat intervient comme élément de contrôle, en prenant en compte tout ce qui modifie le moment d'inertie de la Terre : effets atmosphériques, océanographiques, tectoniques, etc.

La définition du système de référence mondial est matérialisée par l'International Terrestrial Reference Frame (ITRF), solution de synthèse combinant les résultats de toutes les méthodologies et calculée régulièrement. La dernière solution (ITRF 2000) offre une cohérence inégalée jusqu'ici, meilleure que le centimètre dans l'ensemble. Il faut bien noter que l'entretien de l'ITRF repose uniquement sur des mesures spatiales, et que son amélioration, souhaitée par de très nombreuses communautés au niveau du millimètre (ex.: étude des mouvements verticaux, sismogénèse), exigera encore des efforts très importants.

## 2.2. TERRE PROFONDE

### 2.2.1. QUESTIONS SCIENTIFIQUES

Même si de grands progrès ont été faits cette dernière décennie sur la compréhension du comportement thermo-mécanique des **plaques lithosphériques océaniques et continentales**, beaucoup reste à faire. A petite échelle, par exemple, on connaît très mal la structure interne des édifices volcaniques. A quoi ressemble vraiment une chambre magmatique ? A plus grande échelle, la connaissance que l'on a de la structure des limites de plaques lithosphériques, rifts et zones de subduction, est toujours très fragmentaire. Comment interagissent magmatisme et tectonique ?

Les résultats remarquables de la tomographie sismique à l'échelle globale ont permis de comprendre un certain nombre de phénomènes dynamiques dans **le manteau terrestre** comme la pénétration des plaques plongeantes au-delà de 700 km de profondeur, la nature très hétérogène de la base du manteau, la présence de panaches dans tout le manteau. Cependant de nombreuses questions restent posées. Comment la convection est-elle organisée ? Quels sont les échelles des instabilités à l'origine des panaches ? Quelle est la structure de ces panaches ? Quel est le rôle des panneaux subductants ? Existe-t-il une relation directe entre l'interface noyau/manteau et certains "points chauds" à la surface de la Terre ? Dans quelle mesure la dynamique du noyau interagit-elle avec la dynamique du manteau ? L'ambiguïté de l'interprétation des données sismologiques en terme de propriétés thermodynamiques du manteau est un obstacle majeur à la compréhension de la dynamique du manteau. Ainsi les modèles obtenus sont généralement le résultat d'un compromis entre anomalies de vitesses volumiques et surfaces de discontinuité. Seul l'apport de données de nature physique différente mais sensibles aux mêmes conditions thermodynamiques peut permettre de progresser significativement. Un certain nombre d'outils spatiaux existe ou pourrait être développé pour apporter des éléments de réponse à ces questions.

Si l'étude du champ magnétique a permis et devrait permettre dans l'avenir de mieux contraindre les flux à la surface du noyau, les structures et dynamiques **du noyau liquide** comme **de la graine** restent très mal connues. De fait, la majeure partie du noyau reste une des régions les plus mystérieuses de notre planète. Parmi les résultats les plus intéressants obtenus ces dernières années, on citera :

- L'identification de l'organisation de grande échelle dans le noyau;
- La découverte de phénomènes oscillatoires : les oscillations de torsions;
- La découverte d'un lien entre la dynamique du noyau et la rotation de la Terre (irrégularités de la durée du jour et de mouvements du pôle de rotation);

- La découverte de mouvements stationnaires (à l'échelle historique) témoignant d'une sensibilité de la dynamique du noyau liquide à la présence de la graine solide en son centre;
- La découverte de ce que la variation du champ, et donc les mouvements à la surface du noyau, semble être rythmée par des événements soudains, les « secousses géomagnétiques ».

Ces résultats ont été obtenus grâce aux données historiques complétées depuis 1980 par celles de MAGSAT. Mais MAGSAT n'a pas permis d'améliorer notre vision de la dynamique du noyau par rapport à ce que l'on pouvait déjà faire à partir des données historiques du fait de sa durée limitée (6 mois). Et plusieurs questions fondamentales restent posées. Quelle est l'origine et la nature des secousses géomagnétiques ? Quelle est la nature exacte des ondes de torsion ? Quel est le lien entre ces ondes de torsion et les secousses géomagnétiques ? Quel est le rôle de la graine de la Terre dans l'organisation générale de la dynamique du noyau ? Quel est le couplage mécanique entre la graine solide, le noyau fluide et le manteau ? Enfin quel est rôle de la dynamique à court terme dans l'entretien du champ magnétique à long terme ?

## 2.2.2. STRATEGIE ET OBSERVABLES

Une des méthodes les plus efficaces pour sonder l'intérieur de la Terre consiste à mesurer les champs de potentiels – champ de gravité et champ magnétique - et leurs variations temporelles. La combinaison des mesures satellitaires et terrestres permet une description plus complète de ces champs dans l'espace et donc une meilleure séparation des sources, qu'elles soient internes ou externes. D'autres types de mesures spatiales fondées sur les couplages entre enveloppes peuvent également s'avérer prometteuses.

### 2.2.2.1. CHAMP DE GRAVITE

Les anomalies de gravité sont le miroir des variations spatiales de densité et permettent d'identifier et d'analyser les variations latérales en relation avec d'autres phénomènes à l'intérieur de la Terre – et de manière très complémentaire à d'autres techniques comme la tomographie sismique. Les variations temporelles, que ce soit du géoïde ou des anomalies de gravité, correspondent à tout un spectre de phénomènes d'échanges massiques dans notre environnement (entre les composantes solides, liquides, gazeuses), et leur analyse peut apporter des contraintes notables aux modèles encore incertains de ces phénomènes.

Les besoins en précision et résolution vont sans cesse croissant avec notre degré d'appréhension (mesures) et de compréhension (modèles) des phénomènes. Comme dans d'autres domaines, c'est une quête permanente. La connaissance actuelle est très insuffisante et la situation après GRACE et GOCE sera (en mettant les choses au mieux) la suivante (du point de vue global) :

- Modèle moyen (dit "statique") : résolution  $\approx 100$  km, précision (erreur cumulée à cette résolution)  $\approx 3$  mm sur le géoïde,  $\approx 0.1$  mgal sur le champ ( $1\text{mgal} = 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ );
- Variations temporelles : détectées, sur des périodes de 1 à 3 mois, jusqu'à une résolution de 300 à 400 km, avec une précision relative de 10 à 100 %.

Pour l'étude de la croûte continentale, la sensibilité des inversions (calculs de contrastes de densité) gravito-sismiques aux erreurs sur la gravité est variable en fonction de la profondeur de la structure et de sa nature. Si des mesures classiques ou aéroportées (dans l'avenir, avec la précision voulue) peuvent suffire localement, il restera des cas où seul le satellite peut être utilisé, et une résolution de 10 à 30 km peut s'avérer nécessaire (ce qui est  $\sim 5$  fois mieux que l'apport attendu de GOCE).

Pour l'étude du noyau liquide et de la graine solide, l'objectif est de détecter des variations temporelles des bas degrés du champ de pesanteur avec une précision meilleure que  $10^{-16} \text{ ms}^{-2}$  sur des périodes de temps allant de quelques centaines de secondes à la dizaine d'années. Avec une telle précision de mesure, on pourrait alors étudier la rotation différentielle de la graine, les mouvements dans le noyau fluide sur une échelle décennale, les modes propres de rotation (qui dépendent des propriétés géométriques et rhéologiques de la Terre profonde), les modes gravito-inertiels, etc. En effet, ces études ne sont que très difficilement envisageables depuis la surface du globe, car les données des gravimètres ultra-précis (réseau de gravimètres supraconducteurs) sont bruitées par des effets atmosphériques qui masquent le signal attendu, très faible, mais mesurable depuis l'espace.

**Les objectifs de la génération suivante de missions spatiales dédiées au champ de gravité porteront donc sur l'amélioration de la résolution et de la précision.**

### 2.2.2.2. TOMOGRAPHIE SISMOLOGIQUE

La tomographie sismique, comme toutes les méthodes géophysiques, souffre de la couverture limitée des stations de mesure à la surface de la Terre. En dépit des résultats spectaculaires déjà obtenus, la résolution des modèles globaux de la structure sismique de la Terre reste faible (1000 km ou plus).

La sismologie depuis l'espace pourrait contribuer à la connaissance interne via la mesure des perturbations ionosphériques engendrées par le déplacement du sol à la suite de séismes. L'enjeu à terme est de pouvoir décrire la propagation des ondes sismiques à l'échelle globale ou régionale, et donc d'acquies des données indépendamment de la densité du réseau de sismomètres existant au sol.

Cette idée est fondée sur l'existence de forts signaux liés au couplage dynamique entre la Terre solide et l'atmosphère. Au passage des ondes de Rayleigh, une onde de pression ascendante est générée dans l'atmosphère, puis amplifiée du fait de la décroissance exponentielle de la densité. Pour un déplacement au sol de l'ordre de la fraction de millimètre, l'amplitude de l'onde atmosphérique peut atteindre plusieurs centaines de mètres à 200 km d'altitude. Il s'agira donc de développer un imageur de ces signaux, tout en améliorant la connaissance de la physique du couplage entre les mouvements du sol et des couches atmosphériques.

### 2.2.2.3. CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE

La **conductivité électrique du manteau terrestre** est fonction de la minéralogie et des conditions thermodynamiques qui règnent dans le manteau. C'est par conséquent un paramètre majeur pour comprendre la dynamique du manteau. C'est en outre le seul paramètre, avec les propriétés élastiques et la densité, dont il est possible d'obtenir une distribution globale avec la profondeur. La variation de la conductivité électrique en fonction des variations thermodynamiques du manteau terrestre est différente de celle des propriétés de propagation (vitesses, atténuation, anisotropie). La conductivité électrique constitue donc une donnée complémentaire fondamentale pour comprendre la dynamique de notre planète. Seules les données magnétiques par satellite peuvent permettre de décrire avec une bonne résolution spatiale les propriétés électriques à l'échelle globale du fait de l'insuffisance du nombre d'observatoires magnétiques à la surface de la Terre. Les résultats préliminaires d'ØRSTED sont de ce point de vue très encourageants, faisant de ces études une des priorités pour ØRSTED et CHAMP. Cependant, en raison de l'effet de peau qui contraint la détermination en profondeur de la conductivité électrique (0,1-1 S/m), il faut plusieurs années d'enregistrements quasi continus du champ magnétique pour atteindre des profondeurs de l'ordre de 1500 km ou plus. Il est donc nécessaire d'envisager de poursuivre la série de satellites mesurant le champ magnétique après les satellites ØRSTED, CHAMP, SAC-C...

On sait aujourd'hui que le champ magnétique principal (qui domine en valeur absolue le champ observé à la surface de la Terre) est produit par des **mouvements au sein du noyau liquide de la Terre**, électriquement très conducteur. Grâce à MAGSAT, on a pu établir que ce champ, dominé par une structure dipolaire, possédait cependant une structure complexe à la surface du noyau. Ces structures ne sont pas que d'échelle planétaire, elles sont aussi très riches à l'échelle régionale. Les plus grandes des structures régionales sont facilement observées grâce aux réseaux des observatoires. Les 400 ans de données historiques ont ainsi permis d'en suivre l'évolution sur cette durée. Observer l'évolution du champ fournit le seul moyen direct de reconstituer les mouvements de matière dans le noyau liquide.

Récemment la mission ØRSTED a permis de montrer que la possibilité d'observer le champ magnétique en permanence depuis l'espace permettrait d'améliorer considérablement cette situation. L'analyse conjointe des données de MAGSAT et ØRSTED donne accès à la variation du champ jusqu'aux plus petites des échelles spatiales accessibles. La mission CHAMP fournit maintenant l'assurance d'une continuité de mesure jusqu'à 2006.

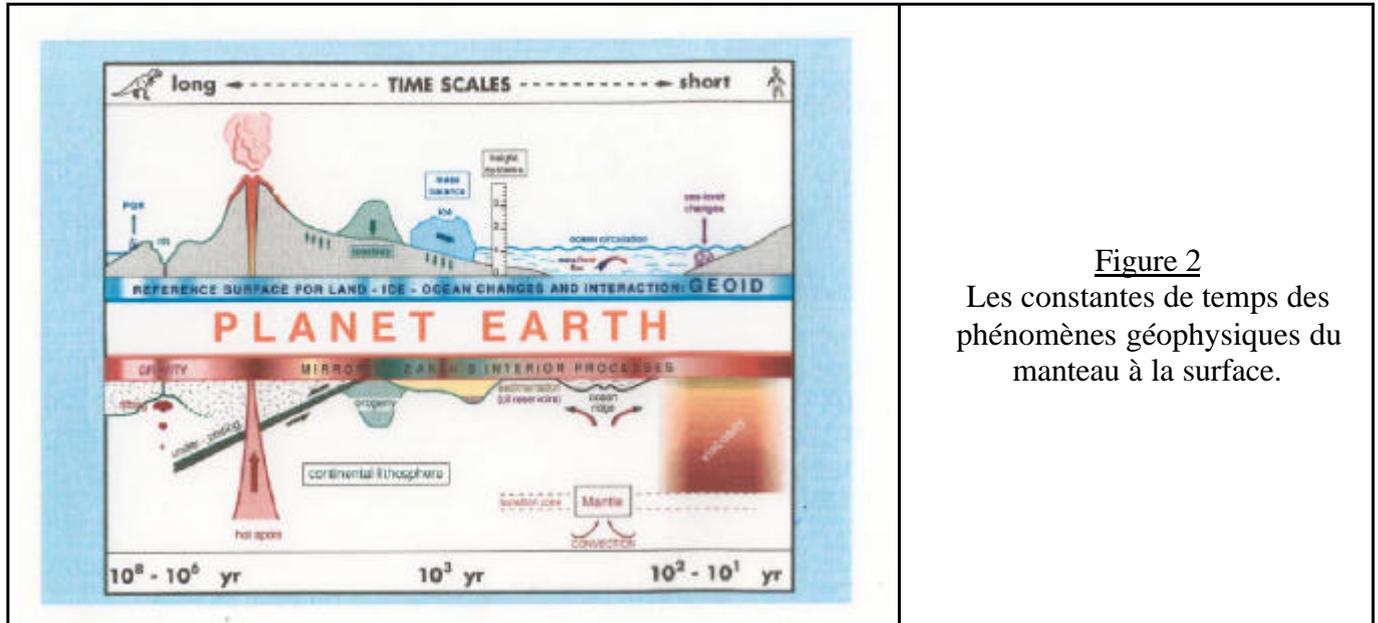
Comme il l'a déjà été souligné, les plus petites échelles spatiales du champ du noyau sont celles qui évoluent le plus vite. La comparaison de MAGSAT et ØRSTED le confirme de manière éclatante : les degrés les plus petits ont évolué de près de 50% en 20 ans. Par ailleurs, même l'évolution à grande échelle qui se fait au long terme, est rythmée par les phénomènes soudains que sont les secousses géomagnétiques.

Seule une *observation continue du champ magnétique depuis l'espace* peut permettre d'accéder à des échelles temporelles et spatiales suffisamment variées pour comprendre la dynamique complexe du noyau et contraindre la conductivité électrique du manteau terrestre.

## 2.3. TERRE SUPERFICIELLE

### 2.3.1. QUESTIONS SCIENTIFIQUES

La surface de la Terre Solide est affectée par un grand nombre de phénomènes dynamiques résultant de la dynamique interne du globe et d'interactions avec les enveloppes fluides. Elle est donc modifiée en permanence par des processus agissant sur des périodes de temps très diverses et sur des échelles variables.



Les échelles de temps vont de celle du séisme (quelques secondes) à celle de la tectonique des plaques, typiquement quelques dizaines de millions d'années, soit de 1 à  $10^{15}$ s. Les échelles spatiales vont typiquement de l'échantillon (du mm voire moins) à celle du globe (la dizaine de milliers de km), soit de 1 à  $10^{10}$ mm. Cette dynamique considérable explique la nécessité du spatial en complément des observations au sol et justifie des observations à très long terme. En outre, ceci explique des besoins de résolutions spatiales extrêmement diverses.

Une autre difficulté spécifique pour l'étude de la surface de la Terre est bien évidemment le fait que plus de 70% du globe terrestre est immergé et donc "opaque" à beaucoup de capteurs de télédétection. Cependant, les fonds des océans sont affectés par un très grand nombre de phénomènes géodynamiques toujours mal compris : l'étude de la surface de la Terre Solide ne peut se cantonner aux continents.

De la même manière, il est désormais évident qu'il faut tenir compte des interactions entre les diverses enveloppes constituant la partie externe du globe.

En ce qui concerne la **dynamique de la surface terrestre**, un des enjeux est la cinématique des plaques du 21<sup>ème</sup> siècle. Il est désormais clair que le modèle de plaques rigides, à la base de la tectonique des plaques des années 70, ne permet pas d'expliquer les zones de déformations diffuses, les déformations intraplaques de deuxième ordre et les séismes intraplaques (cf. le séisme de Bhuj en Inde ou les déformations récemment mises en évidence à l'intérieur de la partie océanique de la plaque Indo-Australienne). Un autre enjeu est la compréhension d'un des phénomènes naturels les plus complexes qui soient, le cycle sismique, phénomène qui représente une menace très importante dans de nombreuses zones très peuplées et urbanisées. Il est également essentiel de pouvoir déterminer très précisément des mouvements sur des petites zones (jusqu'à quelques dizaines de mètres), parfois très difficilement accessibles, comme les sommets des volcans, par tout temps et depuis l'espace. Enfin la connaissance de la dynamique de surface est un élément fondamental pour la détermination de la variation du niveau moyen des océans.

La détermination des **états de surface** est une composante essentielle à la mesure des processus d'érosion et de transport, sur des bassins versants de grandes dimensions (au moins  $100 \times 100 \text{ km}^2$ ). Pour évaluer

ces phénomènes de surface, il est nécessaire de bien connaître la topographie. Or, rappelons que la topographie actuelle de la Terre est globalement moins bien connue que celle de Mars et de Venus. Tout en étant une des composantes majeures du système climatique, la **branche continentale du cycle hydrologique** est encore mal connue par manque d'observations denses et globales. Pourtant, avec la température de surface de la mer, le contenu en eau des sols et la couverture neigeuse constituent d'importantes conditions aux limites des modèles climatiques globaux. Inversement, la variabilité climatique a une influence considérable sur les réserves en eaux continentales. La connaissance des champs globaux d'humidité des sols, d'eaux souterraines et d'épaisseur de neige est donc un enjeu de première importance. Cependant, à ce jour, ces champs sont essentiellement issus de modèles, avec deux approches distinctes :

- La prévision à partir des modèles couplés de circulation générale océans/atmosphère/biosphère;
- L'estimation à partir de modèles hydrologiques forcés basés sur la résolution de l'équation du bilan hydrique continental, liant précipitations, évapotranspiration, stockage et ruissellement.

Ces deux approches ont pour difficultés majeures la modélisation de l'évapotranspiration, ce qui requiert le développement de modèles sophistiqués (modèles TSVA : 'Transferts Sol Végétation Atmosphère') pour décrire les échanges complexes d'énergie et de masse entre sols, végétation et basse atmosphère, et la modélisation des transferts d'eau en surface (rivières et nappes), qui nécessite le recours à des modèles hydrodynamiques plus ou moins élaborés (voir section 2.4).

La connaissance du contenu en eau dans les couches superficielles du sol (quelques 10-10<sup>3</sup> m) à l'échelle de grands bassins fait donc partie des priorités en hydrologie afin d'établir un bilan des ressources en eau et leur évolution.

## 2.3.2. STRATEGIE ET OBSERVABLES

### 2.3.2.1. MOUVEMENTS VERTICAUX ET HORIZONTAUX DE LA CROUTE TERRESTRE

Mesurer finement les déplacements des plaques lithosphériques et leurs déformations constitue un objectif fondamental pour les années à venir. Ces mesures permettent en effet de contraindre les modèles physiques de déformation de la Terre à différentes échelles, depuis celle de la géodynamique globale jusqu'à celle d'un séisme ou d'un volcan individuel par exemple. Parmi les enjeux actuels, on peut citer :

- L'étude de la déformation globale prenant en compte les déformations inter et intraplaques ainsi que leurs variations temporelles;
- L'étude du cycle sismique et les interactions entre failles actives;
- La détermination des déformations locales des zones actives (volcans dans une phase active);
- Le suivi des stations de référence et de mesure. De nombreuses études globales sont basées sur le suivi temporel de paramètres mesurés par des stations supposées fixes dans un référentiel donné. La connaissance de la précision de la stabilité temporelle du référentiel et des mouvements éventuels des stations de mesures est donc primordiale;
- L'étude des mouvements des fonds océaniques.

Les mouvements horizontaux peuvent être actuellement très bien mesurés avec les outils de la géodésie spatiale (GPS, DORIS, etc.). L'enjeu des années à venir est la mesure des mouvements verticaux. En effet, l'étude des mouvements verticaux est beaucoup plus délicate que celle des mouvements horizontaux, car leur amplitude est généralement inférieure d'un ou plusieurs ordres de grandeur. Elle est aussi plus complexe car, plus encore que l'étude des mouvements horizontaux, elle doit faire intervenir l'ensemble du milieu physique local et régional – Terre solide, océan et eaux souterraines, atmosphère. Les mouvements verticaux impliquent des phénomènes ayant différentes échelles temporelles, de quelques minutes à plusieurs siècles. Parmi les outils spatiaux on peut citer GPS, DORIS, l'interférométrie radar, le suivi des variations temporelles de la pesanteur, etc. Pour le suivi des déplacements des fonds océaniques, les outils spatiaux peuvent servir à la transmission de l'information recueillie au fond de la mer ainsi qu'au positionnement des bouées de surface incluses dans les dispositifs.

### 2.3.2.2. VARIATIONS RELATIVES DE L'ETAT DE SURFACE SUR LES TERRES EMERGEES

On attend actuellement beaucoup de l'observation spatiale de la Terre, et en particulier une bonne compréhension des phénomènes responsables des reliefs et de leur évolution. Pour étudier les

phénomènes de surfaces tels que l'érosion, le transport de matière et plus généralement la géomorphologie sur des bassins versants de grandes dimensions, il faut être capable :

- De déterminer l'état initial de la topographie : il faut donc avoir un modèle numérique de terrain (MNT) sur la majeure partie des terres émergées avec une grille horizontale de 10-20 m et une précision verticale de 1 m,
- De mesurer régulièrement les changements de cette topographie, de l'ordre du cm.

Les missions passées ou en cours (ex : SRTM, SPOT 5/HRS) n'ont couvert que partiellement la surface des terres émergées avec une précision de la dizaine de mètres à quelques mètres.

En outre, de nombreuses indications pertinentes sont attendues, en complément des MNT, par des mesures hyperspectrales, qui permettent d'aider à déterminer de façon globale les structures géologiques. Et enfin, toutes les mesures permettant d'apprécier les variations locales de ce MNT sont d'ores et déjà très utilisées et doivent pouvoir être poursuivies de façon plus aisée (l'interférométrie différentielle donne en effet d'excellents résultats, mais elle est d'accès complexe et ne s'applique pas bien aux zones ayant un couvert végétal significatif).

A partir de telles données, il est alors possible de résoudre de nombreux problèmes, par exemple l'étude des instabilités de versants, la métrologie des failles actives durant le quaternaire, les bilans de masse érosion/ sédimentation, etc.

### **2.3.2.3. VARIATIONS TEMPORELLES DU CHAMP DE GRAVITE**

La mission GRACE a été développée pour mesurer les variations temporelles du champ de gravité sur des échelles de temps allant de 1 mois à plusieurs années. Une des applications principales de cette mission est l'étude des variations spatio-temporelles des stocks d'eaux continentales. GRACE fournira de façon globale une mesure des variations du champ de gravité avec une résolution géographique de 200 km et un échantillonnage mensuel. Sur le domaine continental, ces variations de gravité seront interprétées en terme de variations de stocks d'eaux avec une précision de quelques mm sur la hauteur d'eau (en supposant que les effets de masse de l'atmosphère pourront être modélisés – donc éliminés – avec précision). GRACE fournira un signal intégré des stocks d'eau (eaux de surface, humidité des sols, eaux souterraines, neige, glaces) qu'il conviendra de séparer à l'aide d'informations indépendantes (autres observations spatiales et/ou in situ – quand ces dernières existent -, et sorties de modèles hydrologiques). Par exemple, l'utilisation combinée de GRACE et de l'altimétrie spatiale devrait permettre de séparer les stocks d'eau de surface des eaux du sol.

### **2.3.2.4. PARAMETRES DE SUBSURFACE**

L'imagerie satellite se limite à la surface terrestre. Il est cependant essentiel de pouvoir analyser à l'échelle globale les transferts entre la surface, le sol et les aquifères. Seuls les radars basse fréquence (bandes L ou P) sont susceptibles d'apporter des informations sur les premiers mètres du sol et ainsi permettre de caractériser cette zone fondamentale. Du fait de leur basse fréquence (300-400 MHz), ces radars sont peu ou pas directionnels.

L'accès à de plus grandes profondeurs (quelques 10-10<sup>3</sup> m) à l'échelle de grands bassins fait également partie des priorités en hydrologie afin d'établir un bilan des ressources en eau et leur évolution. Cette gamme de profondeur peut être accessible à partir de sondages électromagnétiques passifs (capteurs magnétiques dans la gamme 1-10.000 Hz) à des altitudes inférieures à 100 km (sous l'ionosphère), utilisant ainsi l'activité électromagnétique naturelle (ionosphérique et orageuse) pour obtenir des profils de conductivité électrique en profondeur, un paramètre fonction de la teneur en eau des terrains superficiels.

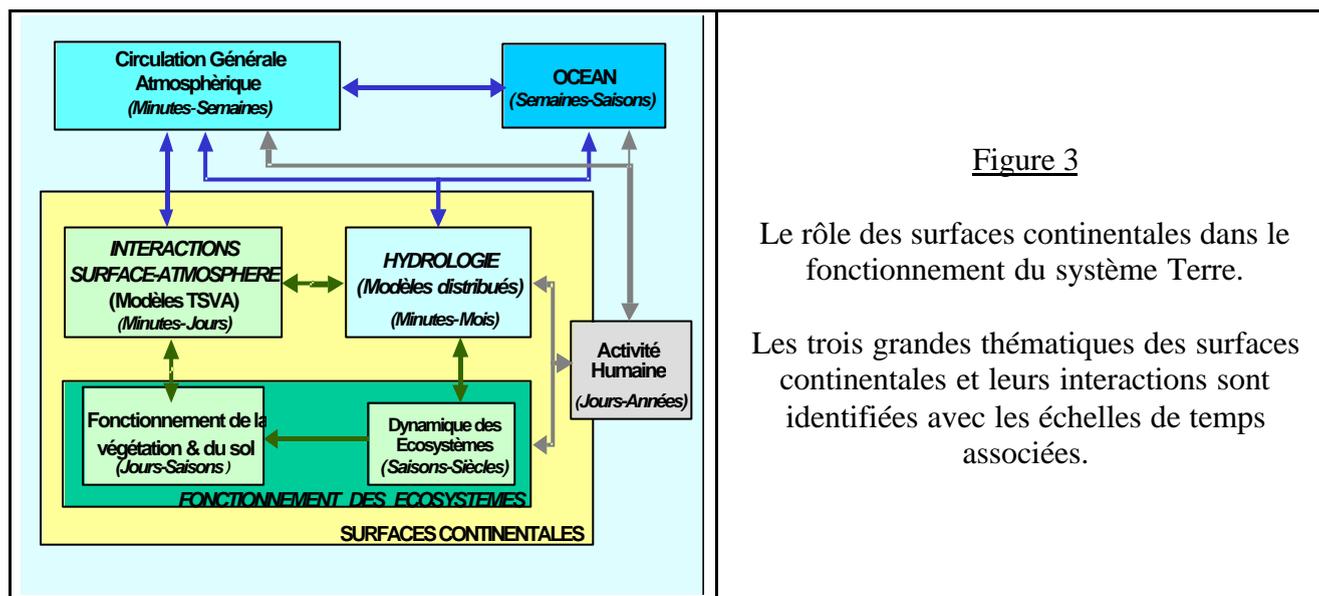
## **2.4. SURFACES CONTINENTALES**

### **2.4.1. QUESTIONS SCIENTIFIQUES**

Les surfaces continentales, qui représentent environ un tiers de la surface totale de notre globe, sont très influencées par la présence de l'homme qui, en modifiant les conditions naturelles du milieu, peut mettre en danger les équilibres fragiles du fonctionnement des écosystèmes.

Elles réagissent aussi avec les variations du climat, qu'elles soient naturelles ou induites par l'homme (émission des gaz à effet de serre) qui se traduisent par une modification globale et régionale du régime des précipitations et de la température.

Les surfaces continentales, très hétérogènes spatialement et en constante évolution, jouent un rôle primordial dans les bilans énergétique, hydrique et carboné du système terre. De nombreuses questions se posent sur leurs réactivités face aux changements climatiques et aux activités anthropiques : comment évoluent actuellement les écosystèmes terrestres, en structure, en surface (occupation et utilisation des sols) et en fonctionnement (productivité primaire nette, variation de biomasse...), et quelle tendance peut-on prédire pour les prochaines décennies ? Peut-on distinguer les changements d'origine anthropique des changements d'origine climatique ? La biosphère peut-elle agir comme traceur du changement climatique et sera-t-elle capable d'atténuer l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique en absorbant de grandes quantités de carbone ? Est-il possible d'identifier les « puits et sources » de carbone, comme le stipule le protocole de Kyoto ? Quels sont les conséquences des changements climatiques et anthropiques sur la gestion durable des écosystèmes terrestres et sur leurs capacités à produire des biens et services en harmonie avec les contraintes économiques et écologiques ?



#### 2.4.1.1. ECOSYSTEMES TERRESTRES

Par “écosystèmes terrestres”, on entend ici l'ensemble de la végétation, le sol rhizosphérique et l'atmosphère, de la canopée étendue à la couche limite de surface. Ils sont composés d'éléments minéraux et organiques et d'eau qui circulent de l'un à l'autre aussi bien verticalement qu'horizontalement. Ces écosystèmes s'organisent en unités de surface (mode de couverture des terres) dont les propriétés diffèrent selon l'échelle à laquelle ils sont appréhendés (parcelle, paysage, région).

Les écosystèmes terrestres sont à l'interface entre le sol et l'atmosphère et contrôlent ainsi les flux de matière et d'énergie entre les différents réservoirs. Ils sont au centre de très nombreuses questions scientifiques que l'on peut regrouper arbitrairement suivant :

- La production primaire, le cycle de l'eau et des éléments biogènes;
- Les liens entre structure (composition spécifique et organisation spatiale) et fonctionnement;
- L'impact des variations climatiques sur les mécanismes ci-dessus;
- Le rôle de la structure et du fonctionnement de la surface sur la dynamique et la chimie atmosphérique et la quantification des échanges avec l'atmosphère.

La compréhension du fonctionnement des écosystèmes passe par les études suivantes :

**a) L'activité photosynthétique** intégrée sur la saison ou sur plusieurs années, qui correspond à la production primaire. Elle dépend de deux grands types de processus :

- La quantité d'énergie lumineuse photosynthétiquement active absorbée par le couvert pour fixer le carbone atmosphérique sous forme de biomasse. La structure du couvert, et en particulier de l'indice foliaire (LAI), joue un rôle majeur.
- L'efficacité de la photosynthèse qui caractérise la conversion en biomasse de l'énergie absorbée par le couvert. Elle dépend de nombreux facteurs dont les plus importants sont la température des feuilles, les caractéristiques de l'atmosphère ambiante (concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique, vent,

température et humidité de l'air), l'état hydrique du couvert, l'état de nutrition azoté, et l'espèce végétale concernée.

**b) La respiration** des plantes qui utilise l'énergie chimique stockée dans les molécules formées par la photosynthèse pour maintenir les tissus en état de fonctionnement, et assurer la croissance. Elle dépend de la température, de la quantité de biomasse active présente, de l'humidité du sol et de la quantité de matière organique du sol et de sa qualité.

**c) La biomasse formée distribuée** dans les différents compartiments du couvert (racine, feuilles, tiges, organes de réserve, organes reproducteurs). Cette répartition dépend fortement de l'espèce végétale considérée, ainsi que de la phénologie. Plusieurs facteurs limitants (lumière, eau, azote) modifient le schéma de distribution des ressources.

Par leur architecture et leur compétition pour l'accès aux ressources, les plantes organisent la structure du couvert dont dépend très largement la photosynthèse, la croissance et la dynamique végétale. A plus grande échelle, les couverts se différencient selon les bassins versants et s'organisent en paysages, véritables unités fonctionnelles de par les relations que les unités de base (parcelles agricoles par exemple) entretiennent entre elles. Les bilans et flux de carbone et d'eau des parcelles unitaires et du paysage entier sont donc fonction de l'arrangement spatial de ces unités (taille, forme, bordure, positionnement relatif). Les modèles de fonctionnement de couvert doivent donc être spatialement explicites et capables de représenter la structure des écosystèmes et l'organisation des paysages.

La communauté scientifique française a largement participé à l'élaboration de tels modèles. Toutefois, leurs performances sont encore limitées par le manque de connaissance sur l'ensemble des processus impliqués et la structure du couvert aux échelles pertinentes.

#### **2.4.1.2. INTERACTIONS SURFACE – ATMOSPHERE**

Les surfaces continentales constituent une interface avec l'atmosphère et l'océan et sont par conséquent en interaction très forte avec ces deux compartiments, tout particulièrement l'atmosphère. L'état de l'atmosphère influence largement celui de la surface, et en retour, l'état de la surface influe directement sur celui de l'atmosphère.

La végétation contrôle une grande partie des interactions avec l'atmosphère et joue un rôle majeur dans les cycles bio-géochimiques, en particulier ceux de l'eau, du carbone et de l'azote. Les échanges d'énergie et de masse entre la surface et l'atmosphère interviennent à toutes les échelles d'espace et de temps. Les processus hydrologiques doivent également être pris en compte pour la redistribution horizontale de l'eau, en tenant compte de la composante océanique. L'eau joue ainsi un rôle majeur, par :

- L'étroite liaison entre bilan d'énergie et bilan hydrique au travers de la chaleur latente d'évaporation;
- La forte dépendance des flux d'eau et de carbone (CO<sub>2</sub>) entre la végétation et l'atmosphère, les stomates régulant les transferts de ces deux éléments au niveau des feuilles;
- Sa capacité à véhiculer d'autres substances (dissoutes, colloïdales, solides) dont l'abondance contrôle une partie du développement de la végétation et donc les échanges avec l'atmosphère. C'est ainsi que les cycles de l'azote et de l'eau sont étroitement imbriqués.

Le carbone joue également un rôle déterminant au travers des échanges de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone et méthane en particulier). Enfin, les poussières arrachées au sol sous l'action du vent, et les fumées résultant des feux de forêt ou de savane contribuent aussi à modifier significativement le bilan radiatif.

Les interactions à court terme entre atmosphère et surface sont décrites par les modèles TSVA (Transfert Sol-Végétation-Atmosphère).

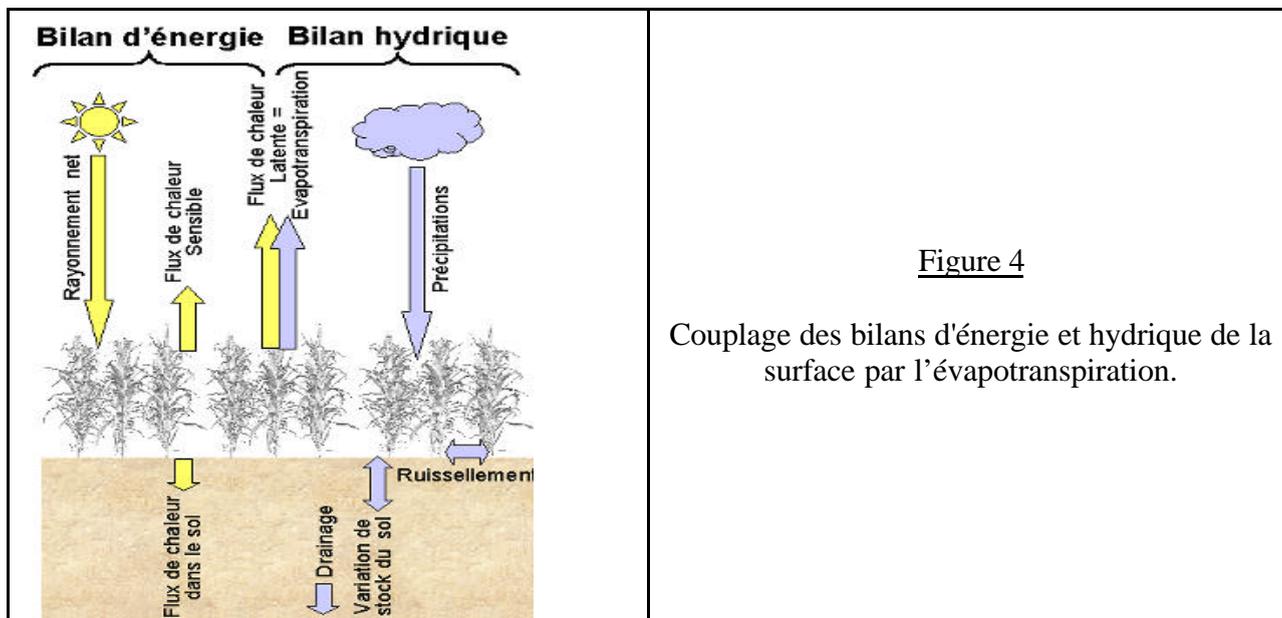


Figure 4

Couplage des bilans d'énergie et hydrique de la surface par l'évapotranspiration.

Ces modèles TSVA constituent les schémas de surface des modèles de circulation générale et meso-échelle atmosphériques; ils sont également utilisés pour décrire le terme évapotranspiration dans les modèles hydrologiques. Ils couplent les bilans d'énergie et hydrique en décrivant les processus physiques et les différentes caractéristiques des surfaces qui contrôlent les échanges d'énergie et de masse. La grande variabilité spatio-temporelle de ces caractéristiques rend difficile la mise en œuvre de ces modèles et est la principale source d'incertitude. Pour améliorer la modélisation des échanges entre la surface et l'atmosphère, plusieurs campagnes de mesure, associant mesures in situ, mesures aéroportées in situ et de télédétection, et mesures satellite en optique, infrarouge et radar, ont fortement mobilisé la communauté scientifique française. Elles ont permis de comparer et valider les modèles TSVA et de progresser dans la description des échelles spatiales plus larges. Toutefois, ces expériences sont insuffisantes pour couvrir l'ensemble des situations possibles.

Par ailleurs, le couplage des modèles TSVA à des modèles hydrologiques devrait permettre de mieux prendre en compte la redistribution spatiale de l'eau à l'échelle du bassin versant. Enfin, le couplage des modèles physiques TSVA aux processus biologiques des modèles de fonctionnement et de dynamique des écosystèmes permettra d'étendre la description des interactions entre la surface et l'atmosphère à des échelles temporelles beaucoup plus longues, et d'obtenir ainsi de réelles capacités prédictives.

### **2.4.1.3. HYDROLOGIE DE SURFACE**

La phase continentale du cycle de l'eau dépend étroitement de son interface avec l'atmosphère qui pilote l'essentiel des entrées (les pluies) et des sorties d'eau (l'évaporation). L'eau reçue sous forme de précipitation est en partie interceptée par la végétation et évaporée directement. Celle qui arrive au sol est soit relâchée vers l'atmosphère par transpiration du sol et de la végétation, soit transmise vers la nappe souterraine par infiltration ou vers les cours d'eau par ruissellement.

La partition entre ruissellement et infiltration, élément central de l'hydrologie de surface, dépend de l'état des sols (rugosité, type de végétation), et des caractéristiques physiques des sols (pentes, humidité). L'infiltrabilité est un indicateur de la dégradation des sols, conséquence directe du phénomène d'érosion. Des modèles hydrodynamiques sont en cours de développement pour évaluer aussi précisément que possible les flux entre les différents postes du bilan hydrique et prévoir leurs évolutions.

### **2.4.2. STRATEGIE ET OBSERVABLES**

Les caractéristiques de la surface qui contrôlent l'activité photosynthétique, la respiration, et les échanges d'énergie et de masse à des échelles de temps courtes sont les suivantes :

- *L'albédo* de surface dont dépend la quantité d'énergie radiative effectivement disponible au niveau de la surface (sol et végétation);
- *L'indice foliaire* qui représente la surface d'échange entre la végétation et l'atmosphère. Cette variable principale de structure du couvert contrôle également la fraction de rayonnement disponible au niveau du sol;

- *L'humidité de surface* du sol dont dépend son évaporation;
- *La résistance stomatique* dont dépendent les flux d'eau (et de carbone) entre la feuille et l'atmosphère proche. La résistance stomatique est contrôlée par des mécanismes de nature physiologique et physique, en grande partie liés au type de végétation et à l'état hydrique du couvert. L'état hydrique du couvert pourra être évalué indirectement au travers de sa *température de surface*, et de *l'humidité du sol* dans la zone exploitée par les racines.
- *La rugosité* de la surface qui contrôle la résistance aérodynamique. La résistance stomatique associée à la résistance aérodynamique constitue la *résistance du couvert* dont dépendent les échanges d'eau et de carbone entre le couvert végétal et l'atmosphère. Elle dépend de la *structure verticale et horizontale du couvert*. Elle peut être approchée par la hauteur du couvert, l'indice foliaire et le type de végétation.

Les observations satellite doivent permettre de rendre compte de la très grande hétérogénéité spatiale des surfaces terrestres et de la dynamique importante des processus qui couvrent des échelles de temps allant de la minute à la décennie. La plupart des variables qui interviennent dans les processus d'échange entre la surface et l'atmosphère, du fonctionnement ou de la dynamique des écosystèmes ou encore hydrologiques, ne sont pas directement accessibles depuis l'espace. Différentes approches sont donc proposées :

- *Estimation des paramètres à partir du type d'occupation du sol* qui peut être déduit des observations spatiales. Cette approche correspond à une première étape aboutissant à une estimation grossière des caractéristiques de la surface, mais qui est encore beaucoup utilisée, notamment en météorologie.
- *Estimation des paramètres à partir des produits biophysiques des capteurs*. Les variables potentiellement accessibles sont : albédo, LAI, humidité de surface, température des composants (sol, végétation), rugosité, taux de couverture, humidité du sol, structure verticale de la végétation. Ces variables sont utilisées soit dans la phase d'étalonnage et de validation des modèles ou, pour certaines d'entre elles, en mode de forçage (albédo, LAI, humidité de surface, rugosité). Dans ce dernier cas, une bonne répétitivité des observations est nécessaire de manière à bien décrire la dynamique temporelle souvent importante.
- *Assimilation des observations spatiales par les modèles*. Cette approche permet d'estimer des variables et paramètres internes aux modèles qui ne sont pas directement accessibles par télédétection, tels que la résistance stomatique, l'humidité du sol sur la profondeur exploitée par les racines ou ceux associés à la phénologie. L'assimilation peut utiliser soit les paramètres biophysiques déduits des mesures des capteurs spatiaux soit directement les données de flux émis ou réfléchi par la surface en couplant les modèles de processus aux modèles de transfert radiatif. Cette deuxième technique est certainement la plus prometteuse et va demander un effort important de la communauté scientifique pour adapter les modèles aux observations spatiales. ***L'assimilation des observations spatiales sur de longues séries temporelles et dans des conditions contrastées*** devrait permettre de rendre plus robuste la modélisation des interactions surface-atmosphère, et ainsi aboutir à de meilleures capacités prédictives.

L'observation spatiale des écosystèmes terrestres utilise essentiellement le domaine optique. La signature spectrale très spécifique de l'activité photosynthétique permet sa détection et sa quantification depuis l'espace. On a ainsi accès aux variables clés telles qu'indice foliaire, fraction de rayonnement solaire absorbé, production primaire ou couverture végétale.

En raison de la très forte hétérogénéité spatiale et temporelle des surfaces terrestres, il faudrait pouvoir disposer de systèmes d'observation continus dans le temps, ayant à la fois une bonne résolution spatiale (quelques mètres), et une forte répétitivité temporelle (quelques jours). Compte tenu des contraintes technologiques actuelles qui permettent difficilement de conjuguer haute résolution spatiale et haute répétitivité des observations et des volumes de données que cela impliquerait, on distinguera deux stratégies d'observation complémentaires :

- *L'étude des processus et du changement d'échelle*. L'étude des processus est généralement centrée sur des échelles locales à régionales, compatibles avec les dimensions caractéristiques des hétérogénéités et accessibles à la mesure in situ. Compte tenu de la très grande dépendance des

processus vis à vis du type d'espèces végétales considérées, les modèles devront être paramétrés de manière spécifique sur un échantillon représentatif des formations végétales présentes à la surface du globe. Il sera alors possible d'utiliser ces paramétrisations pour l'étude des bilans globaux. L'échelle régionale constitue donc une priorité pour la communauté scientifique avec les problèmes associés à la signification des variables, paramètres et mesures réalisées à cette échelle. L'étude du transfert de l'échelle locale à l'échelle régionale nécessite de disposer des champs de variables déterminés à l'échelle locale où la mesure directe est possible, pour développer des modèles et paramétrisations effectifs à l'échelle régionale. Le projet de mission SPECTRA correspond précisément à cet objectif de modélisation des processus et de passage aux échelles supérieures, en tenant compte des hétérogénéités spatiales et temporelles.

- *Les bilans globaux et le suivi de phénomènes lents.* L'étude du système Terre nécessite de réaliser des bilans globaux pour fermer le système en prenant en compte les composantes atmosphériques et océaniques. La continuité des observations sur des périodes de temps importantes est nécessaire pour prendre en compte des évolutions lentes ou des phénomènes rares. C'est ainsi qu'une augmentation significative de la durée de la saison végétative dans l'hémisphère Nord a pu être mise en évidence à partir de la longue série d'observations spatiales des capteurs NOAA/AVHRR. Ces études nécessitent donc la continuité des observations spatiales à l'échelle globale. La continuité des missions telles que VEGETATION, POLDER, MERIS doit être assurée dans ce but. Dans le domaine des micro-ondes passives, SMOS devrait permettre d'accéder à un suivi global de l'humidité superficielle des sols.

A plus long terme, deux objectifs ressortent : ***accéder à l'humidité dans la zone racinaire*** (le premier mètre) avec une résolution spatiale meilleure que celle de SMOS (idéalement le km) et en profil vertical; une autre observable potentiellement accessible par télédétection est la quantité de biomasse, et ***la structure tridimensionnelle du couvert*** (masse foliaire par strate dans le couvert, hauteur totale) avec une résolution compatible avec les autres mesures spatiales (résolution verticale métrique, et horizontale décimétrique).

## 2.5. OCEAN

### 2.5.1. QUESTIONS SCIENTIFIQUES

L'océan joue un rôle important dans l'évolution et la variabilité des conditions climatiques : c'est un réservoir considérable de chaleur, d'eau et d'espèces chimiques. Toutes les variations des conditions atmosphériques seront plus ou moins lentement compensées par une réaction propre de l'océan. De par sa masse et sa capacité thermique, il impose une inertie considérable aux échanges de chaleur avec l'atmosphère et il contribue fortement à modérer les extrêmes climatiques et à équilibrer les différences de transfert radiatif. Il représente également le réservoir d'eau le plus important du système terrestre, et une modification climatique se manifesterait par des modifications complexes, globales et régionales du niveau de la mer. Enfin, l'océan est aussi un milieu vivant dont les organismes biologiques piègent le carbone atmosphérique pour le séquestrer à plus grande profondeur, mais contribuent aussi à recycler le carbone en provenance du réservoir profond. L'intervention de l'océan dans la variabilité et les changements climatiques est loin d'être statique : elle se compose de redistributions régionales complexes où interviennent de multiples processus dynamiques, thermohalins et chimiques.

Comprendre comment ces processus interviennent, et quelles sont les échelles de temps qu'ils contrôlent est un enjeu important pour maîtriser la connaissance du fonctionnement de l'océan et anticiper l'évolution du climat des prochaines décennies.

#### 2.5.1.1. CIRCULATION

C'est par l'intermédiaire de la circulation océanique qu'évoluent les propriétés physiques, chimiques et dynamiques dans les différentes régions océaniques. Les conditions d'échanges avec l'atmosphère déterminent une distribution de surface, qui est ensuite entraînée par la circulation tridimensionnelle.

#### a) les processus et la dynamique océanique

Notre connaissance de la dynamique océanique et notre capacité à la modéliser s'améliorent en fonction de la capacité des systèmes d'observation à résoudre des échelles spatiales et temporelles de plus en plus fines. La formation des masses d'eau, le transport des propriétés et leur mélange font appel à des

processus dont les échelles spatiales incluent la sub-meso-échelle et la meso-échelle. Des variations saisonnières et inter-annuelles de l'énergie de meso-échelle sont observées et restent à expliquer. Le problème de leur rétroaction sur la circulation générale reste posé.

Nombre des questions soulevées par les problèmes climatiques et la modélisation de la dynamique océanique réclament une meilleure connaissance des processus fondamentaux océaniques. On peut citer en particulier les processus de ventilation de la thermocline et les phénomènes qui y contribuent : quelles sont les parts respectives du forçage dynamique ou thermohalin dans ce processus ? Comment les recirculations de meso-échelle y contribuent-elles ? Quelle est la persistance et le fonctionnement d'une région de ventilation ?

Une meilleure connaissance des régions de remontée d'eau profonde et des flux verticaux est également nécessaire. Enfin, nombre de processus de conversion des masses d'eau sont encore mal maîtrisés : quel est le mélange dans un détroit ? Comment prendre en compte la dissipation d'énergie lors des interactions entre flot et topographie ? Quelle est le rôle de la dissipation de la marée ? Comment la meso-échelle océanique redistribue-t-elle les propriétés des écoulements ?

## **b) la variabilité climatique**

- La recirculation des masses d'eau dans le gyre subpolaire de l'Atlantique Nord, la ventilation interannuelle et décennale des régions tropicales, et les taux de transformation des masses d'eau dans la région circumpolaire Antarctique sont des questions ouvertes. L'objectif est de surveiller l'évolution de la redistribution de masse pendant plusieurs années, de décrire en terme de chaleur, d'eau douce et de propriétés dynamiques l'évolution saisonnière et interannuelle de la circulation, et de caractériser les processus importants qui contribuent à la modification des propriétés, ainsi que les temps caractéristiques qui y sont associés. La région du gyre subpolaire dans l'Atlantique Nord est potentiellement importante pour surveiller l'efficacité de la grande boucle de recirculation thermohaline qui transporte la chaleur depuis les régions équatoriales vers le nord dans l'Atlantique. Déterminer le temps caractéristique de circulation des masses d'eaux, préciser leur temps de résidence et leur taux de mélange avec les eaux environnantes, et comprendre les parts respectives d'un forçage par l'atmosphère par rapport à une réponse interne océanique guideront les investigations scientifiques. La réponse à ces questions sera également utile pour cerner le rôle du proche Atlantique sur la variabilité du climat européen.
- La variabilité interannuelle du climat est particulièrement marquée et forte de conséquences dans les régions intertropicales où océan et atmosphère conjuguent leurs réponses pour amplifier et maintenir de fortes anomalies. Au niveau océanique, ces régions sont caractérisées par une évolution des conditions de surface très dépendantes de la dynamique océanique. Déterminer le temps d'ajustement de l'équilibre zonal et méridien de la thermocline océanique, ainsi que les connexions avec les régions tropicales, et même la cellule thermohaline permettrait de mieux comprendre les processus d'anomalies climatiques où l'océan intervient de façon prépondérante.
- La région circumpolaire antarctique possède le caractère exceptionnel d'interagir successivement avec les trois grands océans. Cette région demeure largement méconnue compte tenu des difficultés d'accès et l'approche spatiale est une source inégalée d'observations. Dans cette région complexe, des taux de conversion de masse d'eau importants se produisent et affectent à la fois les transports méridiens de masse et de chaleur dans les trois grands bassins, ainsi que les flux de carbone entre océan et atmosphère.

### **2.5.1.2. INTERFACES**

Ce sont les échanges entre l'océan et l'atmosphère qui permettent de fixer les propriétés extrêmes des variables physiques et dynamiques (température, salinité, "vorticité"), qui sont ensuite redistribuées par la circulation globale. La connaissance des échanges d'énergie, de chaleur et de masse à l'interface océan-atmosphère est déterminante pour contraindre les écoulements.

- **La première source d'énergie est l'énergie mécanique**, qui se traduit par une tension de surface entre l'océan et l'atmosphère. La connaissance de ce champ a évolué considérablement ces dernières années, avec d'une part l'obtention des champs de vents diffusiométriques, et d'autre part l'assimilation de cette observation dans des modèles météorologiques. Cependant, des progrès doivent encore être faits pour améliorer la formulation de la tension du vent dans toutes les conditions d'état de mer sur les océans et sa description, dans les conditions stables ou instables de l'atmosphère, ainsi

qu'aux différentes échelles des échanges air - mer. La tension de vent agit sur la dynamique océanique par son rotationnel : des études se poursuivent pour évaluer l'impact d'une éventuelle amélioration en résolution temporelle et spatiale de ce champ.

- **La seconde forme d'échanges concerne le flux de chaleur** qui se compose du flux radiatif, fortement dépendant de la structure interne de l'atmosphère, et des flux turbulents qui eux dépendent des gradients de température et d'humidité entre les deux fluides. Des problèmes différents sont soulevés par ces deux types de flux. Pour les premiers, il faut prendre en compte les propriétés radiatives de l'atmosphère. Les flux radiatifs sont encore mal connus à l'échelle globale et particulièrement mal déterminés dans les régions de forte convection ou forte subsidence atmosphérique. Les flux turbulents mettent en jeu un problème de connaissance fine des processus d'échanges à l'interface (comme pour l'énergie mécanique), ainsi qu'une meilleure compréhension des échelles significatives de ces transferts. Quelles sont les échelles spatiales et temporelles pertinentes pour fermer le bilan de chaleur ? Quelle est la dépendance régionale de cette fermeture ?
- **Enfin une troisième forme d'échange à l'interface concerne la masse même d'eau douce de l'océan.** Celle-ci se modifie par des échanges de phase (formation de glace, évaporation) ou par des échanges d'eau (pluies, rivières, fonte de glace). Ces échanges contrôlent la salinité océanique qui se révèle un paramètre indépendant de la température, et sans interaction directe avec l'atmosphère sus-jacente. Dans certaines régions, ces échanges se révèlent prépondérants pour contrôler la stabilité interne de l'océan et donc les caractéristiques des échanges avec l'atmosphère, et les écoulements profonds qui en découlent. Là encore, une connaissance approfondie des régions et des échelles temporelles où la salinité joue un rôle moteur est nécessaire.

### 2.5.1.3. ECOSYSTEMES MARINS ET BIO-GEO-CHIMIE

Les objectifs scientifiques majeurs liés aux écosystèmes marins visent à la compréhension de l'ensemble de la chaîne biologique marine, et son impact sur les flux de carbone. Ces objectifs se déclinent à différentes échelles d'espace et de temps et posent des problèmes spécifiques suivant qu'on s'intéresse à l'océan ouvert ou au domaine côtier. La compréhension du fonctionnement des écosystèmes marins passe par la caractérisation de la biomasse marine (phytoplancton), sa production primaire en relation avec les échelons trophiques supérieurs, et par le développement de modèles interprétatifs et prédictifs du fonctionnement des écosystèmes.

Les organismes vivants de l'océan élaborent leur substance à partir du carbone inorganique abondant dans l'eau de mer. Par leurs mouvements propres (principalement le mouvement de sédimentation), ils sont à l'origine d'un gradient de carbone qui fait de la majeure partie de l'océan superficiel un puits pour le carbone atmosphérique ou au contraire une source lorsque la dynamique de l'océan porte les eaux profondes vers la surface. A l'heure actuelle, on ne connaît pas avec suffisamment de précision le rôle global de l'océan dans l'absorption du gaz carbonique atmosphérique, ni la répartition des puits et sources, ni le rendement de la pompe biologique de carbone et sa réponse aux processus physiques de l'océan. On connaît encore moins bien la manière dont les écosystèmes marins seront susceptibles d'évoluer en réponse au changement climatique.

Pour améliorer la connaissance des cycles biogéochimiques marins et de leur contrôle par la circulation océanique, des progrès sont attendus dans deux directions :

- Quelle est la capacité spécifique de la biomasse phytoplanctonique à entraîner du carbone vers la profondeur ? Cette capacité spécifique est la plus forte chez les diatomées et est quasiment nulle pour certaines espèces des régions tropicales. Elle s'accompagne parfois de modalités biogéochimiques dont l'impact sur la chimie de l'océan est potentiellement fort.
- Comment s'organise le couplage entre la circulation océanique et la production primaire ? Les processus mis en jeu sont pour l'essentiel à meso-échelle, échelle difficile d'accès par des mesures in-situ.

De plus, il est important de savoir si les écosystèmes océaniques sont affectés par une éventuelle évolution climatique: y a-t-il une réponse de la concentration en chlorophylle à la surface de l'océan à l'échelle globale ?

#### 2.5.1.4. ENVIRONNEMENT LITTORAL ET COTIER

Le domaine côtier désigne, dans un sens large, la zone de contact entre l'océan et les terres émergées. On distingue classiquement le littoral, où s'opère effectivement le contact, et le domaine extra-littoral, "côtier" au sens océanographique.

**La bande littorale** est caractérisée par une forte interaction entre l'atmosphère, l'hydrosphère et les éléments solides, plus ou moins cohésifs, de la lithosphère. Cette interaction a pour effet que le littoral est avant tout dynamique et variable. Il paraît naturel d'inclure dans le littoral, outre le milieu fluide, le domaine situé vers l'intérieur des terres et constitué par l'estran et par les éléments du rivage fortement influencés par la proximité de la mer. Les formes du littoral sont nombreuses : plages, systèmes dunaires, falaises, marais maritimes, lagunes, estuaires, etc. Le caractère éminemment variable des milieux littoraux nécessite une observation régulière et pérenne. Prenons par exemple le cas des plages. L'un des problèmes importants qui se pose à leur sujet est leur dépérissement dû à un déficit sédimentaire constaté sur les cinq continents. L'identification du trait de côte, qui varie avec la marée et les déplacements naturels de sédiment, est donc un problème constant de la cartographie côtière.

**La zone côtière extra-littorale** est une composante majeure de l'environnement planétaire, où les paramètres marins sont conditionnés par la proximité de la Terre et la présence du fond. Malgré les difficultés conceptuelles pour définir cette zone (tous les paramètres ne subissent pas de la même manière l'influence des côtes et du fond), on peut faire coïncider ses limites avec celles du plateau continental. 7,5 % de la surface des océans et des mers relèvent ainsi du domaine côtier. De nombreux processus spécifiques - par rapport au domaine hauturier - s'y manifestent du fait de la proximité des côtes et des faibles profondeurs. L'un des principaux effets de la bathymétrie réside dans l'intensification de l'amplitude de la marée et des courants associés. Le caractère non stationnaire de la marée est à l'origine de structures tourbillonnaires de la petite à la moyenne échelle, de l'existence de fronts, de la génération d'ondes internes au niveau des seuils et talus, et de modalités complexes de la dispersion des eaux fluviales et des rejets, pour ne citer que quelques phénomènes.

Une des conséquences importantes de la proximité des côtes est de "canaliser" les courants incidents qui se trouvent en général amplifiés. De plus, le niveau de la mer peut être considérablement perturbé au voisinage des côtes entraînant des phénomènes de remontée ou de convection, d'ondes se propageant parallèlement à la côte et, sous l'influence des vagues, de courants littoraux, parallèles à la côte, et sagittaux, en direction du large. Ces phénomènes contribuent puissamment à la morpho-dynamique littorale (transport de sédiment, érosion des côtes, formation de barres etc). Dans les mers micro-tidales (comme la Méditerranée), le vent, les apports fluviaux et les échanges de chaleur à l'interface air-mer sont parmi les paramètres déterminants de l'environnement côtier. Il est donc essentiel de caractériser l'ensemble de ces processus physiques.

Les questions actuellement posées en bio-géochimie côtière concernent les échanges entre les eaux affectées par le littoral et celles du large, le rôle régulateur de ces zones entre le large et le domaine continental (pour ce qui est des cycles bio-géochimiques des éléments), la dynamique sédimentaire, et l'impact des changements environnementaux sur les écosystèmes de ces zones qui abritent la quasi-totalité des ressources vivantes marines exploitables. L'effet conjugué des courants et des houles participe à la remise en suspension des matériaux minéraux et organiques et à leur distribution sur la colonne d'eau.

#### 2.5.2. STRATEGIE ET OBSERVABLES

Pour l'ensemble des problèmes évoqués ci-dessus, l'observation spatiale peut apporter des éléments de réponse originaux de par l'accès à des propriétés différentes que celles habituellement mesurées lors de campagne en mer et de par leur couverture globale. Rappelons que seule la surface de l'océan est directement observable depuis l'espace, d'où l'importance des modèles numériques pour interpréter et assimiler les mesures.

##### 2.5.2.1. TOPOGRAPHIE OCEANIQUE

Le suivi de la dynamique océanique n'est pas aujourd'hui accessible directement. Cependant l'altimétrie spatiale fournit d'une part le niveau moyen de la mer et d'autre part sa variabilité.

Ces observations permettent une contrainte intégrale globale sur la répartition des masses d'eau océaniques. Dans les régions fortement baroclines, cette contrainte peut être directement traduite en terme de modification de profondeur de la thermocline océanique mais il faut déjà une bonne connaissance de la région et de sa variabilité pour interpréter sans ambiguïté la résultante en terme de niveau de la mer des

modifications internes en salinité et température. La stratégie d'utilisation des données de niveau de la mer repose sur leur intégration dans des modèles inverses ou sur leur assimilation dans un modèle direct. La connaissance de la topographie océanique s'est révélée un excellent moyen pour détecter et suivre la meso-échelle océanique; elle a également permis de suivre la variabilité saisonnière et interannuelle des régions tropicales. Il faut améliorer son utilisation avec d'autres contraintes (par exemple profils de température et salinité fournis par le réseau de mesures in situ) pour interpréter la variabilité thermohaline. Notons qu'il est possible dans certaines régions d'obtenir directement, par l'analyse du niveau de la mer, une estimation du courant géostrophique de surface.

Suivre la topographie dynamique sur le long terme permettra de servir les besoins de recherche sur la nature, la variabilité et les changements de la circulation océanique. Pour cela il faut disposer à la fois d'une *observation de haute précision du niveau de la mer* (type JASON) *et accéder à toutes les latitudes à la résolution spatiale et temporelle de la moyenne échelle* après assimilation des données altimétriques dans un modèle.

En ce qui concerne les régions côtières, de multiples difficultés (résolution, effets atmosphériques, vent...) limitent les capacités des systèmes d'observations actuels. L'obtention d'une combinaison instrumentale originale qui permettrait de suivre le domaine côtier et estuarien permettrait une avancée scientifique majeure sans compter les retombées évidentes en matière de gestion et d'aménagement du littoral.

### 2.5.2.2. PARAMETRES DE SURFACE

La **tension du vent** à la surface des océans, qui représente l'énergie mécanique transmise de l'atmosphère vers l'océan, est le moteur principal de la dynamique océanique. Parmi les instruments spatiaux contribuant à une meilleure connaissance de ce paramètre à l'échelle globale, le plus notable est certainement le radar diffusiomètre. Cependant, alors qu'au sens de la physique de la mesure, le signal radar est directement relié à la tension du vent, le paramètre assimilé dans les systèmes de prévision météorologique est le vent à dix mètres, la tension du vent étant calculée par le modèle. La tension ainsi estimée est généralement d'une précision suffisante pour les régimes de vent les plus fréquents, mais des erreurs importantes peuvent être commises sur l'estimation du vent dans les régimes extrêmes (vents inférieurs à 5 m/s ou supérieurs à 20-25 m/s, régimes d'état de mer non pleinement développé par exemple).

Si la résolution spatiale obtenue sous la fauchée du diffusiomètre paraît suffisante pour le forçage des modèles numériques d'océan à haute résolution, l'utilisation optimale de ces données nécessite d'aboutir à une couverture globale journalière.

En ce qui concerne les zones côtières et les mers semi-fermées, l'estimation de la tension du vent à partir des données du radar diffusiomètre est largement limitée par :

- La résolution horizontale de l'instrument, et les contraintes liées à sa géométrie d'observation (ex : problème de lobes secondaires);
- La physique de la mesure elle-même, ces zones correspondant fréquemment à des états de mer non pleinement développés;

Pour la restitution du vent à échelle très fine dans les zones côtières, de nombreuses études récentes ont porté sur l'utilisation de mesures de radar à synthèse d'ouverture. Même si cette voie semble intéressante, de nombreuses limitations demeurent, dues en particulier à leur insuffisante répétitivité temporelle, et l'impossibilité d'estimer la direction du vent.

**L'état de mer**, dont la caractérisation complète correspond à l'estimation du spectre de densité d'énergie des vagues en direction et en longueur d'onde, est directement lié à l'apport d'énergie à la surface par le vent, et aux différents mécanismes physiques d'évolution qui s'ensuivent (propagation, dissipation, interactions non linéaires etc.). Réciproquement, l'état de mer conditionne directement la rugosité de surface, et de ce fait la tension exercée par le vent sur la surface océanique, et le transfert de quantité de mouvement de l'atmosphère vers l'océan qui en résulte. De plus, la connaissance de cette rugosité est nécessaire pour interpréter correctement les mesures spatiales sur l'océan.

Le radar altimètre permet d'accéder de façon fiable à la hauteur significative des vagues, y compris au large, et avec une couverture globale. Cependant, la principale limitation de cette mesure est justement qu'il s'agit d'un paramètre intégré du spectre d'état de mer. Les mesures de radar à synthèse permettent en principe l'estimation d'un plus grand nombre de composantes du spectre d'état de mer, mais avec un grand nombre de limitations dans les courtes longueurs d'ondes et dans les directions de

propagation proches de la direction de déplacement du satellite.

*Pour ces raisons*, le développement d'un radar à ouverture réelle apparaît comme la meilleure solution pour la description complète du spectre d'état de mer.

La connaissance précise de **la température de surface de la mer** à l'échelle globale est devenue un enjeu important ces dernières années, car celle-ci est un des indicateurs les plus fiables du réchauffement global du climat. Cependant, les exigences qui en découlent en termes de précision de la mesure (supérieure ou égale à  $0.1^\circ$ ) soulèvent un certain nombre de problèmes, tant du point de vue de la sensibilité et de la stabilité des capteurs (qu'ils soient embarqués sur satellite ou non), que de l'interprétation elle-même des différentes mesures. Des radiomètres infrarouges et micro-ondes peuvent être utilisés dans ce but.

Les principales sources d'erreur liées à l'instrument et au traitement de la donnée en infrarouge sont: le bruit radiométrique et l'étalonnage du radiomètre, la fiabilité de la détection nuageuse, et la précision de l'algorithme d'inversion de la température et de correction atmosphérique (vapeur d'eau, aérosols...). L'instrument ATSR embarqué sur ERS et ENVISAT a été conçu pour minimiser les erreurs d'étalonnage. L'interprétation de la mesure elle-même pose le problème de la profondeur dont elle est représentative, et donc de la variabilité de la structure thermique de l'océan dans les premiers mètres. En effet, les estimations de température de surface de la mer obtenues par radiométrie sont représentatives de la température de peau de l'océan (quelques microns dans l'infrarouge, de l'ordre du millimètre dans les micro-ondes), et leur interprétation nécessite la correction de cet effet. L'intensité de l'effet de peau est étroitement liée aux valeurs locales de la tension du vent et des flux de chaleurs radiatifs et turbulents, qu'il faut donc prendre en compte.

A cause de la couverture nuageuse, les cartes globales de température de surface de la mer ont des résolutions horizontales grossières ( $0,5^\circ$  ou plus), alors que la résolution des capteurs infrarouges est de l'ordre du km. L'utilisation de radiomètres micro-ondes tels que AMSR est donc complémentaire dans les régions de forte nébulosité, mais ceux-ci sont limités en résolution horizontale et en précision.

La **salinité** exerce une contrainte importante sur la formation des masses d'eau, et la capacité de l'océan à transporter de la chaleur. Mais, alors que la température de surface est accessible depuis longtemps en routine à partir de mesures satellite, il n'y a pas eu jusqu'à présent de démonstration de mesure de salinité par satellite. Des projets spatiaux sont aujourd'hui lancés en ce sens, dont la mission d'opportunité de l'ASE SMOS (radiomètre interférométrique micro-ondes en bande L), et très récemment le projet AQUARIUS de la NASA. Les aspects critiques liés à ce concept instrumental pour la restitution de la salinité de surface concernent les erreurs systématiques liées aux biais instrumentaux, ainsi que les erreurs liées à l'émissivité de surface, qui dépend du spectre d'état de mer.

### 2.5.2.3. FLUX DE SURFACE

La restitution avec une bonne précision des **flux radiatifs à la surface** est possible à partir de mesures de radiomètres visible et infrarouge embarqués sur satellite et de paramétrisations éprouvées. La précision des flux instantanés restitués à partir de mesures de routine des satellites météorologiques géostationnaires est de l'ordre de 15% pour la composante onde courte incidente et de 8% pour la composante onde longue incidente (écart-type de la différence avec des mesures de pyranomètre et pyrgéomètre). La précision de ces estimations, outre le fait qu'elles ne couvrent pas les hautes latitudes, est principalement limitée par :

- L'étalonnage en vol du radiomètre, en particulier celle des canaux visibles pour le flux onde courte;
- La qualité des paramétrisations, en particulier en cas de présence d'aérosols ou de forts contenus intégrés en vapeur d'eau;
- Le besoin de connaissance de l'humidité et de la température de l'air près de la surface pour le flux onde longue.

Les estimations directes de **flux turbulents de chaleur sensible et latente** à partir de mesures satellite sont plus difficiles. Elles reposent sur des formulations statistiques ou des modèles simples, fonctions du vent, de la température de surface et de la température de l'air pour le flux de chaleur sensible, et fonctions du vent, de la température de surface et de l'humidité de l'air pour le flux de chaleur latente. Elles utilisent une combinaison de capteurs infrarouges, micro-ondes actives et passives, mais sont limitées par le manque de sensibilité de ces capteurs à l'humidité et à la température de l'air près de la surface, ainsi que par le faible échantillonnage temporel des satellites à défilement.

Le **flux de masse** à la surface des océans résulte de la contribution du flux d'évaporation (directement

relié au flux turbulent de chaleur latente, voir ci-dessus) et des précipitations. La connaissance précise des précipitations à la surface des océans, aux échelles spatiales et temporelles requises du fait de la variabilité du paramètre lui-même, est un défi pour lequel aujourd'hui seule l'observation depuis l'espace semble pouvoir apporter une réponse. Des progrès majeurs sont attendus, grâce en particulier aux nouvelles générations radiomètres micro-ondes, et aux radars pluie embarqués sur satellite.

#### **2.5.2.4. GLACES DE MER**

Le suivi précis de la couverture et de la concentration en glaces de mer est effectué maintenant opérationnellement depuis de nombreuses années, à partir des données de l'imageur micro-ondes SSM/I. La continuité de ce suivi est garantie par les programmes opérationnels de satellites météorologiques à défilement, le successeur de l'instrument SSM/I devant permettre à l'avenir une meilleure résolution horizontale. Des instruments actifs comme les radars altimètre ou diffusiomètre peuvent apporter une information additionnelle utile dans certaines conditions particulières (ex : situation de fonte, où la glace de mer est surmontée d'eau douce), ou pour l'identification de différents types de glace de mer.

Cependant, le paramètre le plus important pour la prise en compte de la glace de mer dans les modèles de circulation océanique ou les modèles couplés océan / atmosphère est l'épaisseur de la glace de mer, qui n'est pas jusqu'ici directement accessible à partir de mesures satellites. Différentes études préliminaires ont été effectuées, comme par exemple l'estimation de l'épaisseur de la glace de mer à partir de l'analyse des données altimétriques lors de la transition glace / eau libre, qui n'est cependant possible que dans les régions proches de la limite de glace de mer. Il est probable que la solution ne passera pas par l'interprétation directe d'une source unique de données satellite, mais par une approche combinant différentes sources de données et leur assimilation dans des modèles dynamiques d'évolution de la glace de mer.

#### **2.5.2.5. BIO-GÉO-CHIMIE MARINE**

Le suivi des écosystèmes marins passe par la télédétection optique, et nécessite une très grande qualité radiométrique ainsi que des méthodes de correction atmosphérique performantes. Les paramètres ainsi potentiellement accessibles sont :

- La concentration en chlorophylle;
- Les propriétés optiques inhérentes (absorption et retrodiffusion) à partir desquelles on espère discriminer les grands groupes phytoplanctoniques et obtenir des informations sur la taille moyenne des particules.
- La fluorescence naturelle du phytoplancton (mesurée à 683 nm). Sa mesure pourrait permettre une estimation de la concentration en chlorophylle indépendante de celle obtenue par l'absorption différentielle bleu/vert (technique des rapports de réflectance). Elle pourrait également apporter des informations sur l'état physiologique du phytoplancton, cruciales pour la modélisation de la production primaire. La connaissance de la valeur instantanée de l'éclairement photosynthétique disponible à la surface est nécessaire pour l'interprétation de la fluorescence.
- D'autres informations sont pertinentes pour modéliser la production primaire et la production nouvelle :
  - profondeur de la couche de mélange (détermination à partir de l'altimétrie);
  - profondeur de la colonne d'eau (eaux peu profondes);
  - température de surface;
  - valeur journalière de l'éclairement photosynthétique;
  - concentration en éléments nutritifs (ex. détermination indirecte à partir de la température);
  - éventuels apports atmosphériques (fer, éléments nutritifs).

Une difficulté majeure est l'extrême sensibilité qui est recherchée, à savoir la détection de 30 classes de la concentration en chlorophylle, de 0,03 à 30 mg.m<sup>-3</sup> (10 classes par décade). Le principal facteur limitant nos capacités à atteindre cette discrimination est l'erreur sur la correction atmosphérique, encore assez importante malgré l'amélioration très significative réalisée ces dernières années. Toute information externe permettant d'améliorer cette correction est donc utile, en particulier la nature des aérosols (leur quantité étant plutôt bien déterminée dans le proche infrarouge) et l'état de la surface qui est fonction de la vitesse du vent : ce problème devenant de plus en plus délicat à mesure que la résolution spatiale des capteurs est plus fine.

L'estimation de la capacité des différents types de biomasse à entraîner le CO<sub>2</sub> vers le fond passe par une analyse améliorée des réflectances spectrales océaniques, de manière à identifier des signatures spectrales spécifiques de certains groupes biologiques. Ceci est engagé avec le lancement des capteurs MERIS sur ENVISAT et GLI sur ADEOS2 en 2002 qui ont une résolution spectrale plus fine : il semble que l'amélioration apportée soit suffisante pour cette identification. Pour en tirer bénéfice, la correction atmosphérique apportée aux données de couleur de l'océan (effet des aérosols) doit être améliorée. Dans le futur, la possibilité d'utiliser les bandes spectrales de Fraunhofer afin d'isoler la fluorescence du photosystème II du spectre des réflectances pourra aussi aider à progresser dans ce domaine.

Cependant, pour mieux comprendre les processus de couplage dynamique/bio-géo-chimie, le principal obstacle vient de l'échantillonnage que permettent les capteurs actuels, actuellement insuffisant pour décrire les évolutions à court terme (un à cinq jours) de la couleur de l'océan. Toute combinaison de capteurs observant la couleur de l'océan qui permettra d'augmenter la fréquence des observations d'une région donnée est donc souhaitable pour pouvoir bien décrire l'évolution d'un front, d'un tourbillon, ou de toute région où le couplage physique-biologie donne lieu à des phénomènes à évolution rapide. De plus, du fait de ce couplage, la couleur de l'océan se trouve être le traceur le plus sensible de la circulation océanique. ***Il est donc essentiel de maintenir la continuité des mesures de couleur de la mer, en poursuivant l'amélioration des performances spectrales et en résolution,*** pour obtenir des informations plus détaillées sur les espèces en présence et leur variabilité.

Notons que les mesures de couleur de l'eau ont des exigences d'étalonnage très contraignantes. Ces exigences nécessitent des sites de mesure *in situ*, en parallèle aux dispositifs interne embarqués. Ces sites doivent être maintenus au moins pendant la vie des missions spatiales auxquelles ils sont associés. Les deux solutions les plus couramment utilisées sont les sites de mesures régulièrement visités ou les bouées instrumentées. La combinaison des deux est à recommander, dans la mesure où elle permet non seulement de réaliser les nécessaires opérations de maintenance, mais aussi de réaliser les mesures complémentaires que le mouillage ne peut pas réaliser.

Par ailleurs, l'approche satellitaire permet aussi d'estimer les échanges de carbone entre l'océan et l'atmosphère. L'approche utilisée est basée d'une part sur l'estimation de la pression partielle de gaz carbonique à la surface de l'océan (celle de l'atmosphère étant supposée constante ou connue), et sur l'influence du vent sur la vitesse d'échange. L'estimation de la pression partielle de gaz carbonique à la surface de l'océan se fait généralement à l'échelle régionale, en supposant qu'à cette échelle, les processus thermodynamiques et biologiques sont homogènes. L'intensité de ces processus est alors estimée à partir d'informations de température de surface et de couleur de l'océan. Le flux de CO<sub>2</sub> est estimé au moyen d'une formulation très simple prenant en compte le vent de surface (mesuré depuis l'espace) et un coefficient d'échange, dont la quantification est encore objet de recherche.

#### **2.5.2.6. LITTORAL ET COTIER**

Les systèmes d'observation actuels permettent d'accéder à des informations sur la houle, le trait de côte et partiellement au contenu sédimentaire et biologique. Il n'existe pas actuellement de ***moyen de mesure des courants côtiers, et du niveau de la mer*** (ainsi que des eaux continentales adjacentes). Ajoutons que la ***variation de la bathymétrie sur le plateau continental*** est un paramètre important et difficile d'accès depuis l'espace. Cette limitation, y compris dans les domaines d'application actuels, conduit à mettre en forte priorité le développement de moyens satellitaires pour le domaine littoral et côtier. Les moyens d'observation *in situ* resteront cependant nécessaires pour accéder aux propriétés physiques et dynamiques des masses d'eau sur toute leur épaisseur.

#### **Houle côtière et littorale**

L'imagerie radar haute résolution (SAR) peut être utilisée pour la détection des champs de houle avec, dans certains cas, la possibilité d'en mesurer le spectre directionnel. Mais la fréquence de revisite des champs de houle côtière et littorale (plusieurs jours à l'heure actuelle) est trop lâche pour assurer le suivi du phénomène, essentiellement variable (échelle typique : 6 heures). Ajoutons que le traitement des images à haute résolution est très exigeant en moyens et inapplicable pour un suivi de routine. Ces données permettent en revanche des études de processus, comme :

- Les signatures bathymétriques et courantologiques de la houle;
- L'approche des vagues à la côte, le déferlement littoral;

- L'influence de la houle sur la mise en place et la dynamique des structures morpho-sédimentaires dans la zone de déferlement des plages sableuses.

Comme pour l'état de mer au large, l'utilisation d'un radar spécifique permettrait des progrès notables dans la compréhension et le suivi de la houle.

### **Trait de côte**

Le trait de côte et, d'une façon étroitement liée, la morpho-dynamique des structures sédimentaires par très petits fonds évoqués ci-dessus, sont des thématiques pour lesquelles la photographie aérienne continue d'être utilisée. La solution satellite est intéressante car plus économique pour des résolutions de plus en plus fines (de 2,5m pour SPOT-panchromatique à 1m pour IKONOS). Elle mérite par conséquent d'être davantage utilisée pour cette application.

La mise en évidence du trait de côte et des structures émergées (bancs découvrants, par exemple) n'est pas toujours triviale, d'où la nécessité de développements algorithmiques, basés par exemple sur des méthodes de classification ou utilisant la synergie optique-radar, pour automatiser l'exploitation des images. Des recherches dans ce sens doivent être développées.

D'autre part, des modèles de calcul des variations du trait de côte, destinés à la prévision, commencent à être utilisés. Il le sont de façon systématique dans certains pays comme les Pays-Bas ou les Etats-Unis (côtes de Floride), pour lesquels le problème de l'érosion côtière est d'une première importance. L'assimilation par ces modèles de données régulières de télédétection constitue une voie de recherche prometteuse.

### **Bathymétrie en eau peu profonde :**

Sauf en eau de forte turbidité, la transmission du signal optique permet d'envisager l'estimation de la profondeur de la mer en eau peu profonde (quelques mètres à dizaines de mètres). Le développement de lidars, déjà utilisés depuis des avions doivent être étudié dans ce but. Notons cependant que la résolution horizontale (et verticale) doit être très fine, pour détecter l'évolution des fonds sous marins proches du littoral, soumis à l'influence des courants et de la houle.

### **Sédiments et biogéochimie**

Le recours aux données de télédétection spatiale optique pour la détermination des charges sédimentaires en suspension est une pratique courante de l'océanographie pour des études de transport (par exemple, l'étude du devenir des eaux turbides apportées par un fleuve) et la remise en suspension (effet des vagues et des courants de marée). La haute comme la moyenne résolution (de 20 m à 1 km) sont utilisées suivant que les études sont locales ou régionales. La méthodologie d'inversion des matières en suspension à partir des luminances est fondée sur l'ajustement des données par des mesures optiques de terrain ou l'utilisation d'algorithmes plus évolués - impliquant par exemple des modèles des propriétés bio-optiques du milieu pour les spectro-radiomètres de type SeaWiFS, MODIS et MERIS. La difficulté majeure provient de la complexité optique des eaux. En effet, ces propriétés sont définies par la nature physico-chimique des particules en suspension et des substances dissoutes, qui peut varier énormément et donc engendrer des « signatures » optiques très variées. En outre, ces différents constituants varient souvent de manière indépendante, et il n'est pas possible de relier les variations des propriétés optiques à une seule de ces composantes. L'établissement d'algorithmes locaux pour quantifier par exemple la concentration en chlorophylle et la charge sédimentaire est donc difficile, et leur généralisation est encore bien plus délicate. La présence fréquente de substances dissoutes en grande quantité vient encore compliquer la situation, en diminuant fortement le signal détectable dans la partie « bleue » du spectre, et en empêchant par exemple la quantification de la chlorophylle basée sur ce domaine spectral. Quand les eaux sont peu profondes, la réflectance du fond vient également perturber la mesure des radiations rétrodiffusées par la masse d'eau. C'est, par contre, un moyen éventuel pour estimer la profondeur des eaux dans les régions mal cartographiées.

Si des algorithmes standard sont effectivement proposés par les agences, des développements sont souhaitables pour des applications spécifiques concernant, par exemple : la stratification et le type de sédiment ou en fonction de régions particulières à étudier.

La cartographie des peuplements benthiques, détectables quand les eaux sont peu profondes, est également une préoccupation, soit pour les espèces menacées de disparition (ou en tout cas de diminution

comme les coraux), soit pour celles qui, au contraire, sont envahissantes (colonisations imprévues, telle celle de la caulerpe en Méditerranée).

Dans le domaine littoral, les difficultés viennent, d'une part, de la grande variabilité spatiale et temporelle des phénomènes concernés (ce qui les rend difficiles à cerner par l'observation satellite), et, d'autre part, de la diversité des milieux concernés (en terme de caractéristiques physiques, et donc optiques). Les difficultés sont similaires à celles rencontrées pour le milieu côtier. Toutefois, à l'opposé de ce qui se passe plus au large où les masses d'eau sont mobiles et transportent les écosystèmes, beaucoup d'éléments du système littoral sont fixes (bancs, chenaux d'écoulement, affleurements de rochers, baies), ce qui donne de l'intérêt à une observation par des imageurs à haute résolution spatiale et plus faible résolution temporelle, tels que les capteurs développés pour l'observation de la végétation terrestre. La possibilité de vérification précise sur le terrain est une autre analogie avec la végétation terrestre

La faible fréquence temporelle des observations (en général au mieux tous les trois jours en l'absence de nuages) est actuellement une limitation forte de l'observation spatiale pour ce qui est du suivi des phénomènes à évolution rapide.

## 2.6. ATMOSPHERE

### 2.6.1. QUESTIONS SCIENTIFIQUES

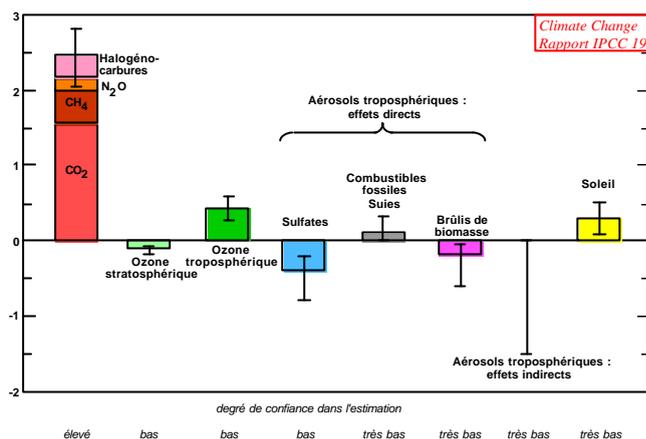
Les processus atmosphériques conditionnent les phénomènes météorologiques, et déterminent en partie l'évolution climatique et les caractéristiques chimiques de l'environnement. Ils sont contrôlés par la distribution spatiale tridimensionnelle et l'évolution de paramètres tels que pression, vent, humidité, nuages, précipitations, turbulence, rayonnement, flux à la surface, ... Les lois qui régissent le système atmosphérique sont connues, et les calculateurs qui servent à les intégrer ont des capacités permettant l'utilisation de modèles numériques simulant avec précision l'évolution des différentes variables. A la suite des formidables progrès accomplis au cours des dernières décennies, l'appréhension du temps, de la composition de l'air ou du climat à venir pourrait n'être plus qu'une question de conditions initiales, mais ce serait faire abstraction des problèmes liés à la mesure des paramètres pertinents, aux interactions qu'ils entretiennent, à la diversité des échelles spatiales et temporelles mises en jeu.

Les échanges d'énergie de la planète Terre avec l'extérieur se font par l'intermédiaire du rayonnement électromagnétique. Les déséquilibres de ce bilan d'énergie radiative pour la planète constituent des forçages auxquels le système climatique répond par un réchauffement si la planète absorbe davantage d'énergie solaire qu'elle n'en perd sous forme de rayonnement infrarouge. Cette variation globale s'accompagne de modifications de la répartition dans l'espace et dans le temps des caractéristiques climatiques.

L'activité humaine a créé les conditions d'un changement substantiel de la concentration de l'atmosphère en gaz mineurs. Ces gaz ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , halocarbones,  $\text{NO}_2$ ) présentent une absorption dans l'infrarouge thermique, et l'augmentation de leur concentration dans l'atmosphère depuis les débuts de l'ère industrielle provoque un accroissement de l'effet de serre équivalent à un forçage radiatif positif d'environ  $2,4 \text{ Wm}^{-2}$ , c'est-à-dire de l'ordre de 1% de l'énergie solaire absorbée par la Terre. Cet accroissement devrait se traduire par un réchauffement significatif de la planète. Déterminer l'amplitude et la vitesse de ce réchauffement constitue cependant une tâche délicate. En premier lieu parce que d'autres forçages viennent s'ajouter à l'augmentation de l'effet de serre, et en second lieu parce que le système climatique est le siège de rétroactions très puissantes susceptibles d'amplifier ou, au contraire, de diminuer la réponse initiale. Pour ce qui concerne la composante atmosphérique du système climatique, les principales causes d'incertitude sont dues à la composition de l'atmosphère et aux processus chimiques qui la gouvernent, aux interactions entre les aérosols, les nuages et le rayonnement, et aux processus dynamiques pour le transport des espèces, la formation, le maintien ou non des nuages et des précipitations qui leur sont associés.

Des mesures denses, tant dans le temps que dans l'espace, mais également à long terme, sont évidemment nécessaires puisque toutes les échelles de temps et d'espace interviennent dans cette problématique.

## Forçage radiatif additionnel depuis un siècle



**Représentation des aérosols dans les modèles :  
Besoin d'une amélioration pour réduire les incertitudes  
sur le forçage anthropique**

Figure 5

Connaissances et incertitudes  
sur l'évolution du bilan  
énergétique du système Terre

### 2.6.1.1. PHYSIQUE DE L'ATMOSPHERE

La caractérisation des systèmes nuageux et éventuellement des précipitations associées, voire la prévision de leur évolution, sont des questions fondamentales en physique de l'atmosphère.

L'organisation des systèmes nuageux est la signature d'interactions d'échelles d'une grande variété de processus. Les forçages dynamiques de grande échelle régulent la circulation générale de l'atmosphère, qui va conditionner la fréquence et les caractéristiques des événements météorologiques, donc en particulier les systèmes nuageux. La circulation à meso-échelle, les forçages régionaux tels que les effets orographiques, mais aussi les processus microphysiques vont moduler tant d'un point de vue spatial que temporel l'organisation des systèmes nuageux et le déclenchement des précipitations, et affecter en retour la circulation générale.

Concernant les **phénomènes conditionnant le cycle de l'eau**, il faut quantifier les échanges entre l'eau continentale ou océanique et les phases – vapeur/liquide/glace, nuage/précipitations – de l'eau atmosphérique en relation avec la structure, l'intensité et l'évolution des perturbations météorologiques, aux latitudes tropicales ou moyennes. Ceci suppose notamment que des observations relatives au cycle de l'eau puissent être assimilées dans des modèles numériques, afin d'en exploiter toutes les informations induites sur la dynamique et la thermodynamique via la libération de chaleur latente.

Pour prévoir l'**influence des phénomènes de petite échelle dans le développement des perturbations** de grande échelle et définir une stratégie d'observation adaptative, il faut disposer de mesures précises et fréquentes dans des régions clés pour la croissance des perturbations. L'assimilation de données spatiales ou aéroportées spécifiquement localisées devrait alors permettre d'améliorer la prévision du développement de perturbations.

Le **suivi des événements extrêmes** (par ex. tempêtes, cyclones, orages...) implique d'accroître la fréquence des observations afin de maîtriser les éléments essentiels de la dynamique de moyenne échelle qui conditionne en grande partie l'évolution des phénomènes météorologiques intenses. Le suivi rapide et précis du développement des nuages et des précipitations, des changements de l'intensité, de la direction ou de la variation horizontale et verticale du vent, de l'évolution de la stabilité statique serait important pour l'appréhension des systèmes convectifs des latitudes moyennes ou tropicales, potentiellement générateurs de phénomènes extrêmes.

Il est de plus indispensable d'assurer un suivi fiable et de longue durée (>10 ans) par des observations qualifiées afin d'appréhender **la variabilité intrasaisonnière, interannuelle et décennale**, et de les comparer aux prévisions des modèles climatiques couplés. C'est la seule façon d'identifier les composantes naturelles, anthropiques et couplées de la variabilité climatique. Les paramètres atmosphériques importants sont la pression, la température, l'humidité, les nuages, les précipitations, le

rayonnement, en liaison avec les caractéristiques et les flux associés aux surfaces continentales et océaniques, et avec la répartition globale et régionale des gaz à effet de serre et des aérosols.

### 2.6.1.2. INTERACTIONS NUAGES/AEROSOLS/RAYONNEMENT : BILAN ENERGETIQUE

**Les aérosols d'origine anthropique** provoquent un forçage radiatif qui s'ajoute à celui des gaz à effet de serre. Ils résultent principalement de l'usage de combustibles fossiles qui produisent des dérivés des sulfates et des feux de biomasse qui produisent des dérivés carbonés absorbants ou non. Ils sont à l'origine d'un forçage négatif en réfléchissant vers l'espace une partie du rayonnement solaire incident, c'est ce que l'on appelle l'effet "direct" des aérosols. De plus, les aérosols provoquent un effet "indirect", résultant de leur influence sur les propriétés optiques des nuages à travers leur rôle en temps que noyaux de condensation. En effet, l'augmentation de la quantité d'aérosols entraîne, à contenu en eau constant, une diminution de la taille des gouttelettes ce qui modifie la répartition en taille des gouttes et ralentit le processus de formation des précipitations. Les estimations de ces deux effets dans le bilan énergétique de la Terre sont très incertaines et varient fortement d'un modèle à l'autre.

**L'influence des nuages sur le bilan radiatif** est double: d'une part, ils réfléchissent le rayonnement solaire et donc tendent à diminuer l'énergie absorbée, d'autre part, étant généralement fortement absorbants dans l'infrarouge, ils contribuent à l'effet de serre. L'expérience spatiale ERBE a permis de constater que l'augmentation de la réflexion par les nuages correspond à un forçage radiatif de  $-50\text{Wm}^{-2}$ , alors que leur effet de serre additionnel équivaut à un forçage positif de  $30\text{Wm}^{-2}$ . Chacun de ces termes est beaucoup plus important que les forçages anthropiques évoqués précédemment, la question est donc de savoir quelle sera la rétroaction radiative des nuages en réponse à ces forçages anthropiques. La couverture nuageuse totale semble avoir augmenté d'environ 2% au cours du 20<sup>ème</sup> siècle au-dessus des continents des latitudes hautes et moyennes de l'hémisphère Nord. L'effet radiatif total des nuages a donc probablement évolué au cours du siècle dernier, et on peut s'attendre à d'autres modifications dans l'avenir. La représentation des nuages dans les modèles est cependant extrêmement simplifiée; en particulier, les effets liés à l'hétérogénéité des nuages et à la forme des particules ne sont pas pris en compte. Un intense effort de recherche et de validation est nécessaire pour les améliorer.

### 2.6.1.3. CHIMIE ATMOSPHERIQUE

Sous l'influence des activités humaines, la composition chimique de l'atmosphère évolue et les concentrations de nombreuses espèces varient rapidement. La production d'énergie à partir des combustibles fossiles (charbon, pétrole), l'activité industrielle et agricole, le brûlage de la biomasse, conjugués à la croissance démographique continue, sont les principaux responsables de modification des émissions de constituants atmosphériques minoritaires, comme le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), le méthane ( $\text{CH}_4$ ), les oxydes d'azote ( $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$ ), les composés soufrés et chlorés. Cette évolution rapide de la composition atmosphérique engendre des manifestations physiques observables à l'échelle globale ou locale, comme la destruction catalytique de l'ozone, l'augmentation du réchauffement atmosphérique, la modification des propriétés oxydantes de la troposphère, et les pluies acides.

**Dans la troposphère**, les émissions en constituants primaires (gaz émis au niveau de la surface terrestre) d'origine anthropique, comme le monoxyde de carbone (CO), le méthane, les oxydes d'azote, les hydrocarbures et les composés soufrés augmentent. Ces quantités supplémentaires de gaz même restant à l'état de traces s'additionnent à celles engendrées par les processus naturels liés aux échanges avec la biosphère (sols, végétation, océans) et aux volcans. Ces modifications de la concentration en constituants primaires induisent des changements dans la concentration des constituants secondaires, qui sont produits par les réactions photochimiques qui se déroulent au sein de l'atmosphère, comme l'ozone ( $\text{O}_3$ ) et le radical hydroxyle (OH).

La concentration en OH détermine la capacité oxydante de l'atmosphère, c'est-à-dire son efficacité à détruire les polluants par des processus d'oxydation. Le contrôle des émissions (protocole de Kyoto) pour les pays industrialisés, et l'accroissement de l'activité économique dans les pays en voie de développement, vont induire des modifications importantes dans la distribution des constituants à l'échelle de la planète. En effet, toute modification dans l'émission d'un gaz trace induit des changements au niveau de la concentration en espèces oxydantes ( $\text{O}_3$  et OH), qui à leur tour affectent la durée de vie des polluants et leur distribution.

La question scientifique majeure pour l'étude de la troposphère est quelle est l'évolution de sa capacité d'oxydation ? Plus particulièrement :

- Quel est l'impact des modifications d'émission en gaz traces (CO, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, hydrocarbures...) ?
- Quelle est l'influence des régions fortement industrialisées sur la distribution des espèces ?
- Quel est l'effet des émissions liées au brûlage de la biomasse, en particulier dans les tropiques ?

**Dans la stratosphère**, l'impact de l'activité humaine s'est manifesté de façon indubitable par la mise en évidence à partir de 1985 du trou d'ozone au printemps austral au-dessus de l'Antarctique. Le rôle des chloro-fluoro-carbures (CFCs), inertes dans la troposphère, mais pouvant être photolysés dans la stratosphère et conduire à la destruction d'ozone par des cycles impliquant les espèces actives du chlore (ClO, Cl, C<sub>2</sub>O<sub>2</sub>...) a été clairement établi. Le Protocole de Montréal et ses amendements successifs, ainsi que le respect de ce premier règlement international concernant l'environnement par une grande majorité des pays signataires, ont conduit à partir de 1996 à une stabilisation et maintenant à une diminution des espèces sources les plus abondantes (comme CFC-11 et CFC-12) dans la troposphère.

Le maximum du chlore total dans la stratosphère semble avoir été atteint vers l'an 2000 avec une valeur de 3.8 ppb. Mais les produits de substitution (halons) ont contribué à l'injection de brome dans la stratosphère et les HCFCs (hydrochlorofluorocarbone), même s'ils ont une durée de vie plus courte dans la troposphère (et passent donc en moins grande abondance dans la stratosphère), continueront encore à maintenir un niveau élevé de composés halogénés (chlorés, bromés mais peut-être aussi iodés) dans la stratosphère. De plus, la température stratosphérique décroît en raison de l'augmentation des gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub> mais aussi N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, CFCs, HCFCs, SF<sub>6</sub>...) qui produisent un forçage stratosphérique négatif par émission infrarouge vers l'espace aux grandes longueurs d'onde de (phénomène prévu et en partie mis en évidence expérimentalement). Cette diminution de la température conduira à une abondance accrue des nuages stratosphériques polaires (PSC), et donc à des épisodes de destruction de O<sub>3</sub> qui ne seront pas nécessairement réduits par la diminution de l'abondance du chlore stratosphérique total. Les modèles ne prévoient pas une stabilisation de la destruction de l'ozone avant 2010 ni un retour à une abondance du chlore à son niveau antérieur (~ 2 ppb) avant 2040.

D'autres facteurs peuvent moduler les phénomènes de destruction d'ozone dans la stratosphère :

- Modification de la dynamique atmosphérique globale, qui peut accroître ou diminuer les échanges des composés halogénés entre les vortex polaires et les moyennes latitudes;
- Evolution des composés NO<sub>y</sub> qui, selon le niveau d'altitude, peuvent contribuer à détruire l'ozone ou à jouer un rôle tampon vis-à-vis des espèces chlorées;
- Modifications de la concentration et de la structure thermique de la haute troposphère/basse stratosphère, région qui détermine les échanges entre les deux compartiments.

La question scientifique majeure pour l'étude de la stratosphère concerne donc l'observation, la compréhension et la modélisation de son évolution sur une échelle décennale, c'est-à-dire précisément les processus qui déterminent (et détermineront) les pertes chimiques de l'ozone stratosphérique.

## 2.6.2. STRATEGIES ET OBSERVABLES

Pour rendre plus précises et plus fiables les analyses et prévisions atmosphériques, il faut améliorer de façon concomitante les moyens d'observation et la prise en compte des données dans les modèles numériques. Avant cela, il faut insister sur l'indispensable maintien des capacités observationnelles actuelles et favoriser la mise en forme, la validation, la diffusion et l'exploitation des données existantes. Ce point acquis, il sera nécessaire de poursuivre le développement d'instruments spécifiques destinés à la mesure de paramètres clés du système atmosphérique : éléments du cycle de l'eau, température, pression, vent, aérosols, composés chimiques, dans des gammes d'échelles spatiale et temporelle les plus larges possibles. Ces nouveaux capteurs seront ainsi, pour certains d'entre eux, des précurseurs des futurs instruments de la météorologie opérationnelle. L'atmosphère est un milieu complexe qui interagit notamment avec la surface continentale ou océanique à sa base, aussi faudra-t-il également prendre en compte les flux de matière et d'énergie aux interfaces.

### 2.6.2.1. DYNAMIQUE ET PHYSIQUE

En ce qui concerne la dynamique et la physique de l'atmosphère, des avancées considérables dans la compréhension des processus et dans les capacités de prévision devraient résulter d'une amélioration significative de la couverture spatiale et temporelle des observations de routine. Le réseau mondial de

radiosondages - très inhomogène - est certes complété par les profils de température et d'humidité obtenus à partir de mesures de radiances depuis l'espace (sondeurs opérationnels ATOVS), mais des progrès sont encore à accomplir dans la précision des restitutions et dans leur résolution verticale, ainsi que dans l'accès aux régions nuageuses. Le développement des sondeurs hyperspectraux en infrarouge (IASI, AIRS), de profileurs micro-ondes au-delà de 100 GHz ou d'associations radiomètres-lidar devrait amener des progrès substantiels dans les années à venir.

En dehors des mesures par les radiosondes, le vent n'est actuellement observé que de façon partielle depuis l'espace : vent de surface indirectement déduit de la mesure par radar ou radiomètre micro-onde de la rugosité de la surface océanique, vent à quelques niveaux à partir du déplacement des nuages vus par les instruments en orbite géostationnaire. Il faut notamment souligner l'importance de la mesure du vent dans les régions tropicales où l'équilibre du vent thermique, qui permet de le déduire du champ de température aux latitudes moyennes, ne s'applique que de façon très approximative. Une avancée remarquable résulterait de la disponibilité de champs de vent globaux, précis (de l'ordre du m/s) et avec une haute densité spatiale (environ 100 km horizontalement, 1 km verticalement). Le lidar Doppler spatial, tel que proposé dans le projet AEOLUS, apparaît ainsi un précurseur pour ce type de mesure.

Il faut aussi insister sur l'intérêt des mesures à très haute résolution temporelle pour la surveillance de phénomènes météorologiques à évolution rapide (orages, cyclones, tempêtes... ). Dans ce but, l'ensemble des satellites géostationnaires, qui ont constamment le même angle de vue, est un moyen privilégié, même si toutes les latitudes ne sont pas couvertes, et l'amélioration de la résolution attendue avec MSG devrait permettre une meilleure exploitation de ces observations.

### 2.6.2.2. SYSTEMES NUAGEUX ET PRECIPITATIONS

La modélisation constitue un outil fondamental en vue de comprendre l'initiation, le développement et la dissipation des amas nuageux. Les grandes campagnes de terrain offrent, par la richesse des mesures réalisées, un cadre idéal pour vérifier un certain nombre d'hypothèses. Elles demeurent néanmoins ponctuelles et réduites dans l'espace. Les observations par satellite quant à elles présentent le double avantage de permettre un suivi de la couverture nuageuse sur une longue période de temps et de fournir une analyse fine des propriétés mesurables des nuages et des précipitations. Ce sont essentiellement l'altitude et la température de sommet du nuage, son épaisseur, les contenus en eau liquide et en glace, les propriétés optiques, la forme et la taille des particules, voire leur orientation (cirrus). L'environnement (champs de température et vapeur d'eau) dans lequel les nuages se développent doit évidemment être connu le mieux possible puisqu'il conditionne pour une bonne part les valeurs des variables précédentes.

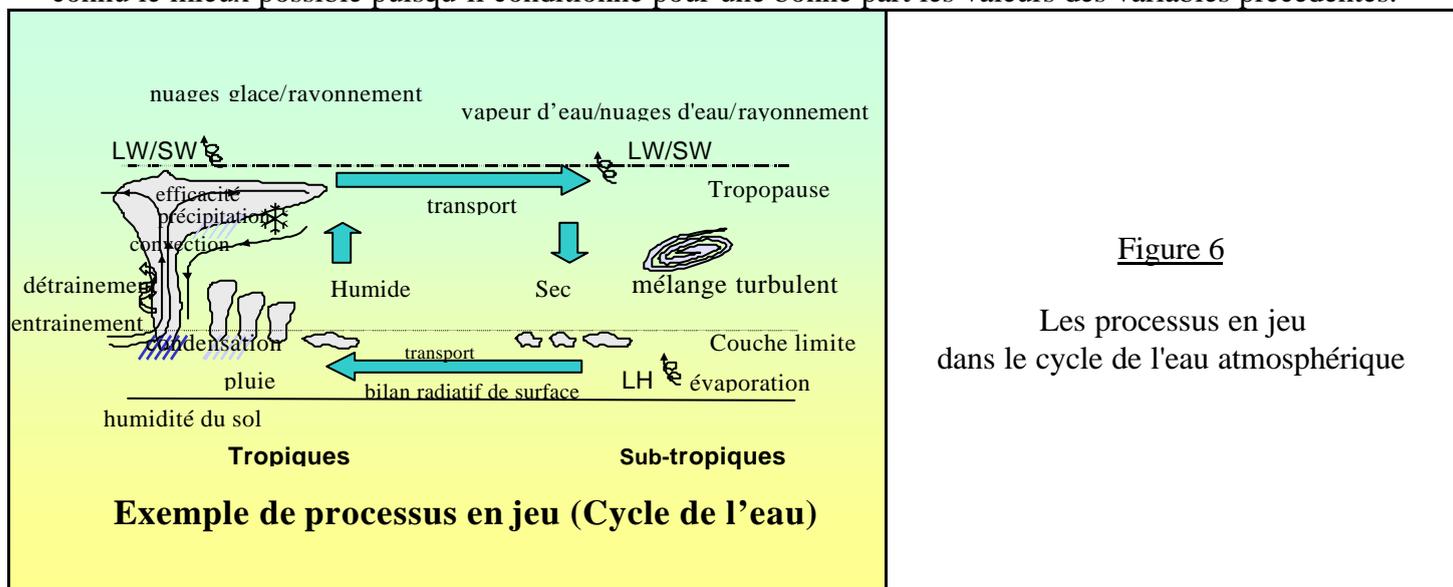


Figure 6

Les processus en jeu dans le cycle de l'eau atmosphérique

Les missions actuelles pour les petites échelles de temps et d'espace ne permettent pas d'accéder aux variables précédentes simultanément, ce qui pose au moins deux types de problèmes: celui de la colocalisation spatiale des observations et ceux liés à l'évolution rapide des variables (systèmes frontaux,...). A l'échelle globale, il reste encore impossible de dégager dans la variabilité de la couverture nuageuse déduite des observations par satellite ce qui relève de la variabilité naturelle de ce qui relève d'une tendance à long terme. Des missions, telles que CALIPSO et PARASOL, alliant différents types

d'instrumentation, et bénéficiant de synergies avec d'autres missions (AQUA, CLOUDSAT) vont améliorer de façon très significative notre connaissance des nuages.

Pour comprendre le cycle de vie des systèmes convectifs, pour aller vers une prévision quantitative des précipitations, pour mieux évaluer la libération de chaleur latente, et pour représenter plus correctement les nuages dans le transfert radiatif, il est nécessaire :

- d'améliorer la précision des restitutions,
- d'augmenter leur résolution horizontale et verticale,
- d'accroître la fréquence des observations,
- de distinguer les phases liquide et glace, d'identifier les caractéristiques principales des hydrométéores.

L'avenir réside probablement dans une combinaison de radiomètres infrarouge et micro-ondes, de radars, de détecteurs de l'activité électrique, sur plusieurs plates-formes formant une constellation de (mini- ou micro-) satellites optimisant la répétitivité des mesures. Les missions MEGHA-TROPIQUES et GPM (Global Precipitation Mission) contribueront à l'ensemble de ces objectifs.

Bien évidemment, l'exploitation pertinente de ces futures données spatiales nécessitera une architecture au sol capable d'en tirer le meilleur profit. A ce titre, il faut insister sur la nécessaire évolution des techniques d'assimilation pour exploiter des variables encore imparfaitement prises en compte par les modèles numériques. Ceci suppose des avancées importantes tant sur le plan théorique, qu'en ce qui concerne les moyens de stockage, de calcul et de visualisation.

### 2.6.2.3. INTERACTIONS NUAGES/AEROSOLS/RAYONNEMENT

Les mesures de flux solaire et infrarouge au sommet de l'atmosphère permettent de quantifier directement les échanges d'énergie entre le système Terre et l'espace. Ce type de mesures existe depuis plusieurs années (ERBS, ERBE, SCARAB, CERES), et avec les plates-formes TERRA, TRMM et AQUA, la continuité semble assurée jusqu'à 2007-2008. Au-delà, il n'y a pas dans le paysage actuel d'expériences dédiées à ce type de mesures à l'échelle globale. On peut citer la mission MEGHA-TROPIQUES mais elle restera confinée à la zone intertropicale. *La continuité de la mesure du bilan radiatif à l'échelle globale* est donc une priorité.

En ce qui concerne les **aérosols**, les paramètres qu'il est important de mesurer sont :

- Leur abondance et répartition dans l'atmosphère;
- Leurs propriétés physiques : granulométrie et l'indice de réfraction;
- Leurs propriétés radiatives : fonction de phase et absorption propre.

Le *contenu en aérosols* peut être obtenu à partir d'une mesure dans le domaine visible à condition que le modèle d'aérosols soit défini et que la contribution de la surface soit connue. Les instruments qui le permettent doivent couvrir un domaine spectral important comme MODIS ou avoir des spécificités d'observation comme la directionnalité (MISR, POLDER) ou la polarisation du rayonnement (POLDER). Le domaine de l'UV (TOMS) et de l'infrarouge (METEOSAT) sont également utiles mais ils ne permettent pas une surveillance globale de tous les types d'aérosols.

Il n'existe pas à l'heure actuelle de méthode robuste permettant de remonter précisément à *l'indice de réfraction*, bien qu'une mesure de polarisation (POLDER) semble susceptible de permettre une telle inversion. *L'absorption*, paramètre clé dans l'estimation du forçage radiatif, n'est actuellement pas déterminée depuis l'espace. Beaucoup de travail reste à faire dans ce domaine. La mesure de *l'altitude* de la couche à partir de mesures Lidar est par contre bien maîtrisée.

Une continuité des observations dans ce domaine n'est pas encore envisageable car beaucoup de problèmes méthodologiques restent à résoudre. Seul le contenu en aérosols est une grandeur qui commence à être obtenue de façon quasi-opérationnelle, bien que la précision ne réponde pas encore aux besoins tels que ceux de l'aviation civile qui est concernée par la présence de nuages de cendres volcaniques ou de poussières désertiques.

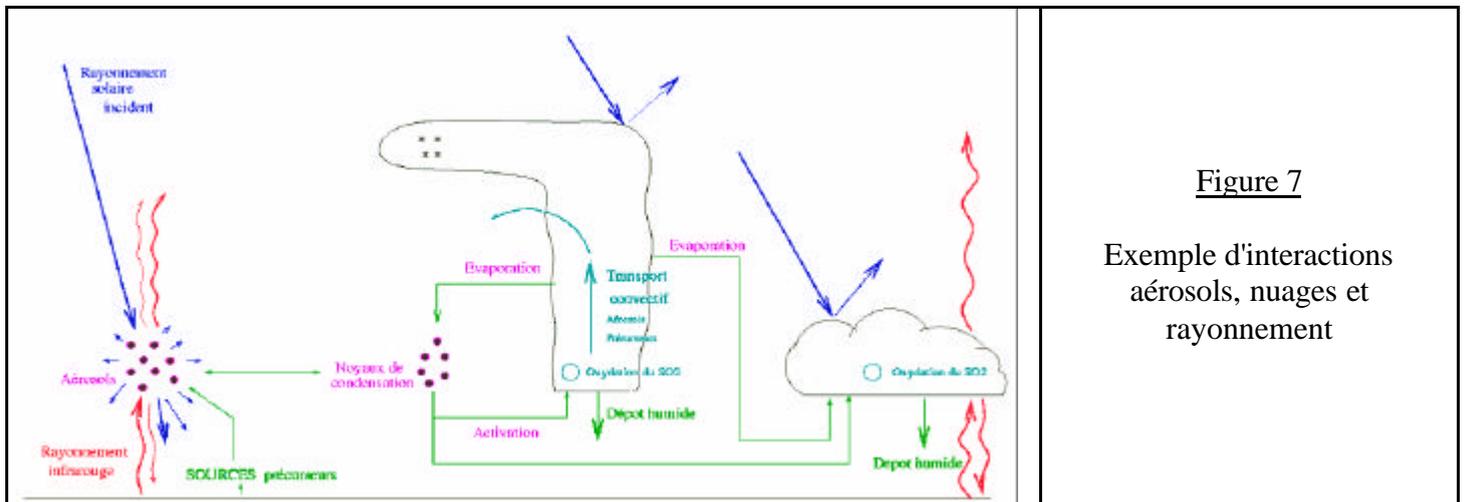


Figure 7

Exemple d'interactions  
aérosols, nuages et  
rayonnement

Pour caractériser les interactions entre les aérosols, les nuages et le rayonnement : les paramètres des nuages qu'il est important de mesurer sont

- La couverture nuageuse;
- L'altitude/pression du sommet du nuage;
- La phase et la distribution granulométrique;
- L'épaisseur optique visible et l'émissivité infrarouge;
- Le contenu en eau liquide ou glace

Les techniques de détection de **la couverture nuageuse** sont très variées. Elles utilisent classiquement les canaux visible et infrarouge thermique. Avec les nouveaux capteurs (MODIS) qui ont une résolution spatiale de l'ordre de quelques centaines de mètres, les résultats ont été nettement améliorés. En plus de ces méthodes traditionnelles, sont apparues des méthodes plus novatrices qui utilisent la directionnalité du rayonnement (MISR, POLDER).

**L'altitude du sommet du nuage** est un paramètre important pour l'estimation du flux IR. Il existe une variété d'instruments qui fournissent cette mesure à partir de techniques différentes. MODIS et AIRS qui utilisent l'infrarouge, POLDER qui utilisent la polarisation, les techniques actives comme le lidar (CALIPSO, EARTHCARE) ou les techniques d'absorption différentielle comme POLDER.

Il existe deux types de techniques pour obtenir **la phase des nuages**. Soit les techniques utilisant le différentiel d'absorption dans le solaire ou l'infrarouge entre l'eau liquide et la glace (MODIS), soit les techniques de polarisation (POLDER). Le fondement de cette nouvelle approche repose sur la séparation, par leur forme, entre gouttes d'eau liquide et cristaux de glace, l'état de polarisation de la lumière diffusée par des particules est, en effet, sensible à leur forme. Quant à la *dimension des particules*, c'est la combinaison de mesures visibles et infrarouge solaire qui permettent d'atteindre cette quantité (MODIS). Les mesures de polarisation (POLDER) permettent de déterminer, dans certaines conditions de visée, la distribution en taille des gouttelettes d'eau au sommet du nuage : cette mesure est complémentaire des méthodes classiques qui ont tendance à sonder les nuages à des niveaux plus profonds.

Les mesures de **l'épaisseur optique visible et de l'émissivité infrarouge** sont désormais classiques. Elles sont réalisées de façon satisfaisante par les plates-formes américaines (TERRA et AQUA) ou japonaise (ADEOS-II) qui seront d'ailleurs suivies par des missions opérationnelles comme VISR et METOP qui assureront la continuité de ces mesures à moyen terme. Les approches plus innovantes (MISR, POLDER) sont très complémentaires pour étudier des phénomènes comme l'homogénéité spatiale, la forme des nuages, l'orientation des cristaux de glace. Mais, avec POLDER-II et PARASOL, la continuité est n'assurée que jusque 2005-2006. Pour les nuages fins, l'apport de mesures lidar est primordial et les missions CALIPSO (2004-2007) et EARTHCARE (2008-2010) devraient répondre à cette demande.

Pour terminer, la détermination du **contenu en eau liquide** se fait à partir de mesures dans le domaine hyperfréquence (SSM/I, AMSR).

Il faut enfin citer les radar à 94 Ghz qui seront bientôt lancés dans les années qui viennent (CLOUDSAT et EARTHCARE). Ils permettront d'obtenir une information tri-dimensionnelle sur la structure du nuage, sa variabilité et son hétérogénéité. Ces expériences ont encore un caractère exploratoire et il n'est pas prévu d'en assurer la continuité pour le moment.

#### 2.6.2.4. CHIMIE ATMOSPHERIQUE

Les instruments spatiaux actuels ou à venir (embarqués sur diverses missions principalement ENVISAT et AURA, sans oublier les missions de météorologie opérationnelle) combineront sondages troposphériques, stratosphériques et haute-troposphère/basse-stratosphère, pour permettre l'étude des distributions spatio-temporelles des constituants atmosphériques minoritaires à l'échelle globale. Le tableau suivant (adapté d'une étude de l'ASE) regroupe les espèces chimiques dont la mesure peut être effectuée depuis l'espace, les missions dont le but est de mesurer ces constituants, et les précisions souhaitées. La première colonne reprend les espèces clés pour l'étude de la troposphère et de la stratosphère depuis l'espace; la troisième colonne résume les missions lancées.

Observable		Instrument	Précision (%) / résolutions verticale / horizontale
O <sub>3</sub>	Troposphère Stratosphère	TOMS,GOME,IMG,SCIAMACHY, OMI, TES, IASI ATMOS,SBUV,SAGE,GOMOS,MIPAS	10%/2 km/25 km 2%/2 km/50 km
CO	Troposphère Stratosphère	IMG,MOPITT,SCIAMACHY, TES, IASI	10%/2 km/25 km 2%/2 km/50 km
NO <sub>2</sub>	Troposphère Stratosphère	GOME, SCIAMACHY, OMI SAGE, GOMOS, MIPAS, ODUS	10%/2 km/25 km 10%/2 km/50 km
H <sub>2</sub> O	Troposphère Stratosphère	GOME,IMG,SCIAMACHY, TES, IASI SAGE	10%/2 km/25 km 5%/2 km/50 km
HNO <sub>3</sub>	Troposphère Stratosphère	TES	10%/2 km/25 km 10%/2 km/50 km
N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Troposphère Stratosphère	ATMOS, MIPAS	20%/2 km/50 km
SO <sub>2</sub>	Troposphère Stratosphère	TOMS,SCIAMACHY,OMI, TES ODUS	20%/C <sup>1</sup> /25 km 20%/2 km/50 km
CH <sub>4</sub>	Troposphère Stratosphère	IMG, MOPITT,SCIAMACHY, TES, IASI ATMOS, MIPAS	2%/C/25 km 5%/2 km/50 km
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Troposphère Stratosphère		20%/C/50 km 20%/2 km/50 km
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Troposphère Stratosphère		20%/C/50 km -
CH <sub>2</sub> O	Troposphère Stratosphère	GOME,SCIAMACHY	20%/C/25 km 20%/2 km/50 km
N <sub>2</sub> O	Troposphère Stratosphère	IMG,SCIAMACHY, TES, IASI	2%/C/25 km 5%/2 km/50 km
ClO(activation)	Troposphère Stratosphère		10%/2 km/50 km
BrO	Troposphère Stratosphère	GOME, SCIAMACHY SAGE, ODUS	10%/C/25 km 10%/2 km/50 km
HCl	Troposphère Stratosphère	ATMOS	10%/C/25 km 5%/2 km/50 km
ClONO <sub>2</sub>	Troposphère Stratosphère	ATMOS, MIPAS	5%/2 km/50 km
NO <sub>3</sub> (de nuit)	Troposphère Stratosphère	SAGE	20%/C/25 km 10%/2 km/50 km
CFC-11	Troposphère Stratosphère	IMG, TES ATMOS, MIPAS	2%/C/25 km 5%/2 km/50 km
CFC-12	Troposphère Stratosphère	IMG, IASI, TES ATMOS, MIPAS	2%/C/25 km 5%/2 km/50 km
HCFC-22	Troposphère Stratosphère	IMG, TES	5%/C/25 km 10%/2 km/50 km
Aérosols	Troposphère Stratosphère	TOMS, POLDER SAGE	10%/C/25 km 20%/C/50 km

<sup>1</sup> C=colonne totale

Tableau 1 : espèces chimiques mesurées par les instruments satellitaires existants et prévus.

Le principal avantage des mesures spatiales est la possibilité de mesurer les concentrations des espèces

avec une bonne couverture géographique et temporelle, au détriment de la résolution horizontale/verticale et de la précision. De ce fait, certaines espèces à courte durée de vie, comme OH, ne sont pas mesurables depuis l'espace. Les campagnes de mesures locales et régionales sont en général plus précises, tant d'un point de vue de la résolution spatiale et temporelle que de l'incertitude liée à la mesure. Elles permettent d'une part de valider les mesures par satellite, d'autre part d'accéder aux concentrations de constituants qui ne peuvent être détectés depuis l'espace. Enfin, l'utilisation de modèles de chimie-transport atmosphérique permet de combiner différents types de mesures pour étudier les processus physico-chimiques qui régissent la composition atmosphérique, en utilisant des techniques d'assimilation de données ou de modélisation inverse (pour quantifier les sources d'émission).

**Dans la troposphère**, l'accroissement des concentrations en CO et CH<sub>4</sub> s'est ralenti depuis 1990. Pour expliquer ces variations, les modèles de chimie-transport conjuguent les modifications de leurs sources d'émission, le changement de la capacité d'oxydation de l'atmosphère et la contribution d'éléments ponctuels comme l'éruption du Pinatubo. Pour comprendre et analyser ces phénomènes, il est important de *disposer de mesures continues d'ozone, de CO, de CH<sub>4</sub> et de NO<sub>x</sub> à l'échelle globale*. Grâce à l'assimilation de données, la mesure d'un des paramètres peut aussi apporter des informations sur les autres variables calculées et la distribution de certaines espèces chimiques non mesurées. Pour étudier la capacité oxydante de l'atmosphère et son évolution, il faut diminuer les incertitudes majeures sur la connaissance des bilans en OH et en O<sub>3</sub>, en ayant une *meilleure information sur les distributions spatiales, temporelles et les changements de tendance long-terme* pour CO, CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, en plus des températures, et des flux UV. Pour étudier l'impact régional et global des émissions associées aux régions fortement industrialisées et aux zones de brûlage de la biomasse, des observations sur les hydrocarbures non-méthaniques (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>), le PAN, HNO<sub>3</sub>, CH<sub>2</sub>O, CH<sub>3</sub>OH, CH<sub>3</sub>COCH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> et SO<sub>2</sub>, dont les concentrations peuvent être importantes localement, sont nécessaires. Les exigences en terme de précision varient d'une espèce à l'autre, et sont directement liées à la variabilité spatiale et temporelle du constituant et à sa durée de vie.

**Pour la stratosphère**, les instruments de sondage utilisent des visées au limbe ou en occultation (solaire ou stellaire), les instruments de sondage de la troposphère utilisent des visées au nadir. Certains instruments (SCIAMACHY, TES) peuvent combiner les deux modes de visée. Aucun des instruments actuels ne remplit les critères de précision et résolution souhaités. Il est à noter que des mesures auxiliaires en terme de température, fraction nuageuse et éclairs (NO<sub>x</sub>) sont aussi nécessaires. La sensibilité des instruments spatiaux étant moindre dans la couche limite et à la frontière haute troposphère – basse stratosphère, il faut coupler les mesures spatiales aux mesures in-situ et obtenues par des instruments embarqués à bord d'avions ou de ballons qui permettent de mieux sonder ces couches atmosphériques à l'échelle locale, en attendant le développement de capteurs spatiaux adéquats.



# LE CYCLE DE L'EAU

Le cycle de l'eau dans le système climatique traduit les échanges d'eau sous ses trois phases entre l'océan, l'atmosphère, les continents et les calottes polaires en réponse aux variations de flux d'énergie. Ces échanges d'eau s'effectuent par le biais de précipitations, d'évapotranspiration et de ruissellement dans les réseaux hydrographiques continentaux. Les variations du climat affectent le cycle de l'eau en modifiant les régimes des précipitations et l'évapotranspiration, et par voie de conséquence, le contenu en eau dans les sols, le manteau neigeux, les débits des fleuves et l'étendue des zones d'inondation. A l'inverse, la variabilité spatio-temporelle de l'humidité des sols et du manteau neigeux agit en retour sur le climat. En effet, avec la température de surface de la mer, le contenu en eau des sols et la couverture neigeuse constituent les plus importantes conditions aux limites des processus atmosphériques.

L'eau joue un rôle majeur dans le fonctionnement du système terrestre. Elle intervient dans les échanges surface-atmosphère au travers du couplage des bilans hydriques et énergétiques mais aussi au travers de son rôle déterminant sur les écosystèmes et les gaz à effet de serre.

Les activités humaines sont également très dépendantes de la ressource en eau : disponibilité en eau potable, besoins pour l'agriculture et l'industrie. Les crues et sécheresses constituent sans doute les éléments les plus médiatisés. L'exploitation intensive de la ressource en eau et les pollutions importantes liées aux activités humaines ont contribué à la raréfaction des disponibilités et à la dégradation de sa qualité. En conséquence, l'eau est devenue depuis quelques années un élément stratégique essentiel qui a motivé le développement de nombreuses applications visant à gérer au mieux cette ressource naturelle.

## **I. Les différents compartiments**

Si l'on accepte le principe de conservation de l'eau dans l'ensemble des enveloppes terrestres, tout transport de l'eau dans ce système participe à un cycle dont la complexité résulte de la variété des milieux impliqués, que l'on peut subdiviser en hydrosphère, cryosphère, atmosphère, biosphère et lithosphère.

De multiples transports d'eau, sous ses trois formes solide, liquide et vapeur, participent au cycle de l'eau : de la vapeur d'eau est transférée depuis la surface du globe vers l'atmosphère, grâce à l'évaporation de l'eau des océans, des lacs, des rivières, du sol..., à la transpiration des plantes, et à la sublimation de la glace et de la neige; l'eau est transportée dans l'atmosphère soit sous forme vapeur, soit sous forme liquide ou solide au sein des nuages; de l'eau est transférée de l'atmosphère vers la Terre par précipitation de l'eau liquide ou solide des nuages, ou par condensation directe de la vapeur d'eau atmosphérique sur les surfaces terrestres; l'eau apportée par l'atmosphère est soit ré-évaporée, soit transportée, à travers les rivières et les aquifères, jusqu'aux océans, et le cycle recommence.

Malgré les relatives incertitudes sur les volumes d'eau échangés, on peut définir le cycle hydrologique global par deux branches horizontales, la branche atmosphérique et la branche continentale, associées à des transports opposés, et couplées par deux branches verticales, au sein desquelles les échanges d'eau sont réalisés par changement de phase (figure E1.1).

Enfin, l'eau continentale transite dans différents réservoirs, décrits dans le tableau E1, dont l'importance est fondamentalement différente selon que l'on s'intéresse au stock d'eau ou au flux qu'ils représentent. Par exemple, le flux de l'ensemble des rivières, plus petit réservoir, est 10 fois supérieur à celui de l'Antarctique, second réservoir d'eau après l'océan.

	temps de résidence	% eaux	% eaux douces	Stock(en km <sup>3</sup> )	Flux(1000 km <sup>3</sup> /an)
Calottes polaires	1000 à 100 000 ans	2.	75.75	33 000 000	2.5
Eaux souterraines	1400 ans ?	0.6 ?	22.7	8 000 000	10.5
Glaciers de montagne	1 à 20 ans	0.02	0.75	330 000	
Mers intérieures, lacs	10 à 20 ans ?	0.015	0.5	205 000	
Humidité des sols	1 an	0.005	0.2	70 000	
Neige continentale	saison	0- 0.0002	0- 0.006	0 à 3 000	
Rivières	15 jours	0.0001	0.003	1 700	27

Tableau E1 : Réservoirs continentaux et répartition des flux vers l'océan

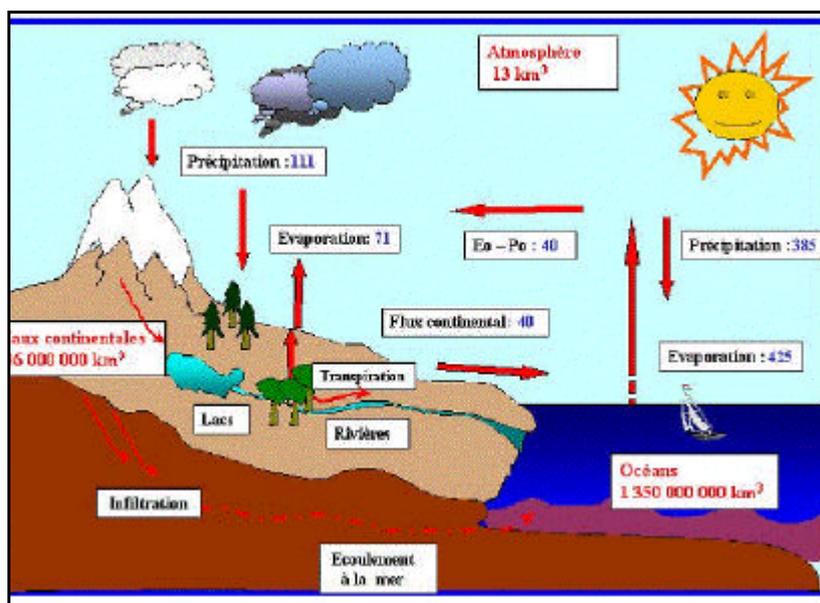


Figure E1.1

### Le cycle de l'eau

Le stock des différents réservoirs, exprimés en km<sup>3</sup>, sont indiqués en rouge.

Les flux entre les différents réservoirs, exprimés en 1000 km<sup>3</sup>/an, sont indiqués en bleu.

Cette position cruciale du cycle de l'eau entre climat et environnement est profondément liée à la grande gamme d'échelles qu'il recouvre. Le cycle de l'eau global intègre de nombreux processus, des échelles les plus larges aux plus fines :

- La circulation générale de l'atmosphère, qui conditionne les grandes zones de convergence et divergence de vapeur d'eau; elle est aussi liée aux moussons, ainsi qu'à l'évolution des systèmes dépressionnaires, qui sont tous deux une source majeure de précipitation aux échelles régionales.
- A une échelle plus locale, un processus dominant est la convection atmosphérique, qui reste une question scientifique forte, et ce d'autant plus qu'elle est intimement liée aux processus régionaux précédents. Elle dépend fortement des interactions avec les surfaces continentales et océaniques, créant ainsi des recyclages locaux et/ou régionaux, qui constituent des sortes de "mini" cycles de l'eau. L'ordre de grandeur de ces recyclages par rapport à la convergence à grande échelle est encore mal connu.

Les travaux de modélisation numérique indiquent qu'une des manifestations du changement climatique résiderait justement dans l'intensification du cycle de l'eau, à savoir davantage de précipitations, et d'évaporation ou davantage de précipitations et de fonte en ce qui concerne les composantes de la cryosphère. L'effet résultant a une variabilité régionale importante. Dans le cas d'un cycle de l'eau plus actif, on s'attend à ce qu'il y ait davantage de perturbations, et que celles-ci soient plus intenses avec des manifestations locales parfois violentes.

Certains éléments de la cryosphère ont un rôle particulier dans le cycle de l'eau, en tant que stock important, comme les calottes polaires, ou en tant que régulateur du débit des rivières, comme les glaciers des montagnes, ou encore dans le bilan hydrique de surface, comme la neige. Ces éléments ont aussi, par leur effet d'albédo un rôle important sur le climat, et ils sont des indicateurs sensibles des altérations climatiques. Ainsi, ce sont les effets de rétroaction positive entre température et couverture neigeuse qui expliquent une partie du réchauffement climatique mesuré dans les hautes latitudes boréales.

## II. Les besoins dans les différents milieux

### Atmosphère

En ce qui concerne la composante atmosphérique, la vapeur d'eau, la couverture nuageuse, les taux de précipitation, ainsi que la température, doivent être mieux estimés. En effet, les tendances observées diffèrent suivant les saisons, les régions et la partie de l'atmosphère considérée (troposphère, stratosphère).

Les missions actuelles ou prévues à court terme avec des instruments tels que IASI/AIRS, AMSU devraient permettre d'obtenir des profils de température et d'humidité dont la précision approcherait celle des mesures in situ. La contribution des nuages en termes de bilan d'eau est relativement faible, leur rôle étant plutôt à rechercher dans le domaine radiatif.

Pour notre problématique, c'est le terme précipitations qui est primordial. Les réseaux synoptiques d'observation (stations classiques et radar météorologiques) s'avèrent insuffisamment denses pour représenter la variabilité spatiale très forte de la pluviométrie. Les projets MEGHA/TROPIQUES et GPM, succédant à TRMM, constitueront une constellation de satellites équipés de sondeurs micro-ondes passifs associés à un radar, seule solution permettant d'avoir des estimations correctes des précipitations. Ces missions sont essentielles et préparent un futur suivi opérationnel des précipitations depuis l'espace.

### Océan

Le facteur principal des variations d'eau douce dans l'océan est le bilan Evaporation - Précipitations (bilan E-P) à l'interface air/mer, auquel il faut ajouter l'apport des eaux continentales dont l'impact peut être régionalement très important. 90% des apports sur l'océan se font par précipitations au-dessus des océans. Ces variations d'eau douce dans l'océan ont deux impacts principaux : une variation de la masse de l'océan (qui se répartit en quelques jours dans tout l'océan à la vitesse des ondes barotropes), et surtout une variation locale de la salinité, donc de la densité et de la dilatation de la colonne d'eau, ce qui induit des hétérogénéités du niveau de la mer et donc de la circulation océanique. Même si ce transport d'eau douce océanique (de l'ordre de  $0,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) est infime par rapport au transport général, il est un moteur important de la circulation générale des océans ! On voit donc que le cycle de l'eau joue dans l'immensité océanique un rôle à ne pas négliger.

La mesure des variations du niveau de la mer est par conséquent une première exigence pour le suivi du cycle de l'eau dans l'océan. Le système de mesure altimétrique composé aujourd'hui des satellites TOPEX-POSEIDON et ERS-2 (rajeuni par les missions JASON-1 et ENVISAT), a révélé dans la précédente décennie sa contribution essentielle dans un observatoire permanent du niveau de la mer. La pérennisation de cette filière altimétrique - telle qu'elle se discute pour la mission JASON-2 ou les missions post-ENVISAT - est donc une priorité.

En revanche, ni la modélisation ni la mesure directe du bilan E-P ne sont aisées. Mais la variation d'eau douce étant directement liée à la variabilité de salinité de l'océan, la mesure du bilan de sel de surface peut remplacer celle du bilan d'eau douce. Les missions SMOS (qui devrait fournir les premières mesures spatiales de la salinité de surface océanique), puis AQUARIUS, offrent donc une opportunité sans précédent. C'est certainement la contribution la plus significative à attendre dans les prochaines années.

Au-delà des caractéristiques de grande échelle, les variations d'eau douce sont à considérer avec attention à l'échelle régionale et locale : on sait en effet que les apports d'eau douce des rivières représentent 10% de l'apport total d'eau douce à l'océan. L'observation du delta de l'Amazone par altimétrie satellite (TOPEX-POSEIDON) a montré des résultats préliminaires importants et invitent forcément à considérer les perspectives offertes par une observation altimétrique à haute résolution spatiale et temporelle.

### Eaux continentales : bilan de masse / grandes échelles

Tout en étant une composante majeure du système climatique, la branche continentale du cycle de l'eau est aussi la composante qui reste la plus mal connue. De nouvelles missions de gravimétrie spatiale ont été conçues et développées pour mesurer les variations temporelles du champ de gravité avec une résolution et une précision jamais atteintes. Les applications principales à ces missions sont:

- L'étude des variations spatio-temporelles des stocks d'eaux continentales et du manteau neigeux;
- L'étude des redistributions à grande échelle des masses au sein de l'océan;
- Le bilan de masse des calottes polaires.

Ces missions devraient fournir - sur les régions continentales – une mesure des variations des stocks d'eaux continentales sur les grands bassins hydrographiques, avec une précision de quelques mm en terme de hauteur d'eau, et un échantillonnage mensuel. Des études récentes ont montré que les fluctuations temporelles (de l'intra saisonnier à l'inter annuel) du contenu en eau des grands bassins fluviaux du globe seront mesurables.

Bien que développée et optimisée pour le plein océan, l'altimétrie spatiale s'avère être aussi un outil très utile pour étudier les fluctuations temporelles des niveaux d'eau de surface sur les continents, en particulier les niveaux des lacs et des grands fleuves. Le suivi des variations temporelles des niveaux d'eau des fleuves est classiquement réalisé par des enregistrements *in situ*. Cependant, la plupart des grands bassins fluviaux couvrent des régions d'accès difficile, ce qui limite considérablement l'installation de réseaux opérationnels de stations hydrographiques. L'altimétrie spatiale est un outil complémentaire grâce à couverture spatiale dense et globale. Quelques études récentes ont en effet montré que cette technique a le potentiel pour mesurer les fluctuations spatio-temporelles des niveaux d'eau sur les mers intérieures, les lacs, les fleuves et même les zones d'inondation permanentes et temporaires. En combinant les mesures des missions altimétriques spatiales ERS-1 et -2, TOPEX-POSEIDON, puis JASON-1 et ENVISAT, il deviendra possible de quantifier les fluctuations spatio-temporelles des bilans de masse d'eau de surface. Bien que les eaux de surface ne représentent qu'une petite fraction des eaux continentales, la contribution de l'altimétrie à leur étude a non seulement un intérêt propre (impact de la variabilité climatique, en particulier des événements ENSO et NAO, sur les réserves en eaux de surface et l'étendue des zones d'inondation), mais permet en outre la séparation des contributions respectives des eaux de surface et des sols qui seront mesurées de façon intégrée par GRACE.

### **Eaux continentales : échanges / échelle locale**

Bien que souvent négligée, l'interception de la pluie par la végétation et sa restitution vers l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau par évaporation peut être significative. Elle dépend étroitement de l'intensité de la pluie, de la structure et de la densité de la végétation. Les variables telles que : occupation du sol, indice foliaire ou structure horizontale et verticale de la végétation en sont les principaux déterminants. En revanche, la partition entre ruissellement et infiltration dépend principalement de l'intensité de la pluie, de la pente, du type de couverture du sol (résidus de récolte, type et densité de la végétation), de la rugosité du sol, de ses caractéristiques hydrodynamiques qui sont en grande partie dictées par son humidité, ainsi que par le type de sol. L'utilisation des satellites passe par la combinaison des imageurs visible (ex. SPOT), infra-rouge et SAR.

Les chemins de l'eau définis par la topographie constituent une information essentielle à la description du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant car ils conditionnent les transferts horizontaux. Le débit des fleuves peut ainsi être déduit de la connaissance des écoulements locaux (superficiels et souterrains) modulés par la forme et la pente (topographie) du lit. On peut aussi avoir accès au débit des fleuves par différentes méthodes : mesures de hauteur d'eau et des vitesses d'écoulement interprétées grâce à des courbes de tarage, ainsi que l'analyse de différents traceurs et de la turbidité des eaux. Aucune information satellitaire n'est actuellement disponible ou en préparation pour la mesure du débit des rivières, mais des réflexions sont engagées, compte tenu de son importance dans le cycle de l'eau.

### **Cryosphère**

L'étendue du manteau neigeux, tout comme celle des glaces de mer, est mesurée par radiométrie hyperfréquence depuis une trentaine d'années ce qui permet d'observer certaines tendances. Ces capteurs sont très sensibles aux événements de fonte ayant fréquemment lieu à l'automne et au printemps, si bien que la durée totale de l'enneigement est encore relativement mal estimée. De même, l'épaisseur n'est toujours pas accessible avec une précision raisonnable, même si des tentatives ont été faites dans le domaine des hyperfréquences.

En ce qui concerne les glaciers, il est encore très difficile d'estimer la ligne d'équilibre, c'est-à-dire la limite entre la zone d'accumulation et la zone d'ablation. Pourtant, c'est cette ligne qui renseigne sur la santé du glacier et sur ses capacités de stockage. Quant aux calottes polaires de l'Antarctique et du Groenland, les techniques d'interférométrie et l'altimètre d'ERS ont permis des avancées notables dans la connaissance de leur dynamique et de l'écoulement de la glace. En revanche, leur volume reste toujours méconnu. L'épaisseur de glace, dépassant 4000 m en Antarctique n'est accessible qu'à basse fréquence, en bande P. Mais c'est surtout le bilan de masse dont même le signe reste encore inconnu. Les

incertitudes sur la quantité de neige accumulée chaque année et sur le débit de glace à la côte sont telles que seul le suivi du volume total par altimétrie permet d'évaluer le bilan de masse de ces calottes, avec les données d'ERS 1 et 2, puis d'ENVISAT. A moyen terme, le bilan de masse sera estimé grâce à la synergie des altimètres haute-résolution (CRYOSAT, ICESAT) et de GRACE puis GOCE.

### **III. Conclusion**

A court terme (d'ici 4 ans), les lancements de GRACE et d'ICESAT, couplés aux mesures des altimètres classiques : JASON-1 et ENVISAT, devrait permettre une avancée substantielle en ce qui concerne le cycle de l'eau, continentale, atmosphérique et océanique. Après 2005, SMOS permettra l'estimation de l'humidité des sols et de la salinité des océans, CRYOSAT du bilan des glaciers et des calottes polaires, et MEGHA/TROPIQUES et GPM des précipitations.

A plus long terme, au delà de l'observation des océans à haute résolution spatiale et temporelle par altimétrie qui doit absolument être pérennisée, les concepts à développer permettant de mieux appréhender le cycle de l'eau sont probablement le radar basse fréquence (contenu en eau des sols sur les premiers mètres, volume total des calottes polaires), et des techniques permettant de mesurer la vitesse des eaux, le niveau des fleuves, le bilan de masse des glaciers et des calottes.



# LES GAZ A EFFET DE SERRE

## I. Introduction

Le principal défi de la prochaine décennie est de mettre en place un système intégré, à terme opérationnel, de suivi des flux de CO<sub>2</sub> pour d'une part contraindre les modèles d'évolution du cycle du carbone, et d'autre part apporter une estimation indépendante des flux dans le cadre des négociations internationales sur les gaz à effet de serre.

Les gaz émis dans l'atmosphère par les activités humaines (transport, industrie, agriculture, combustion de la biomasse tropicale, etc...) contribuent directement à l'effet de serre additionnel. Les trois gaz principaux sont le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>) et le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O). Ces trois composants existent aussi à l'état naturel et sont fortement liés à l'activité de la biomasse et au cycle du carbone. Seule une vue intégrée de l'ensemble des composantes naturelles et anthropiques de ces cycles permettra de comprendre et contrôler leurs évolutions.

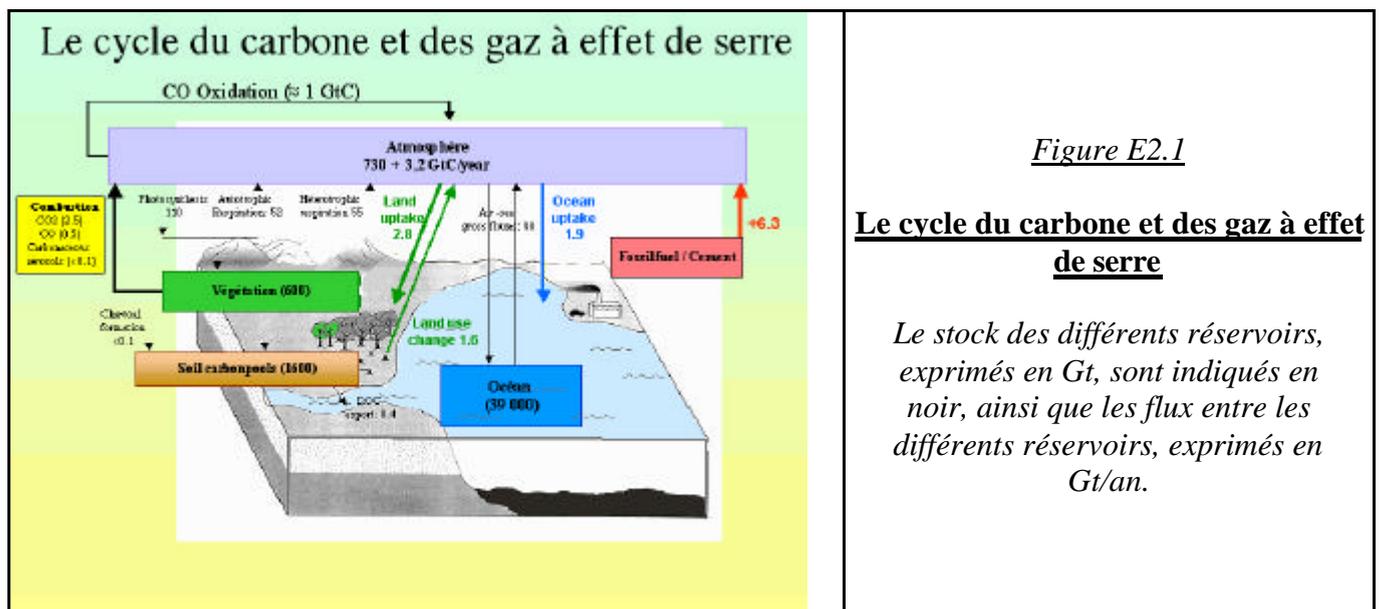


Figure E2.1

### Le cycle du carbone et des gaz à effet de serre

Le stock des différents réservoirs, exprimés en Gt, sont indiqués en noir, ainsi que les flux entre les différents réservoirs, exprimés en Gt/an.

## II. Les grands défis du cycle du carbone

Le CO<sub>2</sub> augmente d'environ 0.5 % par an suite aux rejets anthropiques d'une part, et à la régulation partielle du CO<sub>2</sub> en excès par la biosphère continentale et l'océan d'autre part. La connaissance de la dynamique spatiale et temporelle des flux de carbone échangés avec l'atmosphère est fondamentale pour :

- Estimer à l'échelle régionale les bilans (approche diagnostique dans le contexte de vérification du protocole du type Kyoto);
- Evaluer les modèles d'évolution du carbone, couplée à celle du climat, afin de quantifier la capacité des milieux naturels à stocker, plus ou moins durablement, du carbone (approche pronostique au cours de l'ère industrielle, passée, présente et future).

Les principaux défis à relever sont les suivants :

### Comment diagnostiquer la variabilité des flux de carbone échangés avec l'atmosphère ?

Deux approches complémentaires sont possibles : à petite échelle, à partir de l'agrégation de données et de modèles locaux, ou à grande échelle, à partir de la désagrégation des données atmosphériques en CO<sub>2</sub>. La réconciliation entre ces deux approches nécessite l'assimilation massive et conjointe de données spatiales tant océaniques, biosphériques qu'atmosphériques.

### Comment contraindre les mécanismes d'impact anthropique sur la biosphère continentale et les sols ?

Certains mécanismes (déforestation, usage des sols...) ont un effet direct et un impact local. Une haute résolution spatiale est nécessaire pour établir l'évolution fine de l'utilisation des sols à l'échelle des dernières décades. D'autres (CO<sub>2</sub> et fertilisation, changement des caractéristiques climatiques) ont un effet indirect et un impact régional. Leur prise en compte nécessite une haute résolution temporelle sur une longue période bien calibrée.

### Comment contraindre les mécanismes d'impact anthropique sur la géochimie océanique ?

L'approche locale nécessitera de comprendre de nombreux mécanismes ayant un effet direct sur la variabilité des flux de carbone : l'apport des rivières et les impacts en milieux estuariens-côtiers, le fonctionnement de la biomasse...

A l'échelle régionale, d'autres effets seront à étudier : la dissolution du CO<sub>2</sub>, la réponse à la stratification océanique... Outre l'utilisation croissante de modèle couplé océan-atmosphère-gaz à effet de serre, cette approche repose également sur le développement de nouveaux systèmes opérationnels de suivi du carbone océanique (bateaux et bouées) conjointement avec l'utilisation des archives en océanographie opérationnelle.

### III. CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O

Tous les gaz atmosphériques (sauf le CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O) sont éliminés par des processus photochimiques. Les gaz à effet de serre contenant un ou plusieurs atomes d'hydrogène (ex. CH<sub>4</sub>), ainsi que les autres polluants, sont essentiellement éliminés de l'atmosphère par réaction avec le radical hydroxyle, OH. Cette oxydation par OH prend principalement place dans la troposphère et dépend fortement de la latitude et de la saison. L'étude de la variabilité des gaz à effet de serre et de leur évolution temporelle nécessite de bien caractériser le terme de puits atmosphérique de ces gaz et donc la capacité oxydante de la troposphère. Enfin, une forte destruction dans la stratosphère est à prendre en compte pour le N<sub>2</sub>O.

Les sources et les puits sont de natures très différentes selon le gaz considéré, tant dans leur distribution spatiale que leur évolution temporelle, du cycle diurne à l'échelle inter-annuelle. Les sources dites anthropiques peuvent être produites par des processus variés tels que:

- les rejets directs (production énergétique, industrie, transports...);
- les déchets et leur gestion;
- les effets indirects sur la biosphère terrestre (déforestation, pratique culturale...);
- la gestion de l'élevage.

Enfin, il est à noter que pour établir le bilan des gaz à effet de serre, il est nécessaire de connaître l'évolution des puits et sources dans les milieux naturels (biosphère non gérée et océan).

Les principales sources de CH<sub>4</sub> sont les filières énergétiques, l'élevage (ruminants), l'agriculture (riz essentiellement), la gestion des déchets et les feux de biomasse. A cela il faut ajouter l'importance des zones humides (marais) : sources naturelles de CH<sub>4</sub>, qui peuvent être affectées par le changement du climat, la gestion de l'eau et des sols. Pour le N<sub>2</sub>O, les rejets majeurs sont liés à l'agriculture (engrais dans les sols notamment), l'industrie, l'élevage et les feux de biomasse, ainsi que les forêts et les zones herbacées, qui sont deux sources naturelles.

Dans la pratique, seuls les rejets directs, liés à l'énergie, sont estimés avec une précision relativement bonne (<10%). Les autres sources et puits sont estimés en général à partir d'études ponctuelles, et extrapolés grossièrement à l'échelle d'une région ou d'un pays. Les incertitudes associées sont généralement supérieures à 30%. En particulier, le rôle de la végétation et des sols, milieu inhomogène et très perturbé, représente la plus grande incertitude dans les bilans nationaux sur le CH<sub>4</sub> et le N<sub>2</sub>O.

Là aussi la compréhension du **cycle du carbone** au sens large, c'est-à-dire incluant les réponses de la biomasse au changement global, est indispensable.

### IV. Méthodologie

D'une manière générale, la méconnaissance actuelle des puits et sources des gaz à effet de serre est révélée par la difficulté de clore les bilans à l'échelle de la planète. C'est-à-dire que la comptabilisation de l'ensemble des sources moins les puits n'est pas en adéquation avec l'accumulation observée dans l'atmosphère. Deux approches complémentaires, à partir des données de satellites, peuvent être développées pour améliorer les inventaires des sources et des puits.

#### L'approche d'agrégation (des processus)

Elle consiste à partir de notre connaissance des mécanismes de base de production des gaz à effet de serre, notamment ceux liés à la biosphère terrestre, pour établir des inventaires vérifiables à l'échelle locale. L'extrapolation à l'échelle régionale ou d'un pays ne peut s'entreprendre que si les mécanismes des sources et puits sont fonction de conditions environnementales spatialisables (types d'écosystèmes, de pratiques agricoles, d'élevage, de gestion de déchets, densité de population, etc...). La télédétection

spatiale est un outil de choix pour cette spatialisation; néanmoins elle doit être intimement associée aux connaissances *a priori* des mécanismes et à des données indépendantes au sol.

Seule l'assimilation massive des données de satellites dans des modèles intégrés (physique, chimique et biologique) des surfaces continentales peuvent ouvrir la voie. Cette **approche intégrée climat-carbone** doit permettre une meilleure estimation des sources et des puits, et surtout de leur évolution à l'échelle d'une région ou d'un pays. Toutefois, la validation à grande échelle de ce type d'approche basée sur des données de surface reste problématique, et nécessite l'utilisation conjointe d'une approche atmosphérique.

### L'approche de désagrégation (des gradients atmosphériques)

L'**atmosphère** est par essence le milieu **intégrateur** des flux de surface. Les masses d'air au cours de leur transport s'enrichissent en gaz à effet de serre au-dessus des régions sources. Les gradients de concentration atmosphérique reflètent donc, au transport près, les sources et les puits en surface. La détection de ces gradients est donc un défi primordial.

Cette approche dite d'inversion ou de désagrégation des concentrations a été appliquée pour le CO<sub>2</sub>. Toutefois le mélange atmosphérique étant rapide, l'information est pour le moment accessible à très grande distance uniquement (typiquement une bande de latitude). Seul un réseau extrêmement dense et précis peut permettre à terme une régionalisation des flux à l'échelle d'un pays.

L'utilisation d'une telle technique est envisageable pour les autres composés à effet de serre comme le CH<sub>4</sub> et le N<sub>2</sub>O, mais il sera nécessaire d'établir la répartition des puits dans la colonne atmosphérique, et donc la répartition du principal oxydant, le radical hydroxyle OH.

Le développement de nouveaux capteurs, combiné à la densification des réseaux de suivi des composés à effet de serre, est prometteur. Seule **la télédétection du CO<sub>2</sub>** devrait à terme permettre un contrôle indépendant des politiques de réduction des émissions (protocole type Kyoto), et ainsi même contribuer à leur implémentation.

## V. L'apport des mesures spatiales

Comme déjà indiqué ci-dessus (cf. agrégation), le **suivi** de l'état des **réservoirs de surface** (biosphère continentale, biosphère marine et océan) ne permet pas d'estimer les flux échangés avec l'atmosphère. Il peut uniquement valider ou spatialiser des **modèles du cycle du carbone** intégrant la végétation, les sols et la bio-géochimie en lien avec le climat, la circulation océanique et les perturbations anthropiques (changements d'utilisation des sols notamment). Les observables, déjà nombreux, concernant les propriétés de surface sont décrits dans la section 2.4 de ce document.

Beaucoup plus **novateur** est le suivi direct des **gradients atmosphériques** (cf. désagrégation) en CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O et surtout CO<sub>2</sub>.

Pour le CO<sub>2</sub>, de nombreuses études analysent la possibilité d'estimer la concentration en CO<sub>2</sub> à partir des mesures à haute résolution spectrale dans l'infrarouge thermique (AIRS, IASI). Toutefois dans l'infrarouge thermique, la difficulté est de distinguer les effets de température des effets liés à la concentration; à ce jour la précision du ppm est accessible seulement à très grande échelle (>10 000km). La haute résolution dans le solaire (proche IR) par réflexion de la lumière solaire est au contraire très encourageante. Les premiers jeux de données sont attendus avec SCIAMACHY mais uniquement à partir du flux solaire réfléchi à la verticale. Seul **le lancement de plusieurs missions dédiées au CO<sub>2</sub> permettra d'améliorer sensiblement** la résolution spatio-temporelle (projet OCO de la NASA). Enfin des études prometteuses, fondées sur des lidars différentiels, sont en cours pour obtenir des profils et une couverture nocturne du CO<sub>2</sub>.

La mesure du CH<sub>4</sub> par satellite avec une précision satisfaisante est relativement plus facile que pour le CO<sub>2</sub>. En effet, ce gaz a un temps de résidence plus court dans l'atmosphère, ce qui conduit à des gradients spatiaux plus importants. Cependant, il est nécessaire, pour passer des concentrations aux flux de surface, d'être capable de quantifier le puits atmosphérique lié aux radicaux OH fortement variables dans l'espace et le temps. L'instrument MOPITT vole actuellement sur la plate-forme TERRA et permet des mesures du méthane troposphérique via une technique de corrélation spectroscopique. Cette concentration pourra aussi être estimée à partir des mesures de l'instrument TES à bord de AURA ou d'IASI à bord de METOP, qui fourniront des spectres d'émission dans l'infrarouge thermique en visée vers le nadir. Ces sondes ont une bonne résolution spatiale (de l'ordre de 10x10km), mais par contre une mauvaise résolution verticale.

Comme pour le CO<sub>2</sub>, une mesure des concentrations de CH<sub>4</sub> sera aussi faite sous certaines conditions de visée par l'instrument SCIAMACHY.

Le N<sub>2</sub>O présente, comme le CO<sub>2</sub>, une forte absorption spectrale dans l'infrarouge thermique, mais les gradients de concentration sont difficiles à mesurer. Des études supplémentaires sont nécessaires pour identifier l'apport des mesures par sondage atmosphérique pour mieux connaître sa distribution. Enfin comme pour le CO<sub>2</sub> et le CH<sub>4</sub>, l'instrument SCIAMACHY apportera ponctuellement des contenus intégrés.

## **VI. Conclusion**

A court terme, les instruments de météorologie opérationnelle AIRS et IASI, couplés aux missions de chimie atmosphérique ENVISAT et AURA, devraient permettre de disposer des données permettant la mise en œuvre des approches méthodologiques décrites ci-dessus. Au-delà, des missions spécifiques permettront par une amélioration de la résolution spatio-temporelle de répondre aux défis du cycle du carbone.

### 3. L'HOMME ET L'ENVIRONNEMENT NATUREL

Le milieu naturel constitue une ressource pour l'humanité : ressources minérales pour l'industrie, ressources en énergie (charbon, hydrocarbures, énergie solaire et éolienne), ressources en eau, ressources agricoles et halieutiques, ressources en territoire, etc. Il est aussi une source de nombreux aléas et risques : séismes, éruptions volcaniques, tsunamis, incendies, inondations, glissements de terrain, tempêtes, cyclones, chute de neige, grêle, etc.

La pression de l'homme sur l'environnement terrestre est extrêmement forte. Ce n'est pas un phénomène nouveau. Ainsi, la retraite des forêts en Europe au cours du dernier millénaire est essentiellement due à l'homme. Elle se poursuit aujourd'hui avec l'exploitation intensive des bois tropicaux au rythme d'une dizaine de millions d'hectares par an. Globalement, suite à l'accroissement rapide de la population (doublement en quarante ans) et des moyens techniques qui sont à sa disposition, la pression anthropique sur l'environnement a tendance à augmenter très rapidement.

A l'inverse du chapitre 2 qui traite de la compréhension et de l'évolution du système Terre, ce chapitre aborde des aspects appliqués, qui s'appuient la plupart du temps sur les mêmes outils d'observation et de simulation, mais qui sont utilisés et développés dans un autre cadre pour prendre en compte les contraintes opérationnelles.

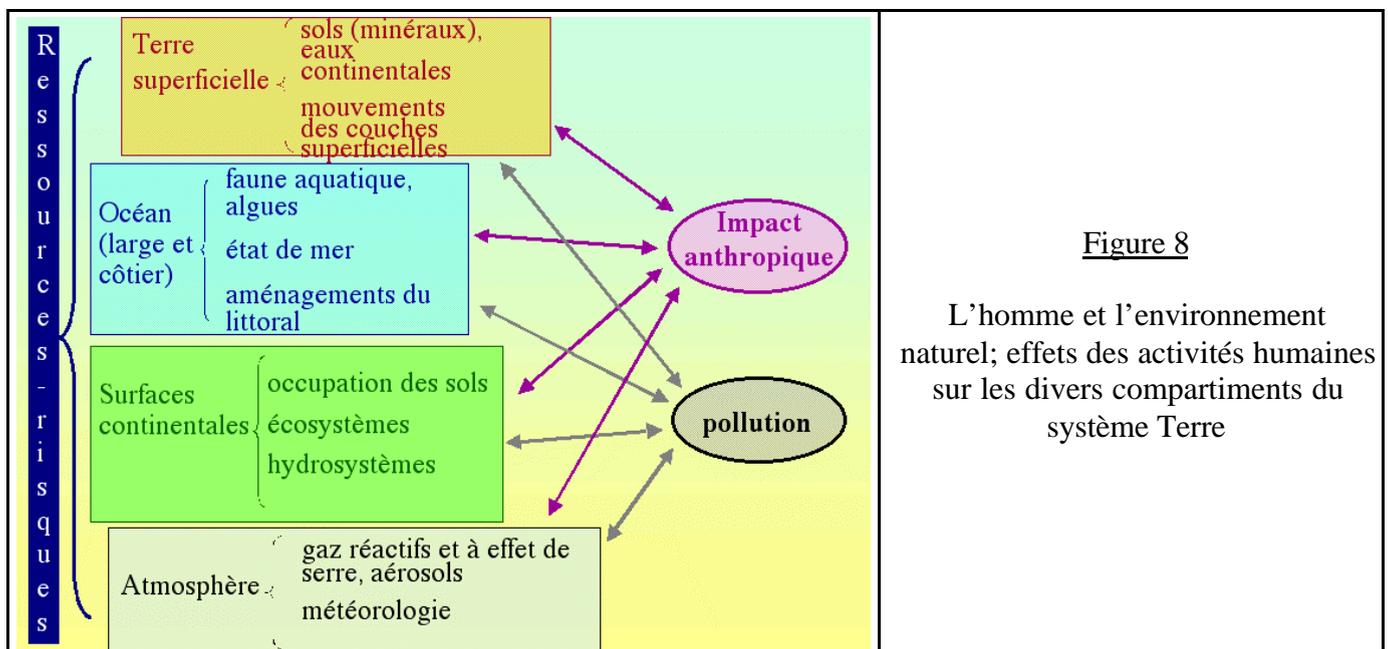


Figure 8

L'homme et l'environnement naturel; effets des activités humaines sur les divers compartiments du système Terre

#### 3.1. RESSOURCES NATURELLES

##### 3.1.1. GEOLOGIE, METALLOGENIE

Le développement de l'imagerie hyperspectrale ouvre le champ à une nouvelle génération d'applications, et en particulier la détection des signatures spectrales des principaux minéraux qui existent à la surface de la Terre. L'objectif est de fournir ainsi des informations qui ne sont plus simplement géométriques mais qui associent également un message minéralogique et chimique.

L'absorption spécifique de l'atmosphère terrestre limite l'observation essentiellement au spectre visible et à des zones disjointes du spectre dans le proche infrarouge, ainsi que dans l'infrarouge moyen, domaine de l'absorption spécifique liée aux silicates. Cependant, l'imagerie hyperspectrale permet la discrimination des principales phases oxydées qui existent à la surface de la Terre, notamment au niveau des espèces ferriques.

Parmi les problèmes qui peuvent être ainsi abordés, on peut citer :

- le suivi de la charge particulaire des rivières par les variations de coloration associées,
- la distribution spatiale des oxydes de fer rencontrés dans les sols,
- l'évolution du régime hydrique des sols, accessible par la mesure des variations temporelles de couleur du sol,

- les modifications des degrés d'oxydation du fer, notamment sous l'influence de la matière organique,

Les capteurs hyperspectraux ont été développés, testés et améliorés en observation aéroportée depuis 15 ans (instrument AVIRIS de la NASA). Quelques perspectives à partir de satellites existent déjà pour l'observation environnementale et géologique de la Terre. Ainsi l'instrument MERIS sur ENVISAT, servira de façon probatoire à la géologie; et l'Australie développe le satellite ARIES embarquant un capteur hyperspectral dédié à l'étude des ressources géologiques et minières. Par ailleurs, les USA envisagent d'embarquer des spectro-imageurs dérivés d'AVIRIS sur la station spatiale internationale et des projets sont à l'étude en Europe (SPECTRA). Enfin très récemment, dans le cadre du programme NASA New Millenium, l'imageur hyperspectral HYPERION a été lancé à bord de EO-1 comme démonstrateur technologique avec une durée de vie probatoire de 1 an.

Des développements importants sont mis en oeuvre actuellement pour améliorer l'exploitation des imageurs hyperspectraux :

- La quantification des processus d'absorption et de diffusion de la lumière par les minéraux et les roches;
- La production de mesures expérimentales des absorptions caractéristiques;
- La détermination des propriétés spectroscopiques associées à la présence de contaminants minéraux et organiques;
- La détermination des limites de détection des phases en relation avec les améliorations de la résolution spectrale et des performances techniques des capteurs et des chaînes de mesure;
- La prise en compte automatique des corrections atmosphériques.

L'accès à l'identification géochimique/minéralogique des surfaces imagées est donc possible directement depuis l'espace. L'obtention de cartes minéralogiques synoptiques et temporelles représente donc un apport considérable aux études classiques de terrain, et c'est un des enjeux des approches par télédétection spatiale.

### 3.1.2. RESSOURCES HYDRIQUES

Habitat pour la vie aquatique et facteur de biodiversité, l'eau est une ressource naturelle nécessaire à l'homme pour l'alimentation, l'agriculture, l'aquaculture et l'élevage. L'eau est aussi un vecteur de déchets, et peut provoquer des dégâts considérables en cas d'excès non contrôlé (inondation). C'est encore une source d'énergie renouvelable grâce aux centrales hydrothermiques. La gestion des ressources en eau, en quantité et en qualité, représente un défi majeur pour les années à venir, tout particulièrement dans les régions où la disponibilité en l'eau est limitée, et même parfois insuffisante.

L'étude des bilans de masse des eaux continentales depuis l'espace connaît des développements encourageants avec l'altimétrie (TOPEX-POSEIDON, JASON-1 et ENVISAT) et la gravimétrie (GRACE). La détection des toits de nappes hydriques est maintenant envisageable avec les radars basse fréquence en bande P, en particulier en milieu aride. Avec le radiomètre SMOS, le suivi de l'humidité superficielle des sols sera réalisable à moyen terme.

### 3.1.3. RESSOURCES HALIEUTIQUES ET AGRICOLES

En milieu marin, la combinaison des données altimétriques avec des données in situ et d'autres types de données satellite (température de surface, couleur de l'eau) permet d'élargir le champ des applications et de développer de nouveaux produits utiles aux océanographes, professionnels de la pêche, gestionnaires des ressources halieutiques, exploitants de plates-formes pétrolières... La couleur de l'eau, indicateur de la concentration en phytoplancton, est accessible depuis l'espace avec les capteurs SeaWiFS, MODIS, MERIS et VEGETATION.

La croissance de la population mondiale se traduit par une demande accrue en produits alimentaires, demande encore non totalement satisfaite avec les problèmes persistants de malnutrition. Des millions d'hectares de forêts ou de zones naturelles seront convertis en cultures, parfois sans tenir compte des ressources en sols et des conditions du milieu. L'observation quotidienne des régions agricoles avec les capteurs grand champ comme VEGETATION permet :

- d'établir des statistiques agricoles à l'échelle mondiale,
- d'étudier les impacts des changements d'occupation du sol sur l'environnement,
- de prévoir la production et de suivre les récoltes des principales cultures, et

- d'assurer une veille sur la sécurité alimentaire en déclenchant des systèmes d'alerte précoce en cas de risque de rendement très inférieur aux valeurs normales (sécheresse, dégâts dus aux criquets).

### 3.2. RISQUES NATURELS

La notion de risque naturel dépend de deux facteurs : la vulnérabilité qui se caractérise par la présence d'infrastructures sensibles, d'habitations ou de zones naturelles protégées, et l'aléa qui est la probabilité que se produise une catastrophe naturelle à tel endroit. La gestion du risque s'organise de manière très différente selon la situation par rapport à l'événement ou à la crise (avant, pendant ou après) :

- la prévention : elle consiste à anticiper le phénomène en tentant de le prédire (ex. systèmes de prévision météorologique localisée), et à mettre en place des moyens pour contrôler les effets de la catastrophe et mieux protéger les biens et la population (pare feux, digues contre les inondations, infrastructures antisismiques...);
- la gestion de la crise : elle nécessite de détecter puis de suivre en temps réel l'évolution de la catastrophe, et enfin de la maîtriser en mobilisant des ressources humaines et matérielles, l'optimisation de l'organisation des secours est possible si l'information est disponible rapidement (impact d'un séisme);
- l'évaluation des dégâts : les observations lors de cette phase de la crise sont nécessaires pour déterminer les indemnités des dommages (zones inondées, surfaces brûlées, coulées de lave...) et prévoir les reconstructions.

Le spatial permet dans bien des cas d'évaluer les dégâts, et présente d'importantes potentialités pour améliorer la prévention et la gestion de la crise.

#### 3.2.1. TERRE SOLIDE

##### 3.2.1.1. DETECTER ET PREVOIR

Un des défis des sciences de la Terre est l'étude des aléas naturels dans le but de détecter et prévoir les catastrophes qui affectent les populations, à la fois par les menaces directes et indirectes qu'ils représentent, et par leurs conséquences économiques. Ces risques naturels sont les séismes et éventuellement les tsunamis associés, le volcanisme et les glissements de terrain.

#### *Séismes*

L'étude des séismes comporte l'identification des zones sismogéniques, des failles actives, l'étude des sources sismiques et du milieu environnant. Si la plupart des séismes ont lieu sur les limites des plaques lithosphériques, qui bien qu'identifiées sont encore pour la plupart très mal connues, la sismicité intraplaque n'est pas à négliger comme l'a rappelé le séisme de Bhuj du 26 janvier 2001 en Inde. La connaissance des mouvements actuels et passés de la croûte terrestre, et l'identification des zones de faille actives et de leurs interactions sont donc fondamentales. De même, il est indispensable de connaître la géomorphologie précise des zones actives pour comprendre les séismes passés.

L'étude du cycle sismique nécessite des observations multidisciplinaires et des modélisations. Il s'agit d'étudier la déformation de la surface, les mouvements le long des failles, les propriétés mécaniques et rhéologiques des milieux, le rôle des fluides, les transferts de masse dans les zones actives, etc...

Les tsunamis déclenchés par les séismes ou par les grands glissements sous-marins constituent une importante menace pour les populations vivant sur les littoraux. Les effets des tsunamis peuvent être modélisés et donc prédits pour peu que l'on dispose d'une bathymétrie fine des zones côtières : les premières dizaines de mètres de profondeur devraient être connues avec une précision de l'ordre de 5 % et une résolution horizontale d'une dizaine de mètres.

#### *Volcans*

On estime à 1500 le nombre de volcans potentiellement actifs sur Terre, et environ 500 l'ont été durant le vingtième siècle. Plus de 10% de la population mondiale est exposée directement au risque volcanique, pour lesquels il faut également prendre en compte les effets indirects : impact sur le climat des grandes éruptions projetant des aérosols dans l'atmosphère, dangers pour le trafic aérien lorsque les avions de ligne traversent un panache de particules volcaniques (cf. les différents Boeing 747 qui se sont retrouvés brutalement avec les quatre réacteurs coupés !), impacts économiques... La surveillance des volcans est donc une préoccupation importante pour la société. Cependant, en dépit des efforts réalisés dans de nombreux pays, seuls quelques volcans sont correctement surveillés au sol et, même pour les mieux

équipés d'entre eux, la surveillance continue des secteurs les plus dangereux reste souvent très aléatoire. Les éruptions récentes ont montré les difficultés pratiques rencontrées pour surveiller depuis le sol la croissance d'un dôme de lave et essayer de prévoir ses déstabilisations.

Une activité volcanique peut donner lieu à divers phénomènes détectables : déformation de la surface, sismicité, flux de gaz ou changements des compositions des gaz, changements des températures de surface, variations de la gravité, variations du champ magnétique, etc.. La compréhension des dynamiques éruptives passe par l'obtention d'observables multiples permettant à la fois de décrire la géométrie interne (la "plomberie") et de caractériser les processus (variations des propriétés physiques des magmas, contenu en gaz, ascension du magma, ...).

### **Glissements de terrain**

Les principaux facteurs de déclenchement des glissements de terrain sont relativement bien cernés. D'un point de vue mécanique, les variations de charge en surface ou en volume et les modifications des paramètres rhéologiques de masses potentiellement instables génèrent des mouvements de terrain à des échelles très variables (du versant de montagne aux petites loupes d'arrachement). Cependant le recensement des zones instables reste très délicat et insuffisant. La géologie, la topographie, le climat (i.e. les précipitations et indirectement la végétation) sont autant de paramètres à prendre en compte dans l'évaluation de l'aléa.

Les effets de la sismicité et les influences anthropiques jouent aussi probablement un rôle mais celui-ci reste à évaluer. A titre d'exemple, l'exploitation de carrières et des nappes aquifères, les changements de tracé des cours d'eau modifient la répartition des charges et sont donc susceptibles de constituer des facteurs déclencheurs de glissements de terrain.

#### **3.2.1.2. APPORT DU SPATIAL**

Le spatial apparaît comme un outil indispensable à l'amélioration de la connaissance des aléas naturels, notamment sismiques ou volcaniques et les glissements de terrain. Il apporte déjà des informations indispensables sur la morphologie et sa variabilité via les données topographiques (MNT), sur les déformations grâce à la précision de la géodésie spatiale (interprétation de l'imagerie spatiale, systèmes de positionnement globaux, interférométrie radar...). Dans les deux dernières décennies, la résolution de certains satellites (notamment SPOT en mode panchromatique) a permis d'identifier et de caractériser les déformations cumulées associées aux failles les plus actives. Mais c'est essentiellement l'utilisation de l'interférométrie radar qui a permis de déceler l'incrément de déplacement co-sismique de nombreux séismes et de visualiser certaines déformations associées aux éruptions volcaniques.

Concernant l'activité volcanique, le spatial peut servir à mettre au point des "sonnettes d'alarme" informant d'un début d'activité, à surveiller un édifice en éruption, à réaliser un inventaire du volcanisme, etc... Deux éléments doivent être pris en compte pour tout système dédié à l'étude et la surveillance des volcans depuis l'espace : l'intervalle de revisite et la résolution au sol. En effet si, pour les systèmes d'alarme ou les inventaires, il est nécessaire d'avoir une période de revisite de l'ordre de la semaine, voire plus, il est indispensable de mesurer avec une fréquence beaucoup plus élevée les volcans en phases éruptives, si possible plusieurs fois par jour. De même, les observables doivent être mesurés à différentes échelles spatiales : sur la totalité d'un édifice et dans des zones qui peuvent être de très petite extension latérale comme un dôme ou une coulée (typiquement moins d'une centaine de mètres). Enfin l'idéal est de disposer de moyens de mesure "tout temps" : en effet, lors d'une éruption, la surface est rarement visible ! Les instruments haute résolution devraient enfin contribuer à une représentation du relief suffisamment précise pour mettre en évidence des zones instables. La répétitivité des instruments spatiaux alliée à la pérennité des observations est indispensable pour garantir d'une part, l'accès à une information compatible avec les échelles de temps des mécanismes déclencheurs de glissement de terrain et d'autre part, à des archives de données qui permettent d'appréhender la phénoménologie. Outre l'enjeu d'un inventaire systématique des zones instables, la complémentarité des méthodes et techniques conventionnelles de mesures de déformation de surface (nivellement, mesures laser) avec les techniques spatiales (GPS, interférométrie radar) reste à démontrer. Bien que ces dernières techniques aient démontré leur fort potentiel pour l'aide à la gestion des risques naturels d'origine sismique ou volcanique, très peu d'études ont été réalisées sur leur apport pour l'étude des glissements de terrain.

De nouvelles avancées sont donc nécessaires pour accéder à la mesure des déformations concernant l'ensemble du cycle sismique et de la dynamique éruptive, et des glissements de terrain. Il s'agit de mettre

en place de véritables observatoires spatiaux permettant de détecter des déformations très subtiles. Il faut en effet caractériser des petites déformations (millimétriques) parfois distribuées sur de très vastes régions (de l'ordre de la dizaine de milliers de km<sup>2</sup>). Pour l'imagerie optique, ceci requiert la répétitivité des observations (journalières, i.e. surveillance des prémices d'une éruption volcanique) et l'utilisation d'images de résolution métrique ou sub-métrique. Pour le radar, outre la répétitivité journalière, l'amélioration des modèles d'atmosphère s'avère indispensable pour séparer dans les interférogrammes le bruit atmosphérique du signal de déformation. Dans bien des cas, la présence d'artefacts d'origine atmosphérique ne permet pas de caractériser la phase de chargement intersismique ni même de déterminer de manière univoque les déformations associées aux éruptions.

Dans le cadre de la mise en place du programme ORFEO, ces objectifs doivent impérativement être pris en compte. Parallèlement à la mise en place de quelques zones test (Etna, Merapi, Golfe de Corinthe, décrochements Nord et Est Anatóliens en Turquie, Andes...) il faut d'ores et déjà penser en terme de laboratoire d'observations spatiales et envisager la suite de SPOT5 et du programme ORFEO ainsi que la suite des satellites ERS/ENVISAT.

### 3.2.2. SURFACES CONTINENTALES

#### *Inondations*

Plusieurs facteurs interviennent dans les risques d'inondations :

- L'intensité et la répartition des pluies dans le bassin versant. La fonte de la neige s'ajoute parfois à ces pluies accentuant le risque.
- L'absorption par le sol et l'infiltration dans le sous-sol qui alimentent les nappes souterraines. Un sol saturé par des pluies récentes n'absorbe plus.
- La pente du bassin et sa couverture végétale qui accélèrent ou ralentissent les écoulements.
- L'action de l'homme : déboisement, feux de forêts qui rendent le sol plus propice au ruissellement. L'imperméabilisation, due au développement des villes: l'eau ne s'infiltré plus et surcharge les systèmes d'évacuation.

Les facteurs variables, que l'on doit essayer de surveiller par satellite, sont clairement l'intensité et la répartition des pluies, ainsi que la saturation du sol dans le premier mètre, c'est-à-dire celle mesurable à partir de radar basse-fréquence, en bande P. En ce qui concerne les crues, le facteur le plus déterminant est encore la saturation en eau du sol, qui ne peut plus évacuer lorsqu'il est saturé.

#### *Feux de forêt*

Les grands incendies de forêt ravagent chaque année plusieurs millions d'hectares dans le monde, qu'ils soient d'origine naturelle (orages, volcans) ou anthropique (pratiques agricoles, conversion de forêts dégradées en zones de plantations). En zone boréale, les feux peuvent se propager sur des surfaces considérables pendant plusieurs semaines, parfois des mois, avant de s'arrêter spontanément. En Afrique, plusieurs millions d'hectares brûlent chaque année suite à des pratiques agro-pastorales, provoquant d'importantes émissions d'aérosols dans l'atmosphère. Les fumées, souvent toxiques, peuvent provoquer la fermeture d'aéroports, et perturber durablement la vie économique de toute une région. Menace réelle pour des équilibres écologiques fragiles et pour la biodiversité, pour les infrastructures et les vies humaines, les incendies nécessitent la mise en place de moyens de surveillance pour prévenir le risque, pour détecter les départs de feu et pour évaluer les dégâts.

Dans nos régions, l'évolution temporelle du risque de feu de forêt est actuellement suivie de manière opérationnelle par deux méthodes : l'utilisation d'indices purement météorologiques spatialisés par sous-régions d'environ 1.000 km<sup>2</sup> et la mesure de l'humidité de certains végétaux sur des placettes de l'ordre de la dizaine de m<sup>2</sup>. Des recherches portent sur l'intérêt des paramètres dérivés de différents capteurs (NOAA-AVHRR, AATSR, VEGETATION, MODIS) dans le domaine visible, proche infrarouge et infrarouge thermique pour l'estimation du stress hydrique de la végétation à des échelles allant du décimètre au kilomètre. Le risque de départ d'incendie peut également être appréhendé par l'utilisation de cartes d'occupation des sols, et de cartes d'inflammabilité. Les modèles de propagation, encore imparfaits, devraient à terme améliorer la prévention du risque en anticipant l'évolution des feux. La détection en temps réel des incendies par observation spatiale dans l'infrarouge thermique n'est pour l'heure pas opérationnelle. Les services de protection de la sécurité civile ont besoin d'une très haute réactivité dans la détection des départs de feux, avec un délai inférieur à la dizaine de minutes. La cartographie des zones

brûlées apparaît comme l'application la plus mature avec l'utilisation de capteurs comme SPOT et Landsat pour réaliser des classifications d'occupation des sols et de ses changements.

### *Attaques parasitaires des forêts et dégâts de tempête*

Souvent disparates et disséminées au sein des peuplements en ne touchant que quelques arbres, les attaques d'insectes, ravageurs et champignons pathogènes peuvent provoquer des dégâts massifs, allant jusqu'à toucher des millions d'hectares, comme en témoigne le cas du Canada qui en 1975 a été confronté à l'attaque de la tordeuse des bourgeons de l'épinette sur trente millions d'hectares. Dans ce pays, les traitements aéroportés portent annuellement sur 0,5 à 5 millions d'hectares par an. En France, on estime que 100 000 à 800 000 hectares sont touchés annuellement à des degrés divers, avec seulement quelques milliers d'hectares détruits. Le suivi de ces phénomènes depuis l'espace nécessite le plus souvent des capteurs à haute résolution spatiale comme ceux de SPOT.

L'exemple des deux tempêtes successives de décembre 1999 en France avec la mise à terre de plus de 150 millions de m<sup>3</sup> (soit l'équivalent de trois années de production) sur 300 000 hectares montre qu'un phénomène météorologique exceptionnel peut avoir des conséquences dramatiques sur l'environnement et la sécurité civile. L'utilisation de données spatiales de type SPOT pour cartographier les dégâts est limitée par la disponibilité de couples d'images acquises dans des conditions similaires (avant et après l'événement) et par la résolution des capteurs. La meilleure résolution de SPOT 5 (puis d'ORFEO) devrait mieux répondre à ce type de besoin. L'information de phase des données radar (ERS, puis ORFEO) avec la différence de cohérence avant et après la tempête constitue une voie encourageante, quoique posant le problème de la disponibilité des données.

### **3.2.3. OCEAN**

La prévention des risques maritimes pour l'océan superficiel relève avant tout de la prévision des vents de surface et des états de mer (hauteur significative et direction(s) des vagues). Les vents de surface sont ceux directement prévus par le modèle atmosphérique global. Ils sont utilisés pour prévoir les états de mer (hauteur significative des vagues notamment) par l'application d'une paramétrisation ad-hoc. Dans ce schéma, la houle est mal prise en compte car elle n'est pas liée au vent local.

Le suivi de l'état de mer ne peut être effectué actuellement en routine, en raison de la complexité du traitement des images SAR et de leur faible couverture spatio-temporelle. Une ou des missions dédiées à la mesure du spectre de l'état de la mer, comme le projet SWIMSAT proposé à l'ASE, permettraient d'améliorer grandement la prévision des états de mer dangereux.

Le vent de surface est fourni par les diffusiomètres : actuellement celui d'ERS2 et QUIKSCAT, lancé en 1999, puis SEAWINDS sur ADEOS II et celui de METOP en 2005, mais il n'y a pas d'autre diffusiomètre prévu au-delà. Cette mesure doit donc être pérennisée.

Les altimètres de TOPEX et JASON, ERS-2 et ENVISAT fournissent des informations sur la hauteur précise de la surface, la hauteur significative des vagues et la force du vent à l'échelle du spot. Ces deux dernières informations sont particulièrement intéressantes pour la prévision des états de mer. La hauteur significative des vagues peut être comparée à la mer du vent prévue et peut donc être utilisée pour corriger celle-ci.

La prévision des surcotes de marée ressort également parti des missions de prévention des risques. A l'heure actuelle, les données spatiales ne sont pratiquement pas utilisées, car les instruments embarqués sont incapables de produire des mesures fiables à proximité des côtes (problème de résolution, d'écho parasite...).

A moyen terme, la disponibilité opérationnelle d'analyses et prévisions tridimensionnelles de l'océan comme celles issues du système français MERCATOR peut faire évoluer notre capacité de prévision des risques maritimes en fournissant un forçage océanique réaliste issu d'un modèle d'océan tridimensionnel.

### **3.2.4. ATMOSPHERE**

#### **3.2.4.1. PREVISION DES RISQUES**

### *Tempêtes et cyclones tropicaux*

Les risques de grande échelle – tempêtes et cyclones tropicaux par exemple – ont justifié la mise en place d'un réseau mondial d'observation météorologique dès la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, et ont toujours été l'une des

principales préoccupations des services nationaux de prévision météorologique. A l'heure actuelle, la stratégie de prévention repose essentiellement sur la prévision numérique et l'expertise humaine associée. Dans ce cadre, les observations fournies par les satellites servent à mieux appréhender la physique des phénomènes afin de mieux la représenter dans les modèles, à déterminer le plus précisément possible l'état de l'atmosphère à l'instant initial de la prévision, et à fournir au prévisionniste les images dont il a besoin pour se faire sa propre idée de l'état de l'atmosphère à un instant donné et éventuellement corriger la prévision numérique. L'apport du spatial est ici d'autant plus crucial que les phénomènes naissent et se développent au-dessus des océans, c'est-à-dire dans des zones où les réseaux d'observation «sol» sont très lâches.

Les observables nécessaires sont celles classiquement utilisées pour caractériser l'atmosphère : pression, température, humidité, vent. Leur connaissance est particulièrement importante dans les régions « sensibles » telles que celles concernées par la cyclogénèse (Atlantique Nord), et pour les gammes d'altitude, dans la couche limite et au niveau de la tropopause où des couplages importants avec la surface ou la stratosphère peuvent intervenir. A noter que parmi les observables précitées, si la température et l'humidité sont déjà couverts par le spatial, et si le vent fait l'objet d'une mission en cours d'étude (AEOLUS), pour la pression en revanche, il n'existe pas de capteur en projet. Son utilité dans la prévision des tempêtes serait pourtant évidente, car elle permettrait de suivre en permanence le creusement des dépressions et de mieux prévoir la force des vents associés.

### *Orages et pluies intenses*

La prévision des phénomènes météorologiques de moyenne échelle (~ 1 km ou plus) est un souci plus récent. Certes, les risques associés ont toujours existé – les inondations meurtrières de type Vaison-la-Romaine ou Gard 2002, consécutives à des pluies orageuses diluviennes, sont signalées à intervalles réguliers dans les annales météorologiques – mais leur prévision semblait impossible il y a encore peu. A cela plusieurs raisons : les petites échelles mises en jeu rendent leur observation et leur compréhension difficiles; leur physique hautement non-linéaire en fait des objets très complexes à l'évolution instable; enfin, leur modélisation requiert des moyens informatiques lourds. Les développements instrumentaux et numériques et les progrès réalisés ces 2 ou 3 dernières décennies en météorologie ont cependant permis de mettre au point des modèles capables de simuler des phénomènes de petite échelle. Utilisés principalement en mode recherche, ils pourraient devenir opérationnels d'ici quelques années.

Des réflexions déjà engagées, il ressort que les deux points clés seront l'initialisation du cycle de prévision et le contrôle de la trajectoire du modèle par l'assimilation de données d'observation. Pour ces deux points, les questions qui se posent sont : quelles données sont nécessaires (nature, résolution, cadence d'acquisition) et comment les assimiler ? Pour ce qui concerne les données, le champ d'humidité et les précipitations sont considérés comme des éléments primordiaux même à plus grande échelle, comme le montrent les efforts engagés pour assimiler les données issues de TRMM dans le modèle du CEPMMT. Dans le futur, la résolution horizontale devrait être en adéquation avec la résolution des modèles, c'est-à-dire de l'ordre du kilomètre. Pour la résolution verticale, elle devrait être fine à basse altitude afin que la couche limite atmosphérique soit fidèlement représentée.

La généralisation de la répétitivité à 15 minutes avec MSG, jointe à sa résolution améliorée par rapport à METEOSAT, sera très utile pour la surveillance de phénomènes susceptibles de provoquer des catastrophes (orages, cyclones, tempêtes... ). La principale limitation de ces observations vient du domaine de longueur d'onde visible / infrarouge, qui ne permet pas la pénétration dans les systèmes nuageux. Dans le futur, des capteurs micro-ondes sub-millimétriques pourraient apporter une information complémentaire sur l'analyse des systèmes nuageux.

### *Protection des aéronefs*

L'imagerie satellite permet la visualisation des zones de poussières en particulier de cendres volcaniques dangereuses pour l'aviation commerciale. Un suivi de ces zones à partir des sondeurs dans l'infrarouge est en cours de développement. De même, la mesure du vent par télédétection active ouvre la voie à la détection de la turbulence en ciel clair, également dangereuse pour les avions.

Enfin, une description plus fine et précise de l'état de l'atmosphère pourrait permettre de prévoir des risques liés à des conditions météorologiques que l'on ne trouve généralement réunies que localement. A ce titre, une connaissance finement résolue du profil vertical de température combinée à des mesures de la

taille moyenne des gouttelettes d'eau pourrait peut-être signaler la présence d'eau surfondue en altitude, créant le risque de givrage pour la navigation aérienne.

### **3.2.4.2. L'APPORT DU SPATIAL**

Le contenu informatif des satellites météorologiques opérationnels n'a cessé de croître. Les canaux spectraux des radiomètres ont été multipliés, ils sont plus fins, et couvrent une gamme spectrale étendue, notamment vers les micro-ondes. Il en a résulté une extension de la gamme des observables (l'eau a par exemple largement bénéficié de l'apport des micro-ondes), une amélioration de la précision (les sondeurs hyper-spectraux devraient atteindre 1°C pour la température et 10% pour l'humidité), et un affinement de la résolution verticale (1 km).

Contrairement aux satellites opérationnels, les satellites de recherche n'entrent pas dans une stratégie de prévision numérique et leurs données ne sont pas assimilées par les modèles opérationnels de prévision. Ils contribuent cependant à l'accroissement des connaissances et participent indirectement à la prévention du risque météorologique, tout en préfigurant les futurs instruments opérationnels. Pour la prévention des risques naturels, les missions «précipitation» lancées ces dernières années ou en cours de réalisation actuellement semblent particulièrement prometteuses. Combinant la radiométrie au radar, elles apportent de nombreuses données concernant les grands complexes convectifs source de précipitations intenses et générateurs de vent violent. Le projet Global Precipitation Mission (GPM) vise à faire de l'ensemble radar / radiomètres le prototype pour les futurs satellites opérationnels. D'autre part MEGHA-TROPIQUES a été conçu pour étudier le cycle de l'eau sous les tropiques et devrait donc fournir des données intéressantes sur les cyclones.

La télédétection optique active – le lidar – constituera sans doute une des grandes avancées technologiques de la présente décennie. Les lidars offrent des capacités uniques en terme de résolution spatiale horizontale et verticale (au détriment cependant de la couverture), de précision de mesure (notamment pour la vapeur d'eau et autres espèces chimiques), et rend enfin possible la mesure de nouvelles observables (entre autres le vent). Après CALIPSO lancé en 2004, AEOLUS devrait suivre en 2006. Lancé par l'ASE, AEOLUS sera le premier satellite mesurant le vent dans toute la profondeur de l'atmosphère. Il contribuera certainement à améliorer la prévision météorologique en général et la prévision des risques météorologiques en particulier. L'ASE étudie par ailleurs une mission lidar dédiée à la mesure de la vapeur d'eau (WALES).

### **3.3. DETECTION, QUANTIFICATION ET SUIVI DE L'IMPACT ANTHROPIQUE**

La pression de l'homme sur l'environnement prend deux formes, directe ou indirecte. On entend par impact anthropique indirect les modifications des écosystèmes liés à une modification climatique induite par l'homme. L'apparition de nouvelles algues sur les côtes suite à l'augmentation de la température, la conquête de nouveaux espaces par les forêts en zone boréale ou la fonte de certains glaciers entrent dans cette catégorie.

La liste des modifications de l'environnement induites directement par les activités humaines est beaucoup plus longue. On peut citer en particulier :

- Changement d'occupation des sols,
- Impact de l'urbanisation sur le milieu,
- Apparition de nouvelles algues suite aux rejets azotés,
- Désertification suite aux pratiques agricoles et pastorales,
- Impact des barrages sur la circulation des fleuves et l'hydrologie associée,

Bien que ces effets soient perceptibles au niveau local, il n'existe pas à l'heure actuelle de moyen pour les quantifier et les suivre à l'échelle globale. Il est clair que seule l'observation spatiale permet ce suivi. L'impact anthropique est souvent très local. Sa détection passe nécessairement par une observation à très haute résolution spatiale, décimétrique ou même métrique. Cependant, l'impact sur la scène et en particulier sa structure spatiale est suffisamment fort pour que son identification soit possible avec un nombre limité d'images par an (contrairement à l'identification d'un type de végétation qui nécessite de nombreuses mesures afin de déterminer son cycle végétatif).

Le besoin de mesure est donc de quelques images par an, avec une résolution de l'ordre du mètre.

Mais ce type de mesure ne suffit pas. En effet, alors que la photo interprétation humaine permet d'identifier sans difficulté les types de surface, il n'existe pas encore de méthode automatique pour obtenir le même résultat. Or, le suivi global qui est discuté ici ne peut s'envisager par photo-interprétation humaine. Il faut donc développer des techniques de reconnaissance de paysages types, qui prennent en compte non seulement la signature spectrale de la scène, mais aussi sa structure spatiale.



# LA POLLUTION

## I. Les sols

La pollution des sols, notamment en milieu minier pour le traçage des polluants et leur évolution en contexte naturel, figure actuellement parmi les débouchés les plus intéressants de l'imagerie hyperspectrale. Ce domaine d'application est actuellement en plein développement aux USA et au Canada. Des organismes nationaux ont été chargés d'identifier et d'évaluer la pollution induite par les activités anthropiques minières ou industrielles susceptibles de contribuer à la pollution des eaux de surface des nappes et des sols, par le ruissellement acide induit et le transport des métaux lourds. Les cartes minéralogiques obtenues grâce aux données des capteurs hyperspectraux (par ex. AVIRIS), dans des milieux où la couverture végétale ne peut être ignorée, se sont révélées des outils sans précédents pour le choix des zones prioritaires à étudier et se conçoivent, tout à fait, maintenant, comme des outils d'aide à la décision pour la planification de la réhabilitation des sites.

C'est cependant très récemment que la prise de conscience du danger potentiel que représentent les drainages de mines pour les écosystèmes situés en aval et la qualité des ressources en eau a amené le lancement d'études de vaste envergure.

Un des intérêts principaux des données hyperspectrales réside dans la possibilité d'utiliser les informations minéralogiques et spatialisées sous la forme d'**indicateurs**. Ces indicateurs permettent de décrire le système environnemental et sont susceptibles d'apporter des renseignements fiables sur la caractérisation et la localisation des effets nocifs. Dans le cadre d'une politique de réhabilitation des sites, ils apportent une aide pour le choix des sites prioritaires à étudier de façon plus détaillée (prélèvements d'échantillons et utilisation des spectroscopie de terrain ou de laboratoire) de même que sur les moyens à mettre en œuvre pour limiter l'extension des effets nocifs.

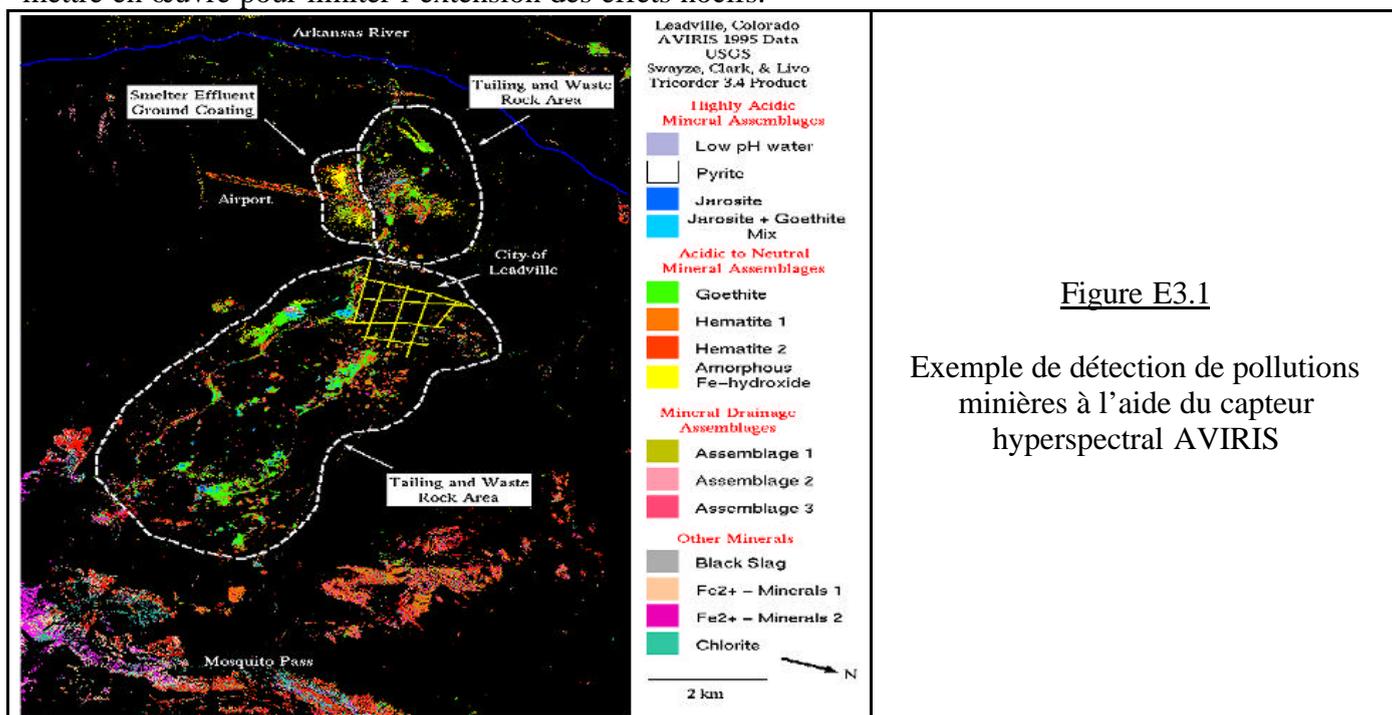


Figure E3.1

Exemple de détection de pollutions minières à l'aide du capteur hyperspectral AVIRIS

### Exemple d'indicateurs :

- La cartographie de systèmes minéraux par imagerie hyperspectrale permet la localisation et la caractérisation des zones acides par l'identification précise des minéraux secondaires du fer utilisés comme indicateurs des zones minéralisées à l'origine des eaux acides, comme la cartographie des rejets acides miniers.
- Par ailleurs, le spectromètre AVIRIS a été utilisé pour l'identification des minéraux tampons de l'acidité tels la calcite et la chlorite. Des travaux récents ont ainsi montré que les minéraux carbonatés dans les Montagnes de San Juan (Animas Watershed, Colorado), pourraient jouer un rôle important dans le tamponnage acide des eaux de rivières, et par là, réduire leur capacité à transporter de fortes concentrations métalliques.

- L'imagerie hyperspectrale permet également le suivi des rejets minéraux à partir de zones d'exploitation minérales vers les zones avales. La connaissance du transfert des métaux s'avère capitale pour maîtriser cette pollution. Les capteurs hyperspectraux sont capables d'identifier la signature spectrale des minéraux susceptibles de jouer un rôle prépondérant dans la diffusion ou le confinement des polluants.

Afin de permettre une mise en œuvre concrète, des efforts doivent être menés pour l'incorporation de ces instruments à bord de satellites en prenant en compte l'expérience acquise dans le domaine de l'exploration planétaire. Des mesures discriminantes d'un point de vue minéralogique, particulièrement adaptées au suivi de l'impact environnemental de la pollution des sols pourront ainsi être réalisées. De plus, l'obtention de données récurrentes par l'utilisation de satellites permettra de suivre **l'évolution minéralogique temporelle** de ces pollutions (changement de phase minéralogiques au cours du temps, interaction avec l'eau). Les données obtenues devront être couplées, pour validation, à l'approche expérimentale de spectroscopie de laboratoire, et à la « vérité-terrain » fournie par la géologie. Par ailleurs, les campagnes de mesures spectroscopiques in situ donneront accès aux relations inter-échelles existant entre le signal géologique et le signal optique acquis par l'imagerie hyperspectrale. Ces études permettront, de plus, de réduire fortement la densité des prélèvements au sol et de les focaliser sur les zones les plus susceptibles d'apporter une information.

Des projets sont en cours pour tester la capacité des capteurs hyperspectraux dans la détection et le suivi des impacts et pollutions d'origine minière en milieu à couvert végétal, dans différents contextes climatiques européens (arctique, boréal, alpin, continental, océanique, méditerranéen).

Notons qu'une cartographie minéralogique des environnements miniers exige une grande finesse de la résolution spectrale pour séparer les différents constituants minéraux et nécessite également un excellent rapport signal/bruit. Une étude de l'évolution temporelle de la distribution spatiale des phases minérales à travers le passage régulier d'un capteur sur la zone concernée est également indispensable.

## II. L'océan

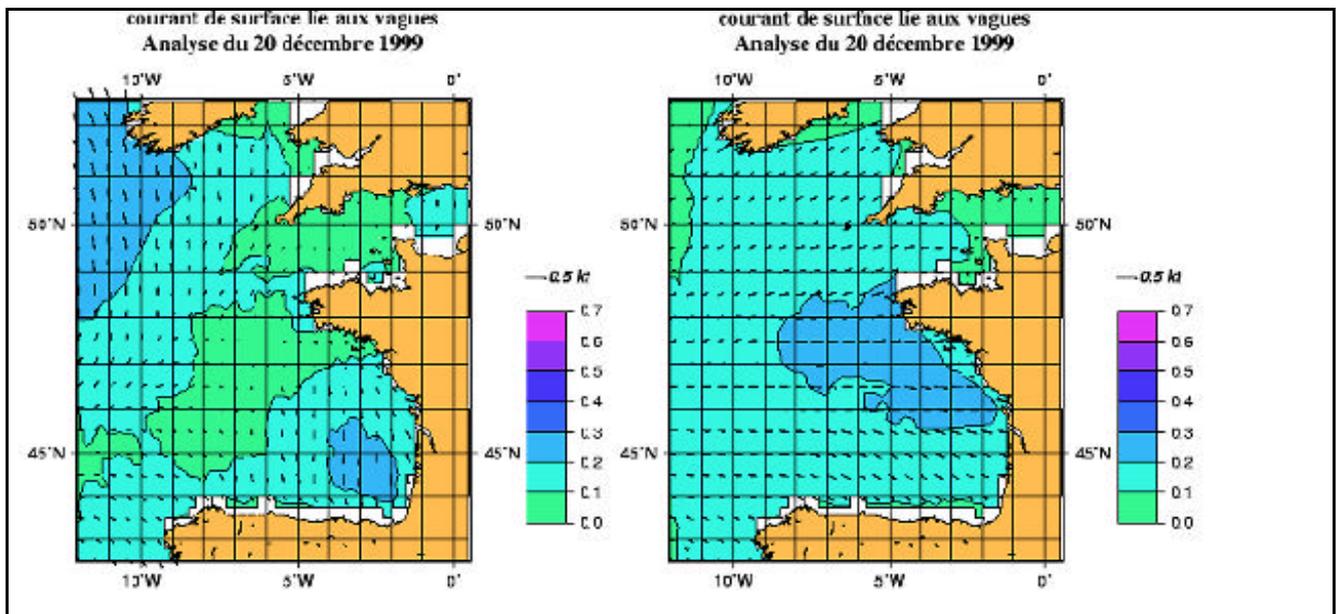
### Les eaux rouges

Les sites de culture des huîtres ou des moules à la cote sont parfois envahis par des algues microscopiques toxiques (le plus fréquent en France est le dinoflagelle *Dinophysis*) qui rendent ces coquillages impropres à la consommation. Leur commercialisation doit alors être suspendue tant que la mer n'a pas retrouvé un peuplement de phytoplancton normal. Les algues responsables font l'objet d'une surveillance dans les principaux bassins, ce phénomène ayant tendance à être de plus en plus fréquent. Depuis qu'on a trouvé que la présence de ces algues modifiait la réflectance de la surface de l'océan dans l'ultra violet, la plupart des projets de capteurs de couleur de l'océan comportent un canal dans l'UV, afin de détecter la présence de ces algues avant qu'elles n'atteignent une densité critique. La parade consiste alors à mettre les coquillages à l'abri lorsque cela est possible (claires du bassin de Marennes, enfoncement sous la couche éclairée où vivent ces algues dans le cas de cultures à partir de radeaux flottants). Un développement algorithmique reste cependant à faire pour déduire la présence des algues des mesures satellitaires.

### Les dérives de nappe

Les nappes de produits polluants ou dangereux posent deux problèmes : leur détection et la prévision de leur dérive. Ces deux problèmes sont liés : il n'est pas possible de suivre une nappe qui n'a pas été préalablement détectée.

La prévision des dérives de nappe fait l'objet de modèles spécifiques. Ceux-ci tentent de prévoir la vitesse et la direction des courants de surface. Dans les zones côtières, où le danger lié à la dérive prend tout son sens, le courant de surface dépend principalement du vent de surface. Les modèles de dérive utilisent donc les vents de surface prévus par les modèles de prévision météorologique, auxquels sont rajoutés les courants de marée. Dans ce cadre, les données spatiales sont indispensables au projet d'océanographie opérationnelle MERCATOR qui les utilisera à des fins d'assimilation dans un modèle d'océan et de prévision des courants. Le couplage des modèles de dérive de nappes avec un tel modèle opérationnel de prévision générale de l'océan (qui délivre par exemple des prévisions à quinze jours des champs de courants en surface et en profondeur) est un des axes importants de progrès.



**Figure E3.2 :** Courants de surface produits le 20 décembre 1999, soit 8 jours après le naufrage de l'ERIKA. A gauche : courants produits par le vent local. A droite : courant dû à la houle. Le courant lié à la houle, généralement faible et de ce fait négligé dans le système de prévision opérationnel, est ici dominant. (Images Météo-France/DP/Prévi-Mar).

L'épisode ERIKA a révélé la grande difficulté qu'il peut y avoir à détecter des nappes d'hydrocarbures flottant à la surface de la mer. Les observateurs à bord des avions de patrouille maritime ne suffisent pas : les surfaces à balayer sont immenses, et le temps ne permet pas toujours aux avions de voler... Une observation depuis l'espace semblerait une bonne solution, mais tout reste à faire en ce domaine : quels instruments, sur quelle orbite... Une approche possible pourrait consister à jouer sur les modifications de rugosité de surface à petite échelle. L'exploitation de mesures SAR dans ce but devrait se développer, mais pose des problèmes méthodologiques, pour une détection dans tous les cas (vent fort, type de dérivé pétrolier). Le SAR d'ENVISAT, par ses capacités multi-angulaires, devrait permettre des avancées. Un système multi-fréquences serait plus adapté. La complémentarité avec l'optique haute résolution permettrait la surveillance des nappes accidentelles, et plus généralement, de l'activité des navires en région côtière (dégazage).

### III. L'atmosphère

Les activités humaines modifient la composition chimique de l'atmosphère non seulement au voisinage du sol et des sources de polluants (pollution urbaine...) mais aussi globalement et jusque dans la stratosphère.

Les instruments spatiaux dédiés aux mesures chimiques se sont surtout concentrés par le passé sur des mesures de gaz stratosphériques. Quelques mesures en haute troposphère ou en colonne intégrée sont cependant disponibles : NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, HCHO, BrO, aérosols et vapeur d'eau.

L'essentiel des profils par satellite porte (à l'exception de l'ozone) sur des espèces peu réactives (l'exemple type est le CO ou le CH<sub>4</sub>) et ont surtout une bonne résolution en haute troposphère (au delà de 6km). Ces caractéristiques importantes pour les interactions chimie/climat sont insuffisantes pour l'étude de la pollution régionale qui concerne plutôt les couches en deçà de trois kilomètres.

Ainsi, si les données satellites actuelles documentant la troposphère sont déjà largement utilisées, elles restent encore très exploratoires et très préliminaires. Elles ont l'avantage de fournir une bonne couverture spatiale, souvent globale et une bonne couverture temporelle. Mais, elles présentent aussi des limitations quand seule la colonne totale de certaines espèces est connue. Il faut au moins compter une décade voire plus avant le lancement opérationnel d'un nouvel instrument. Il est donc important de développer en parallèle la poursuite de l'exploitation optimale des données actuelles et la définition d'une nouvelle instrumentation.

Les distributions globales récemment observées pour des espèces troposphériques telles que CO, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, BrO, HCHO, obtenues sur des plates-formes satellites ouvrent de nouvelles perspectives en chimie

troposphérique. Il devient possible maintenant d'étudier les distributions des concentrations chimiques sur de larges étendues spatiales, à des fréquences temporelles en meilleure adéquation, en colonnes (sauf peut-être l'ozone pour lequel les profils peuvent être dérivés des observations mais ont encore une faible résolution) avec les développements récents des modèles de climat régionaux. On peut envisager d'observer, de caractériser et de prévoir la pollution aux échelles régionale et globale.

### Observer et surveiller la composition chimique troposphérique :

Cet objectif repose sur les données déjà disponibles et sur celles qui vont l'être. Il s'agit de développer l'utilisation combinée de données multiples provenant des satellites mais aussi des mesures des réseaux de surveillance et des mesures in-situ disponibles.

Par exemple, confronter les données d'ozone et de vapeur d'eau de projets tels que MOZAIC avec celles d'instruments profileurs spatio-portés permettra d'établir des bilans troposphériques globaux. Les mesures de CO par satellite contribuent aux réseaux nationaux de surveillance de la pollution. Plusieurs données satellites fourniront des concentrations de NO<sub>x</sub> permettant d'accéder à l'exploration des sources globales et à la détermination de différentes contributions soit par les éclairs, soit par les feux de brousse,...

Des profils composites pourront être reconstitués à partir de méthodes de restitution par FTIR fondées sur l'utilisation simultanée de techniques à partir du sol et de données satellites.

Les nouveaux algorithmes pour l'observation de la composition troposphérique à partir de l'espace requièrent des tests minutieux, des vérifications et des stratégies de validation des données satellite produites sont à développer : parmi elles, la collecte de mesures comparatives (sol, aéroportées, etc.), l'intercomparaison de ces mesures entre elles, la comparaison des mesures spatiales avec les modèles, l'analyse des différentes méthodes de restitution, l'utilisation de méthodes d'assimilation.

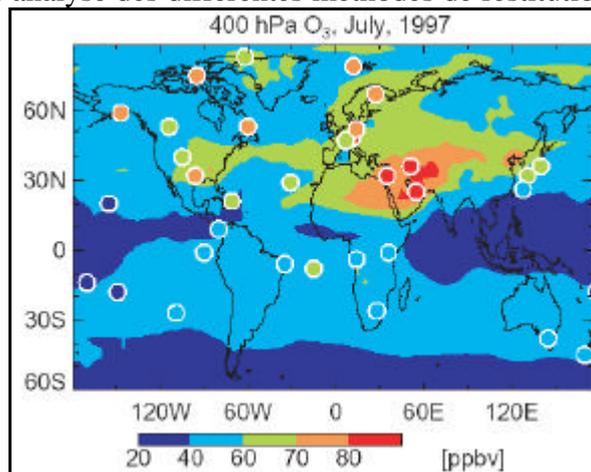


Figure E3.3

O<sub>3</sub> moyen simulé par le modèle GEOS-CHEM de Harvard en Juillet 1997.

Rapports de mélange à 400 hPa (ppbv).

Les cercles colorés représentent les mesures moyennes mensuelles des rapports de mélanges en O<sub>3</sub> à 400 hPa en Juillet 1997 incluant les données des sondes climatologiques et les valeurs obtenues à bord des avions commerciaux sur Tel-Aviv (32.N, 35.E), Dubaï (25.N, 55.E), et Téhéran (36.N, 51.E) en 1995-2000 dans le cadre du programme MOZAIC

Les mesures de télédétection spatiale peuvent être utilisées comme données d'initialisation, conditions aux limites et données de test dans les modèles pour étudier les processus dynamiques et chimiques de la troposphère.

En utilisant des modèles inverses, elles sont aussi utiles pour identifier et quantifier les sources d'émissions, les puits de polluants spécifiques (ex : sources de NO<sub>x</sub> par les avions et par les éclairs, échanges troposphère/stratosphère), les flux trans-frontières de polluants, l'impact des nuages et des aérosols sur les taux de photolyse et sur la chimie troposphérique gazeuse. Elles deviennent à ce titre des éléments de surveillance et d'évaluation des politiques de réduction des émissions de polluants.

Depuis l'espace, les signaux troposphériques sont souvent faibles et fréquemment perturbés par les nuages ainsi que par les espèces stratosphériques. D'autres problèmes liés à la dépendance albédo / longueur d'onde, à la dépendance des sections efficaces d'absorption, à la température, à la variabilité de la distribution des polluants avec l'altitude et à des effets de dilution, à des temps de vie différents et souvent plus courts dans la troposphère que dans la stratosphère, à la combinaison d'observations au limbe (sensible pour stratosphère) et au nadir (colonne totale) vont entraîner des erreurs pour la détermination quantitative des concentrations chimiques. Il est donc nécessaire de développer et d'affiner des algorithmes pour :

- La déconvolution spectrale et une meilleure compréhension des effets instrumentaux;

- La modélisation du transport et du rayonnement pour convertir les radiances enregistrées ou les densités apparentes de gaz en colonne en densités verticales ou en profils de concentrations;
- La détection et correction des brumes ou des nuages;
- La dérivation de paramètres plus indirects tels que les fréquences de photolyse et l'intensité des sources.

### Prévoir la pollution

Les satellites ont une place importante pour la détermination de tendances dans le but de suivre à long terme la qualité de l'air. Les données satellites constituent des bases essentielles pour le test et la validation des modèles de transport/chimie actuels, des études statistiques, la constitution de cartes d'émissions. Leur exploitation repose sur la constitution de bases de données, sur l'interprétation des résultats des modèles qui pourront confirmer la validité des mesures par comparaison avec celles des réseaux, ou celles issues de campagnes intensives, et sur le développement de techniques d'assimilation appropriées.

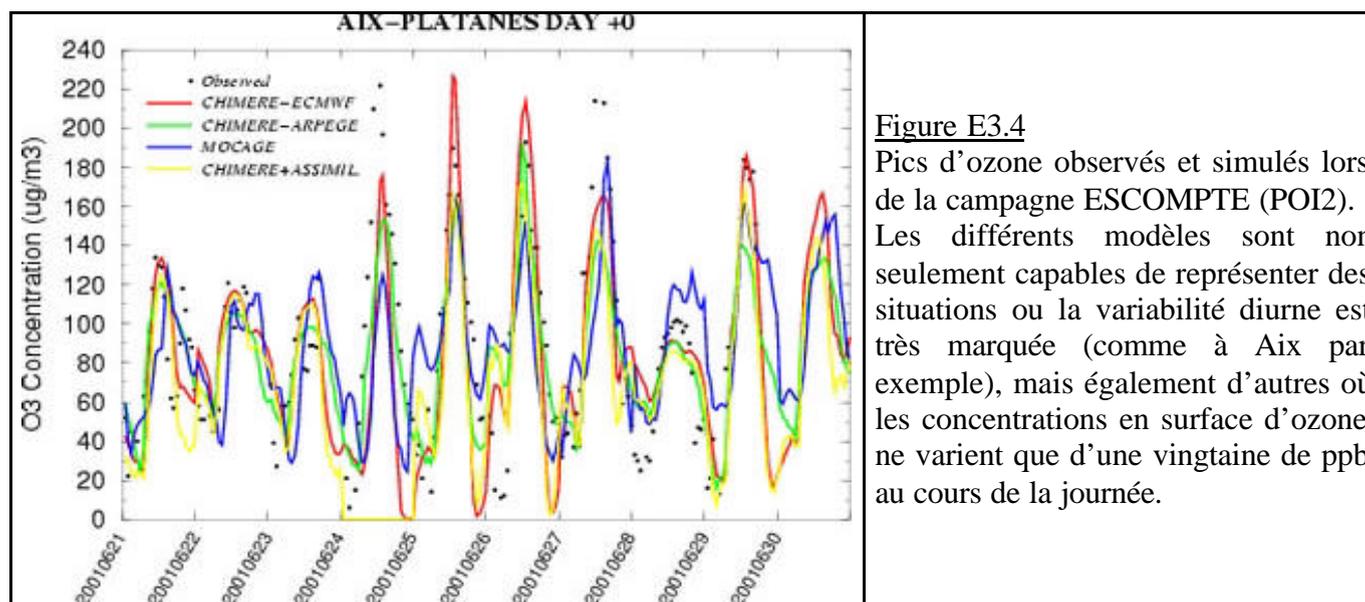


Figure E3.4

Pics d'ozone observés et simulés lors de la campagne ESCOMPTE (POI2). Les différents modèles sont non seulement capables de représenter des situations où la variabilité diurne est très marquée (comme à Aix par exemple), mais également d'autres où les concentrations en surface d'ozone ne varient que d'une vingtaine de ppb au cours de la journée.

Pour étudier la pollution par satellite, il existe un réel besoin de mesures de profils de constituants réactifs dans les basses couches avec une certaine continuité dans le temps et dans l'espace. Pour étudier des problèmes de confinement dans la couche limite, pour représenter finement les transferts entre couche limite et troposphère libre, ou encore entre haute troposphère et basse stratosphère, il est indispensable de disposer d'une résolution spatiale adéquate et représentative de l'épisode de pollution, du pic d'ozone (Figure E3.4). Pour obtenir par satellite des mesures des répartitions verticales et horizontales d'espèces troposphériques, et des séries temporelles de gaz en trace et d'aérosols pour observer, caractériser et prévoir la pollution aux échelles régionale et globale, on peut envisager une stratégie complémentaire combinant :

- D'une part les satellites à défilement en orbite basse qui offrent la possibilité de signaux plus forts, permettent une bonne description verticale des profils des espèces mais n'assurent pas le suivi d'un épisode sur plusieurs jours.
- D'autre part, l'option du satellite géostationnaire, qui, même si elle est coûteuse, permettrait d'atteindre certains des objectifs indiqués précédemment et nécessitant une bonne couverture temporelle : caractérisation des sources, calculs des flux trans-frontières.



## 4. BESOINS PRINCIPAUX EN MATIERE D'OBSERVATIONS SPATIALES

Les chapitres précédents montrent les besoins considérables d'observation spatiale, et la variété des domaines d'application. L'apport des satellites pour répondre à ces multiples questions scientifiques implique de définir une stratégie d'utilisation des mesures spatiales prenant en compte les évolutions des capacités des mesures et de leur exploitation.

Ces évolutions, prévisibles et déjà perceptibles, concernent d'une part la tendance vers une résolution toujours plus haute, horizontale et verticale, afin de décrire correctement les principaux processus du système terrestre, et d'autre part les progrès de l'assimilation des données dans les modèles numériques simulant l'évolution des différents milieux. Une conséquence est la demande d'une couverture spatiale et temporelle très accrue, allant de plus en plus jusqu'à la permanence des mesures.

L'augmentation du nombre, de la précision et de la résolution des mesures a deux conséquences importantes :

- La validation des mesures et variables géophysiques qui en sont déduites doit être conduite avec soin pour assurer la qualité des données, et nécessite un programme de mesures complémentaires important (mesures in-situ, sol, aéroportées);
- La forte croissance du nombre de données spatiales et des utilisations envisagées (analyses de variabilités spatio-temporelles, détections de changements brutaux ou non, etc.) implique la mise en place des outils associés d'archivage et d'analyse. C'est pourquoi la communauté scientifique, avec l'aide du CNES, se structure en pôles de compétence thématique pour travailler en réseau et mutualiser les efforts dans le domaine de la gestion et du traitement des données principalement spatiales.

Les sections précédentes montrent aussi le besoin d'une complémentarité entre mesures spatiales et mesures in situ, en raison des limites intrinsèques de l'observation de la Terre par satellite. Comme en météorologie opérationnelle, il faut concevoir les systèmes d'observation de l'avenir en articulant au mieux les deux types d'observation. Les ballons, les avions et les drones haute-altitude ont un rôle dans ce schéma, ainsi que les observatoires de l'environnement ou géophysiques au sol ou en fond de mer. Par ailleurs il ne faut pas oublier l'apport des satellites assurant la collecte de données in situ depuis des sites isolés et en des temps compatibles avec les applications utilisant ces données (voir section 4.4).

### 4.1. STRATEGIE D'UTILISATION DU SPATIAL

La réflexion prospective du TAOB prend en compte le contexte actuel et prévisible des programmes spatiaux internationaux. Ils peuvent se décliner en quatre types de missions :

- Les satellites météorologiques défilants et géostationnaires qui ont largement montré leur intérêt pour les études scientifiques sur le climat, les processus atmosphériques, et les surfaces terrestres. Certains des projets déposés dans le cadre des appels d'offres de recherche (du CNES et des autres agences spatiales) peuvent préfigurer les futurs capteurs opérationnels météorologiques.
- Les missions opérationnelles d'observation de la Terre (SPOT, LANDSAT, RADARSAT) qui ont également joué un rôle important pour l'étude des surfaces continentales, par l'accès qu'elles offraient à des résolutions fines, compatibles avec les mesures in situ.
- Les missions d'observation de la Terre pluri-disciplinaires (ERS, ENVISAT, programme EOS : TERRA, AQUA, AURA) qui ont permis d'explorer et développer des outils performants (mono- ou multi-capteurs) qui tendent à devenir opérationnels (ex. interférométrie SAR pour l'analyse des déformations).
- Les programmes en préparation qui ne sont plus fondés sur des charges utiles aussi complexes, mais sont maintenant focalisés sur des objectifs précis, au moyen de satellites de taille réduite (programme ESSP ou EARTH EXPLORER).

La question qui se pose avec acuité concerne la place, à côté du développement de nouvelles techniques d'observations pour de nouveaux paramètres, de la continuité de certaines observations primordiales qui n'est actuellement pas assurée (ex. SAR après ENVISAT ?).

En ce qui concerne l'étude et de suivi de la surface, les programmes d'imagerie opérationnelle sont en développement, et seront d'autant plus utiles à la communauté scientifique que les spécifications des missions prendront en compte les besoins exprimés: parmi ceux exprimés dans les sections précédentes, certains pourraient être couverts par le programme ORFEO, comme la surveillance des aléas naturels et le

suivi des écosystèmes, à condition de prendre en compte ces besoins dans les spécifications. Ces programmes sont néanmoins restreints à certaines classes d'imageurs dans les domaines visible, infrarouge et hyperfréquence.

On a noté plus haut la demande croissante de continuité des mesures dans tous les domaines scientifiques de l'Observation de la Terre. Le besoin d'une coordination internationale sur la question des observatoires spatiaux devient évident, et deux projets français entrent pleinement dans ce contexte : AMPERE et ALTIKA sont conçus comme des précurseurs de systèmes d'observation continue du champ magnétique terrestre, d'une part, et de la circulation océanique, en complément de la filière JASON (en supposant que celle-ci soit effectivement pérennisée à travers EUMETSAT pour ce qui concerne la participation européenne) d'autre part. Le programme EARTH WATCH de l'ASE pourrait être un des cadres possibles pour atteindre ces objectifs. Une solution à considérer également est l'embarquement des capteurs assurant la continuité des mesures comme passagers sur des missions d'opportunité. Quelle que soit la solution choisie, la pérennisation des mesures dans un contexte d'observatoire spatial relève d'une démarche « opérationnelle », et ne doit pas pénaliser la recherche amont en Observation de la Terre même si la communauté scientifique a besoin de ces données.

Dans la suite du texte, les projets sont répartis entre ceux entrant dans le cadre d'observatoires spatiaux (ou leur préparation), et ceux pour lesquels une perspective d'avancée scientifique importante est attendue à moyen et à plus long terme. La stratégie d'observation spatiale du comité TAOB pour les prochaines années s'est fortement appuyée sur les réponses à l'appel à idées (Annexe 2).

## **4.2. CONTINUITÉ DES MESURES : OBSERVATOIRES SPATIAUX**

Le chapitre 2 a montré que, de plus en plus, les études du système terrestre s'appuient sur de longues séries temporelles. Jusqu'à une époque récente, seuls quelques paramètres étaient mesurés en routine depuis plusieurs dizaines d'années. L'observation spatiale permet ce type d'analyse sur plus de 20 ans pour les satellites météorologiques, et maintenant 10 ans pour l'altimétrie. Pour ces variables que l'on sait mesurer précisément depuis l'espace, la continuité des observations est nécessaire scientifiquement et faisable techniquement.

### **• *Champ magnétique***

La maturité acquise dans la mesure du champ magnétique terrestre depuis l'espace, et l'exploitation de ces données justifie de pérenniser cette observation. La mission SWARM, sélectionnée pour une phase A par l'ASE, et le projet de micro-satellite AMPERE contribuent à cette continuité. Il faut que l'un ou l'autre des projets aboutisse. L'évolution des capteurs pour la mesure du champ magnétique est surtout liée à la possibilité de pouvoir mesurer les trois composantes et la norme absolue du champ magnétique avec le même instrument et avec une bande passante permettant déterminer les variations du champ magnétique externe.

### **• *Mesure des mouvements de surface (y compris au fond des mers)***

Pour la mesure des mouvements de surface, les systèmes tels que DORIS ou GPS, ou plus tard GALILEO resteront des éléments fondamentaux. Concernant le système DORIS, il faut poursuivre les améliorations du système (segments sol et spatial) afin que cela reste un système géodésique de pointe et poursuivre l'effort d'ouverture vers la communauté internationale. Les techniques comme l'interférométrie radar ou la corrélation d'image pour la détection de déplacements doivent être développées et améliorées. La connaissance de la troposphère est souvent un facteur limitant pour la plupart des techniques de mesures de déplacements, et l'effort doit donc porter sur ce point dans les années à venir.

Pour la mesure des déplacements du fond des mers, le spatial doit être intégré comme un outil pour la transmission des données et le positionnement; plus généralement le spatial peut devenir un élément majeur dans la transmission de données in situ avec des délais rapides et des hauts débits.

### **• *Imagerie grand champ pour le suivi global des surfaces terrestres et de l'océan.***

L'étude de la biosphère terrestre et marine nécessite des observations globales à forte répétitivité. Les capteurs VEGETATION, POLDER, SEAWIFS, MODIS, MERIS ont permis de mettre au point l'exploitation des mesures spatiales grand champ, et il convient maintenant de pérenniser ce type d'observation. Pour certaines applications, une amélioration de la résolution horizontale (optimalement

jusqu'à l'échelle décimétrique) permettrait d'affiner les modèles et de mieux suivre les effets anthropiques sur le milieu.

- *Altimétrie de haute précision et de haute résolution à moyenne échelle*

Comme rappelé plus haut, au-delà de JASON-1, il faut absolument assurer la continuité des observations de haute précision du niveau de la mer. Cela est actuellement prévu par la mission OSTM avec le satellite JASON-2 dans le cadre d'une coopération quadripartite entre NASA, NOAA, CNES, EUMETSAT.

Cependant, il est également nécessaire de résoudre des échelles spatiales et temporelles plus fines pour océan hauturier (circulation de moyenne échelle, fronts) jusqu'aux pôles et dans les régions côtières. La définition de la relève d'ENVISAT doit se faire dans la perspective de l'assimilation de ces données dans des modèles numériques d'océan à haute résolution. Cette altimétrie meso-échelle est primordiale pour poursuivre l'étude des processus dynamiques régissant la variabilité de la circulation ainsi que dans le cadre de MERCATOR. Des projets tels qu'ALTIKA, WSOA ou encore un système multi-satellites pourraient répondre à ce besoin. Un besoin additionnel est la continuité du suivi de la cryosphère polaire par altimétrie.

- *Bilan radiatif*

Après les missions ERBE, ERBS et SCARAB (sur le satellite RESURS), les données CERES sur diverses plateformes permettent de suivre le bilan radiatif de la Terre mais à la fin de la décennie il n'y a pas de projet d'emport d'un instrument de mesure du bilan radiatif, à l'exception d'un SCARAB sur MEGHA/TROPIQUES aux latitudes tropicales. Le suivi de ce paramètre est pourtant indispensable à la surveillance de l'évolution du climat.

- *Profils d'ozone stratosphérique et composants minoritaires associés*

Après de nombreuses missions ayant principalement des objectifs de chimie stratosphérique, dans aucun cas la continuité des mesures n'est assurée au-delà d'ENVISAT, qui emporte MIPAS et GOMOS. A l'échéance 2008-2010, lorsque les effets du Protocole de Montréal et de ses amendements auront commencé à faire diminuer de façon significative la quantité totale de chlore dans la stratosphère, il sera nécessaire de continuer à surveiller la haute troposphère et la basse stratosphère pour confirmer l'impact de cette réduction du chlore sur le retour à la normale de l'ozone, ainsi que pour contrôler l'effet de l'augmentation des gaz à effet de serre sur la structure thermique et le bilan radiatif dans le domaine d'altitude correspondant. Ces objectifs étaient ceux de la mission ACECHEM, qui n'a pas été retenue comme mission «cadre» de l'ASE. Mais les besoins scientifiques correspondants seront toujours présents à l'horizon 2010.

A ces besoins exprimés par la communauté scientifique, s'ajoute la demande de continuité de mesures météorologiques et d'observation de la terre et la nécessité de prévention des risques :

- *Vent et température de surface sur les océans*

Les diffusiomètres ont permis une première surveillance de la surface de la mer par l'estimation du vent. La continuité opérationnelle des mesures diffusiométriques en bande C est assurée par les satellites METOP à partir de 2005 et jusqu'aux alentours de 2015. Par contre, la continuité opérationnelle des mesures diffusiométriques en bande Ku (SEAWINDS) n'est pas aujourd'hui garantie au-delà d'ADEOS-2. La NOAA devant tester pour son futur programme de défilants NPOESS une technologie alternative, reposant sur la radiométrie micro-ondes polarimétrique.

La continuité des mesures de température de surface de la mer en radiométrie infrarouge est garantie par les programmes météorologiques opérationnels défilants (NOAA puis NPOESS, METOP) et géostationnaires (GOES, MSG, MTSAT). Cependant, la continuité opérationnelle d'une filière de radiométrie infra-rouge de haute précision, pour les objectifs de suivi climatique (ATSR puis AATSR) n'est pas aujourd'hui assurée au-delà d'ENVISAT. Par ailleurs, les objectifs de couverture globale (même dans les zones nuageuses) et de haute résolution spatio-temporelle rend prioritaire le développement de radiomètres micro-ondes ayant des capacités suffisantes en résolution horizontale et en précision pour la restitution de la température de surface de la mer.

- *Météorologie*

Il est évidemment implicite à toutes les réflexions prospectives que les satellites de la veille météorologique mondiale continueront de fournir les données fondamentales en imagerie et en sondage.

Les séries MSG et METOP, pour se limiter à la contribution européenne, sont des éléments fondamentaux pour toute étude de l'atmosphère depuis l'espace. Une réflexion prospective est en cours pour les satellites futurs, la communauté scientifique française y est associée.

- *Imagerie haute résolution pour l'étude du fonctionnement des écosystèmes, le suivi de l'occupation des sols et la surveillance des aléas de la surface*

Pour le suivi de l'occupation des sols, l'aménagement du territoire en particulier du littoral, l'étude du fonctionnement de la végétation à l'échelle régionale et l'agriculture raisonnée, la filière SPOT a permis de nombreuses applications. La résolution horizontale requise pour ces applications est décimétrique à métrique. La continuité des mesures au-delà des satellites SPOT 1 à 5 dans le cadre de PLEIADES est indispensable. La haute résolution en optique et hyperfréquence du programme ORFEO permettra de remplir au moins en partie les besoins de surveillance des zones particulières, comme certains volcans ou des failles actives.

- *Surveillance et compréhension des mécanismes des aléas naturels*

Plus généralement, la possibilité d'utiliser les systèmes existants pour des objectifs de surveillance et prévention de tous les types d'aléas doit être exploitée au maximum (Charte sur les risques majeurs). A l'avenir, pour le développement des futurs satellites d'observation opérationnels, l'effort doit porter sur l'intégration des systèmes depuis les instruments jusqu'aux chaînes de traitement en temps quasi-réel.

### **4.3. ETUDES DU SYSTEME TERRE : MISSIONS NOVATRICES**

#### **4.3.1. MISSIONS EN PREPARATION OU REALISABLES A MOYEN TERME (DANS LES 10 ANS)**

Les missions qui suivent sont soit issues du précédent colloque de prospective et actuellement en préparation, soit des projets soumis à l'appel d'offres EARTH EXPLORER de l'ASE, mais non retenus pour une phase A immédiate. Il s'agit de réaffirmer l'importance et l'intérêt prioritaire de CALIPSO, SMOS, MEGHA-TROPIQUES, et des missions micro-satellites DEMETER, PARASOL, PICARD et la nécessité de les faire aboutir. Pour les secondes (SWIMSAT, TROC, CARBOSAT, ainsi que ORAGES, RHEA), ce sont des projets nouveaux que le TAOB souhaite voir se concrétiser dans un cadre national ou international, ou par la participation à un projet équivalent engagé par une autre agence.

- *Perturbations ionosphériques en liaison avec l'activité sismique*

Le micro-satellite DEMETER mesurera un ensemble de paramètres géophysiques de l'ionosphère terrestre susceptibles d'être affectés par l'activité tellurique ou volcanique. Il permettra de confirmer l'existence de signaux électrique et magnétique dans la haute atmosphère associés à cette activité en particulier lors des phases préparatoires des séismes ou éruptions, et d'évaluer les modèles géophysiques d'initiation et de propagation de ces signaux.

- *Humidité de surface et salinité de l'océan superficiel*

La mission SMOS, en préparation comme mission d'opportunité du programme EARTH EXPLORER de l'ASE, fournira pour la première fois une mesure de l'humidité superficielle des sols à l'échelle globale au moyen d'un radiomètre micro-ondes en bande L. Cette information est essentielle pour quantifier les échanges surface-atmosphère. Cette mission sera l'occasion de tester la faisabilité de l'estimation de la salinité de l'océan superficiel depuis l'espace.

- *Constante solaire*

Le micro-satellite PICARD mesurera le diamètre et l'activité solaire au cours d'une phase de variation du cycle solaire. Cette mission intéresse autant les études du soleil que celle du climat, qui est contraint par l'énergie solaire incidente. La relation entre diamètre et activité permettra d'exploiter des mesures historiques de diamètre solaire, afin d'améliorer la compréhension des variations climatiques naturelles depuis deux siècles.

- *Interactions aérosols nuages rayonnement*

Les missions CALIPSO et PARASOL, associées à AQUA et CLOUDSAT, fourniront une description tri-dimensionnelle de la structure des nuages et la distribution des aérosols. Au-delà, la sélection en phase A par l'ASE d'EARTHCARE permet d'espérer mieux établir le rôle des nuages sur le bilan radiatif et le cycle de l'eau dans le cas de nuages glacés en particulier. Après ces missions, sera posée la question de la

définition d'un ensemble instrumental pouvant être rendu opérationnel pour le suivi à long terme des caractéristiques principales des aérosols et de l'eau nuageuse en vue de leur assimilation dans les modèles opérationnels de prévision météorologique.

- *Cycle de l'eau atmosphérique*

La mission franco-indienne MEGHA-TROPIQUES est destinée à l'étude du cycle de vie des systèmes convectifs et leur impact sur l'évolution de la bande tropicale (vapeur d'eau et bilan radiatif), et le micro-satellite ORAGES devrait permettre de relier électricité et processus microphysiques au sein des cellules convectives. Cette complémentarité des objectifs conduit à recommander un lancement d'ORAGES sur l'orbite de MEGHA/TROPIQUES.

Même s'il reste beaucoup à faire sur l'amélioration de la précision du taux précipitant et la physique des systèmes nuageux, le projet GPM, initialement américano-japonais, se présente comme un précurseur d'observatoire spatial auquel l'ASE envisage de contribuer avec E-GPM. La mission MEGHA-TROPIQUES, en plus de son intérêt propre, s'insère dans ce projet.

- *Surveillance et la compréhension des mécanismes physico-chimiques dans la troposphère*

Pour la troposphère, MOPITT sur TERRA est un démonstrateur intéressant de ce que peut faire un sondeur spécifique à une espèce donnée (CO). Avant d'envisager la pérennisation de telles mesures, il est nécessaire de valider les différentes techniques de mesure à distance dans la troposphère. SCIAMACHY sur ENVISAT remplira une partie de ces objectifs (avec le choix de l'UV-visible et deux canaux dans l'infrarouge courte longueur d'onde), ainsi que TES sur AURA (avec le choix de l'infrarouge thermique). D'autres missions d'opportunité seront peut-être sélectionnées pour couvrir la chimie troposphérique et les gaz à effet de serre. Le projet de mission TROC pourrait contribuer à ces objectifs, par l'emport de spectromètres UV et IR en orbite polaire. Le suivi du cycle diurne depuis l'orbite géostationnaire (ex. GEOTROPE) devra être envisagé à plus long terme.

- *Caractérisation des écosystèmes*

Le projet RHEA a été retenu comme mission de démonstration pour le suivi des caractéristiques de la végétation sur un certain nombre de sites représentatifs des principaux écosystèmes. Il doit permettre d'observer dans une dizaine de bandes spectrales avec une capacité de visite quasi journalière et une résolution horizontale décimétrique. RHEA peut s'envisager comme une composante du système PLEIADES, car il permet de couvrir également certains besoins opérationnels comme l'agriculture raisonnée. Le projet de mission hyper-spectrale SPECTRA de l'ASE recouvre les mêmes objectifs.

- *Mesure de l'état de la mer*

Au-delà de la continuité des mesures diffusiométriques et altimétriques, l'accès à l'ensemble du spectre d'état de mer est nécessaire tant pour l'étude de son rôle dans le couplage océan – atmosphère que pour la protection des biens et des personnes. Le projet de mission SWIMSAT (radar à plusieurs visées angulaires) pourrait y contribuer. Les efforts menés dans ce cadre pour préparer l'utilisation des données doivent être poursuivis et la réflexion élargie aux autres paramètres géophysiques accessibles par cette technologie qui inclut un mode altimétrique : suivi des hautes latitudes, étude des glaces, etc.

### 4.3.2. ETUDES AMONT EN PREPARATION DES MISSIONS FUTURES

Il est possible de résumer les besoins en R&T en disant qu'il faudra dans l'avenir mesurer les divers paramètres plus souvent, partout, en dépit des diverses contaminations et obstacles, en accédant à des signatures spectrales de plus en plus fines. Les pistes de réflexion du comité TAOB sont décrites ci-dessous à partir des résultats de l'appel à idées (résumés dans l'Annexe 2). Celles qui sont apparues les plus prometteuses pour la communauté française sont indiquées en gras.

- *Détection et quantification du CO<sub>2</sub> atmosphérique*

**Plusieurs types d'instruments sont envisageables pour l'observation du CO<sub>2</sub> atmosphérique :**

- **Un spectromètre à haute résolution dans l'IR thermique, de type IASI/AIRS;**
- **Un spectromètre à haute résolution dans le solaire (proche infrarouge) associé à une méthode de type absorption différentielle utilisant la lumière solaire (OCO, CARBOSAT);**

- Un lidar embarqué permettant une couverture globale (jour/nuit, hiver/été). Un laser accordable semble une nécessité pour balayer plusieurs pics et plusieurs composés. Une modulation temporelle permettrait de préciser l'altimétrie en temps réel (H2R2).

Seul le spectromètre à haute résolution à lumière solaire semble vraiment faisable à court terme (5 ans) en termes de précision et de maturité technique, et une participation française au projet de la NASA (OCO) est souhaitable. Au delà, un lidar de puissance à impulsion permettrait de sonder le profil de CO<sub>2</sub>. A long terme une constellation de lidar imageurs (balayage) pourrait être nécessaire pour alimenter des modèles opérationnels sur le cycle du carbone, car une forte résolution spatio-temporelle est nécessaire.

- *Mesure des variations du champ magnétique avec de meilleures résolutions spatiales et temporelles*

Dans le futur, les améliorations de la mesure du champ magnétique passeront surtout par la définition de concepts originaux tels que :

- des vols en formation rapprochée qui nécessitent des études d'orbitographie (concept MAGIC);
- des vols à des altitudes très basses qui nécessitent la définition de véhicules volant vers 20-30km, relativement dirigeables du moins sur des trajectoires stables et de longue durée (drones ou ballons) (concept GEOVALT).

- *Mesure des variations du champ de gravité avec de meilleures résolutions spatiales et temporelles*

Les améliorations des futures missions dédiées à ces mesures passeront par une meilleure précision des accéléromètres et par des restitutions de trajectoires optimisées. Pour les accéléromètres, l'évolution est en partie pilotée par les besoins en physique fondamentale avec les projets STEP et LISA et, comme pour le point précédent, c'est aussi par la définition de nouveaux concepts de mission que se feront les grandes avancées : vols en formation par exemple. On notera que très souvent un lien précis entre les satellites (laser) est un élément important du système (concepts MICROMEGA, LICODY).

- *Mesure de la topographie et, dans certains sites, de ses variations temporelles avec une précision métrique(en particulier, la mesure de la bathymétrie en zone côtière)*

Pour la mesure de la topographie et de ses variations, un projet tel que la Roue Interférométrique semble prometteur de par la grande résolution et la globalité du produit proposé. Cependant, la signification d'un MNT en bande L ou C, c'est à dire avec une pénétration variable suivant la nature de la surface, doit être étudiée avec attention. Le stockage d'une grande quantité de données à bord des satellites radar et leur télétransmission rapide constitue un axe de la R&T.

En ce qui concerne la mesure de la bathymétrie en zone côtière, la définition d'un instrument capable d'atteindre cet objectif est un sujet de R&T à part entière.

- *Estimation de la quantité en eau dans le premier mètre du sol*

Au-delà de la mission SMOS, l'accès à l'humidité de surface demeure un défi technologique. Or, l'humidité des sols demeure un des paramètres des modèles météorologiques les moins bien connus, et son importance pour l'étude des écosystèmes est évidente. A terme, l'objectif serait de disposer du profil d'humidité dans le premier mètre, avec un rafraîchissement toutes les semaines et une résolution inférieure au kilomètre. Au-delà de 10 km de résolution horizontale, les paramètres demeurent cependant intéressants pour les modèles climatiques (la technique SMOS ne permet d'accéder qu'aux premiers cm du sol, et il faut donc assimiler ces observations dans des modèles TSVA pour accéder à l'humidité de la zone racinaire). A plus long terme, le radar bande P pourrait fournir l'humidité des sols sur une plus grande profondeur, et on pourrait envisager des systèmes couplant les bandes L et P en actif ou passif.

- *Structure tridimensionnelle de la végétation*

La caractérisation de la structure des écosystèmes terrestres est un objectif majeur pour les études de la végétation. La hauteur de la canopée est un paramètre important potentiellement accessible avec les altimètres et les lidar (VCL). Enfin, l'interférométrie radar permet en théorie d'apporter des informations sur le volume de la végétation, par perte de cohérence à différentes profondeurs (pénétrations en fonction de l'angle d'incidence). Elle est complémentaire d'une approche optique très haute résolution qui devrait permettre d'améliorer la connaissance de la structure horizontale de la végétation (densité, organisation spatiale, détection des trouées...).. La différence entre MNT obtenus en bande X et en bande P pourrait également être interprétée en terme de hauteur de la

canopée. Atteindre le profil vertical des couverts végétaux reste un défi (indice foliaire par strate...). La résolution horizontale souhaitée se situe autour de 10-20 mètres horizontalement, et 1m verticalement.

- *Radar bande P pour la cryosphère continentale*

Voir dans l'épaisseur des glaciers de l'Antarctique et du Groenland est un objectif qui semble technologiquement accessible. Cependant par défaut de données, les méthodologies d'exploitation restent embryonnaires. Cette technique est également envisageable pour l'évaluation de la biomasse sur les surfaces continentales, et la détection de structures de sub-surface.

- *Multi-spectral pour la spéciation biosphère marine*

Afin de progresser dans la compréhension de la biologie marine, il n'est plus suffisant d'avoir une estimation de la biomasse marine à partir des mesures de la couleur de l'eau; il devient nécessaire de pouvoir discriminer entre les différentes espèces de phytoplancton : une voie pour cela est d'utiliser les différences de signature spectrale entre ces espèces.

- *Domaine côtier et étendues d'eaux continentales*

L'exploitation des observations satellite pour l'océanographie côtière (physique et bio-géochimique) est souvent très difficile à cause de difficultés de résolution et de complexité des interactions. L'observation dans ces régions doit gagner en résolution spatiale et temporelle, ainsi qu'en résolution spectrale, et il est nécessaire de prévoir un accompagnement du spatial par des mesures in-situ afin d'assurer une validation appropriée des mesures.

L'exploitation des données de couleur de l'eau est délicate à proximité des côtes, en raison des sédiments en suspension. Un géostationnaire à large bande spectrale et à haute résolution pourrait grâce à sa forte résolution temporelle discriminer entre les différents facteurs contribuant au signal.

Les altimètres de TOPEX-POSEIDON, ERS-1 et -2 permettent le suivi des étendues d'eau libre, lacs, fleuves ou zones d'inondation d'une certaine taille. Des altimètres à plus fine résolution spatiale comme ICESAT ou une version adaptée d'ALTIKA, devraient permettre d'accéder à un plus grand nombre de réservoirs. Enfin, les vitesses d'écoulement des fleuves, permettant d'évaluer leur débit, sont encore inaccessibles de l'espace même si certains concepts voient le jour actuellement (Roue Interférométrique, lidar Doppler).

- *Développement de techniques permettant l'observation des composants bromés*

Avec la perspective de la réduction des fréons dans la stratosphère, la part des bromes dans les processus de destruction de l'ozone va croître, un suivi de ces composés deviendra nécessaire pour suivre et analyser le retour vers l'équilibre du contenu en ozone stratosphérique.

- *Mesure du vent et de la pression*

Avec la mission AEOLUS, une première mesure directe du champ de vent depuis l'espace sera faite. Cependant cette mission ne donnera accès qu'à une composante du vecteur vent. La définition de techniques permettant d'accéder au champ de vent complet, y compris les vitesses verticales, ainsi que l'invention d'un procédé de mesure de la pression de surface avec la précision requise (moins de 0,5 hPa soit une précision relative de 2 à 3  $10^{-4}$ ) constitueraient des progrès importants dans l'observation depuis l'espace. Le concept VIVA pourrait apporter une information complémentaire au sommet des nuages.

- *Aspects instrumentaux*

- *Lidars*

Le lidar constitue à l'évidence un moyen d'observation aux débouchés multiples. Par exemple, les données des radiomètres qui corrigent le signal altimétrique de l'effet de l'humidité atmosphérique ont une résolution horizontale insuffisante pour les zones côtières et continentales. L'humidité atmosphérique reste un problème pour la mesure depuis l'espace : ni les profils déduits des sondeurs infrarouges à haute résolution spectrale (AIRS, IASI), ni ceux déduits des instruments micro-ondes n'auront la résolution verticale et horizontale requise pour diverses études de processus, et en particulier pour accéder à la couche limite atmosphérique ou corriger le signal altimétrique à proximité des terres. Une approche par lidar (WASA, H2R2) est un complément nécessaire à l'approche radiométrique.

Complément naturel du radar en permettant une meilleure résolution horizontale un lidar peut contribuer aussi bien à l'étude des nuages et des aérosols, à la détermination du profil de la végétation et de sa structure 3D, à la détermination de différentes espèces chimiques (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>...), qu'à l'étude du champ de vent ou peut-être du débit des fleuves dans sa version Doppler. Le développement de technologies "télécom" permet d'envisager de façon de plus en plus crédible la multiplication de ces applications.

- ***Observation depuis l'orbite géostationnaire***

**Afin d'accéder à une haute résolution temporelle et de pouvoir suivre des phénomènes à l'échelle de l'heure, voire moins, le développement de moyens d'observation depuis l'orbite géostationnaire apparaît de plus en plus comme un défi devant être relevé. Les besoins concernent la mesure en micro-onde, l'observation à haute résolution spectrale afin de réaliser du sondage en température, en humidité, et de diverses espèces chimiques pour le suivi de la pollution troposphérique, ainsi que le suivi des variations rapides de surface (océanique et terrestre). Les besoins de prévention des risques, ainsi que la gestion des crises lors d'une catastrophe bénéficieraient également du suivi par des géostationnaires, si l'on peut atteindre une résolution horizontale de l'ordre de la vingtaine de mètres.**

#### **4.4. MOYENS COMPLEMENTAIRES A L'OBSERVATION SPATIALE**

L'exploitation d'une mission spatiale nécessite d'importants moyens d'accompagnement (avant, pendant et après la mission) :

- Développement d'instrumentation sol, aéroportée ou sous ballon pour démontrer la faisabilité de nouveaux concepts et développer les méthodes d'analyse des nouvelles données;
- Campagnes de mesure mettant en jeu des moyens de plus en plus diversifiés pour accéder à la vision la plus complète possible du milieu observé;
- Réseaux complémentaires de mesures in situ;
- Centres de gestion et de traitement pour accéder aux données, les traiter et les analyser.

Dans la suite il ne s'agit pas d'une véritable analyse de prospective sur les moyens complémentaires à l'observation spatiale, mais davantage d'un état des lieux soulignant les forces et les faiblesses dans les divers domaines.

Concernant les activités ballons, le TAOB considère qu'une réflexion prospective devrait être conduite dans un cadre inter-organismes sur l'ensemble des vecteurs aéroportés du futur et l'instrumentation associée.

##### **4.4.1. INSTRUMENTATION SOL OU AEROPORTEE**

Les instruments prototypes ou démonstrateurs de capteurs spatiaux, ou encore ceux dédiés à la validation et l'interprétation des mesures spatiales (ex. RALI, WIND), sont développés dans les laboratoires avec le soutien du CNES et du CNRS/INSU. Ils sont mis en œuvre durant des campagnes de terrain associant un ensemble de mesures in situ et de télédétection. Ces instruments sont donc indispensables et complémentaires au développement des missions spatiales. Ils sont également essentiels pendant la durée des missions pour leur validation. Ces instruments sont utilisés au sol mais sont aussi embarqués à bord d'avions ou autres aéronefs, de façon à optimiser la détection des phénomènes recherchés (déplacement dans le temps, ou variabilité horizontale et verticale).

La communauté française disposera prochainement de deux avions de recherche : un ATR 42-320 pour les basses altitudes (jusqu'à 9km) avec une charge utile maximum de 2,5 tonnes, et un Mystère 20 pour les plus hautes altitudes (12,5 km) avec une capacité d'emport de masse scientifique de 1,2 tonnes. La gestion commune des avions sera faite par METEO-FRANCE, le CNRS/INSU, et le CNES.

En outre, le CNES et le CNRS/INSU participent au financement de l'avion GEOPHYSICA M55 qui vole à 20-21 km d'altitude et peut embarquer 1,5 tonne de charge utile.

Cependant, les avions ne sont pas adaptés à certains objectifs scientifiques, comme la description fine sur de grandes étendues des champs magnétique et de gravité, ou des propriétés physiques de l'atmosphère au dessus des océans. Les ballons représentent une alternative aux avions pour ces besoins (voir section suivante), mais il faut aussi songer aux avions sans pilotes télécommandés ou programmés (drones).

#### 4.4.2. BALLONS

La mise en œuvre par la Division Ballon du CNES de divers aérostats au bénéfice de la communauté scientifique est un élément important tant pour les études de l'aérodynamique que pour celles de la dynamique atmosphérique. Le besoin d'observations en ballons, affirmé lors du séminaire de prospective ballon en 1996 est de nouveau souligné par la communauté scientifique. Les besoins, loin de décroître, restent importants et se diversifient.

Les moyens actuels se répartissent en :

- Des ballons stratosphériques ouverts (BSO) utilisés dans les campagnes de suivi de l'ozone stratosphérique telles que THESEO
- Des montgolfières infrarouges (MIR) qui constituent des moyens désormais couramment utilisés dans des campagnes de mesures scientifiques. Ils participent en 2002 à l'étalonnage et la validation d'ENVISAT.
- Des ballons plafonnants ou pressurisés de couche limite, qui ont été mis en œuvre dans plusieurs campagnes scientifiques de grande envergure tels que MAP ou INDOEX.
- Des ballons pressurisés stratosphériques (BPS) développés pour l'expérience VORCORE.

Des études sont en cours pour évaluer la faisabilité de nouveaux systèmes, et l'amélioration des performances des systèmes existants peut ouvrir de nouveaux champs d'application :

- La miniaturisation de l'instrumentation ira de pair avec une demande d'accroissement de la capacité d'emport des BPS pour d'autres applications, notamment l'étude des variations spatiales du champ magnétique;
- Un nouveau concept prometteur : l'aéroclipper, permettant des mesures de longue durée des paramètres de couche limite atmosphérique et de la surface océanique;
- Les demandes deviendront plus complexes : nacelles pointées, possibilité de lâcher des dropsondes, charge utile re-programmable en cours de vol en fonction de la zone survolée (d'où besoin d'une liaison "montante" par satellite contribuant également aux aspects sauvegarde et sécurité);
- Enfin, plusieurs idées de ballons captifs ont été proposées en réponse à l'appel à idée : un réseau de petits ballons en métropole pour le suivi du CO<sub>2</sub> et un imposant ballon captif, à poste fixe ou déployable en campagne, pour effectuer des études de physico-chimie dans la couche limite. Contrairement aux précédents projets, ce dernier projet, par son ampleur, doit être examiné dans une perspective à plus long terme.

Il est donc nécessaire de réaliser de nouveaux systèmes tout en préservant la capacité de faire voler les instruments récemment développés y compris lors de campagnes simultanées avec des porteurs différents en raison de la diversité des communautés intéressées et de la multiplication des capteurs spatiaux nécessitant une validation régulière au moyen de telles mesures.

#### 4.4.3. RESEAUX D'OBSERVATION IN SITU

Les mesures satellitaires sont souvent insuffisantes pour décrire correctement l'ensemble des propriétés du milieu, et doivent donc être complétées par des mesures in situ. Ces mesures sont souvent organisées sous forme de réseaux. Il est possible de citer AERONET, NDSC, SIMBADA, PIRATA, CORIOLIS, DORIS, VALERI etc. En raison de l'importance de ces réseaux pour l'exploitation des données spatiales, le CNES s'associe aux autres organismes pour leurs mises en place et leurs développements.

De plus, dans ces réseaux la transmission des données, voire leur localisation, est effectuée par des satellites. Citons par exemple les observatoires de fond de mer (figure 4.1), ou les bouées fixes et dérivantes (réseau GODAE / CORIOLIS).

Une autre utilisation des satellites en fort développement est le suivi de la faune au moyen de balises, émettrices. Ces besoins sont appelés à se développer fortement dans les années à venir, et nécessitent des progrès dans la compression des données transmises et le stockage de l'énergie.

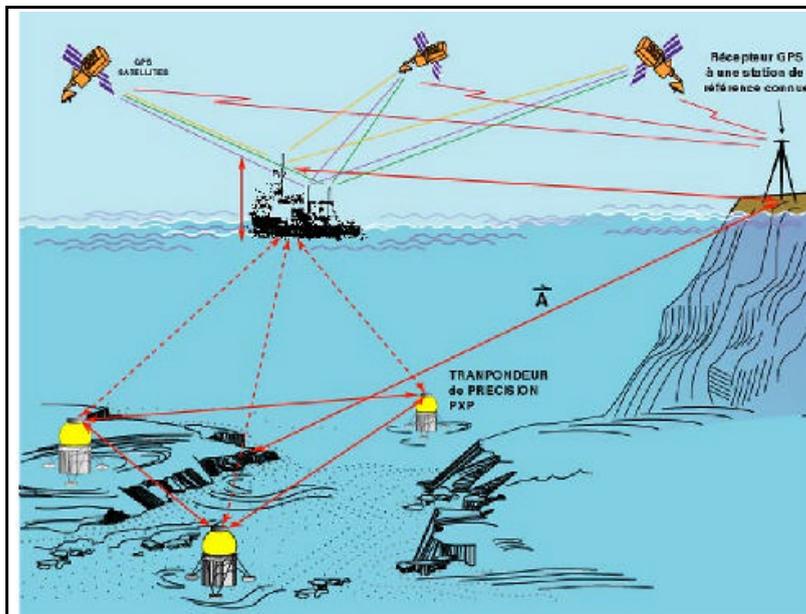


Figure 9

Exemple de déploiement d'un système de géodésie fond de mer intégrant l'outil spatial.

#### 4.4.4. CENTRES DE DONNEES THEMATIQUES

Suite aux travaux du groupe sur les bases de données en Géosciences, le CNES a entrepris avec le CNRS/INSU une réflexion sur les pôles thématiques de données spatiales. Ces pôles s'articulent autour des missions spatiales avec une logique "multi-capteurs" et sont destinés à l'élaboration de produits relativement évolués (niveau 2 et plus). Ils reposent sur une mutualisation des moyens et sur une coopération des organismes français concernés. Une ouverture est envisagée au niveau européen (notamment dans le cadre du 6ème PCRD) pour leur développement et l'exploitation des données.

Il est important que les structures techniques chargés du fonctionnement d'un pôle travaillent en étroite relation avec les experts scientifiques, seuls capables de valider les données et produits.

Les pôles thématiques existant ou en préparation sont :

- Pour l'océanographie : AVISO
- Pour la chimie atmosphérique : ETHER
- Pour les surfaces continentales : POSTEL/GEOLAND
- Pour les aérosols, le rayonnement, et le cycle de l'eau atmosphérique : ICARE

Enfin, il faut noter qu'un Service International Doris (IDS) est en train de se créer dans le même esprit que le service international IGS pour le système GPS.

Suivant les recommandations du groupe sur les bases de données en Géosciences et reprises par le TAOB, la création d'un pôle thématique doit prendre en compte les critères suivants :

- une cohérence thématique, des objectifs scientifiques,
- une coopération multi-organismes,
- un suivi scientifique,
- des moyens pérennes (métiers spécialisés) et mutualisés,
- un accès large et libre aux données pour la communauté scientifique.

## 5. SYNTHÈSE ET PRIORITÉS

Le système Terre est complexe, avec des interactions multiples à toutes les échelles d'espace et de temps. Les progrès de notre connaissance dans un domaine conduisent à formuler de nouvelles questions et l'action de l'homme modifie sans cesse le sujet de nos études. La compréhension du système Terre et des conséquences de l'action anthropique passent par la modélisation couplée des divers compartiments de notre environnement et par l'assimilation des données recueillies (spatiales et in situ). L'observation depuis l'espace permet une vision globale de plus en plus précise des divers phénomènes. Cette approche devient incontournable dans de nombreux domaines même si les variables mesurées résultent de la combinaison de plusieurs processus que l'on souhaiterait pouvoir dissocier. En outre, les données d'un

instrument ne sont souvent pertinentes que lorsqu'elles sont confrontées avec celles d'autres capteurs et avec les sorties de modèles.

L'apport crucial des données spatiales fait qu'indépendamment des technologies employées, la continuité de la détermination de nombreux paramètres apparaît fondamentale pour le maintien de diverses disciplines au niveau d'excellence où elles sont parvenues. Personne n'imagine que la continuité des mesures météorologiques, ni celle des missions d'imagerie à haute résolution, ne soit remis en cause. De même, la continuité des mesures spatiales est maintenant indispensable pour les données altimétriques de haute précision, l'observation de la couleur de l'eau, la mesure du champ magnétique, le suivi du bilan radiatif et de l'ozone.

Au final, après analyse de l'apport du spatial à la communauté de l'Observation de la Terre et compte tenu du contexte international (en particulier la programmation et les projets sélectionnés par l'ASE), la stratégie du TAOB est de recommander en première priorité, en plus de la continuité des mesures énoncées ci-dessus, la réalisation des missions concernant la chimie de l'atmosphère, le cycle de l'eau et des constituants à effets radiatifs. De façon plus détaillée, à court et moyen terme :

- Le Comité TAOB réaffirme le caractère prioritaire des petites missions sélectionnées lors du précédent colloque de prospective, c'est-à-dire CALIPSO, JASON-2, SMOS et MEGHA-TROPIQUES. Ces missions sont développées dans le cadre de collaborations internationales, dans lesquelles la communauté scientifique française a des responsabilités importantes, grâce aux engagements pris par le CNES. Leur réalisation établira les capacités de la France dans le domaine de l'observation spatiale de la Terre pour la recherche sur le climat.
- En ce qui concerne la filière micro-satellite du CNES, l'intérêt scientifique réside dans sa souplesse d'utilisation pour divers objectifs : faire la démonstration d'un capteur, compléter la charge utile d'une mission décidée ou participer occasionnellement à un observatoire spatial en cas de risque de rupture de la continuité des mesures. Le TAOB recommande en priorité la réalisation des microsattelites DEMETER, PARASOL et PICARD, sélectionnés selon ces critères. Le TAOB soutient ensuite le projet de microsatellite ORAGES en raison de sa complémentarité avec la mission MEGHA-TROPIQUES, et pour son intérêt comme démonstrateur instrumental. Les projets AMPERE et ALTIKA ont été conçus pour assurer la continuité de mesures essentielles en l'absence d'observatoires spatiaux adéquats. Le TAOB recommande la réalisation de ces objectifs par des microsattelites dédiés, ou par la participation à des missions répondant au besoin (instrument passager, par exemple). Quant à la mission RHEA, elle présente un intérêt scientifique certain et peut de plus offrir des applications opérationnelles. Le TAOB considère qu'elle peut également être envisagée dans le cadre de Pléiades.
- Enfin, le comité TAOB soutient fortement la préparation de deux projets issus de l'appel d'offres EARTH EXPLORER et réalisables à moyen terme : TROC pour la chimie atmosphérique et SWIMSAT pour la mesure de l'état de la mer. Ces projets correspondant à des besoins scientifiques majeurs, le TAOB recommande de rechercher un cadre de réalisation approprié.

Par ailleurs, afin de préparer de nouvelles missions, en particulier certaines identifiées lors de la réponse à l'appel à idées, de nombreux axes de R&T sont à explorer pour continuer de progresser à la fois dans les technologies d'observation et dans l'interprétation des mesures. Les priorités définies dans ce cadre par le TAOB sont :

- La mesure du CO<sub>2</sub> atmosphérique à l'échelle globale;
- La caractérisation physique de la surface dans le domaine côtier et pour les étendues d'eaux continentales;
- La mesure des variations du champ de gravité avec de meilleures résolutions spatiales et temporelles;
- La mesure de la topographie et, de ses variations temporelles avec une précision métrique;
- L'estimation du contenu en eau dans le premier mètre du sol;
- La détermination de la structure tridimensionnelle de la végétation.

Enfin, un autre défi est d'élargir le champ des utilisateurs des données spatiales à de nouvelles communautés scientifiques : cela passe par l'appropriation par de nouvelles disciplines de l'outil spatial et nécessite formation et interdisciplinarité.

## **ANNEXE 1 : LISTE DES MEMBRES DU COMITE TAOB**

<u>Présidente</u> : Laurence Eymard		CETP
<u>Secrétaires</u> : Nicole Papineau et Alain Podaire puis Pascale Ultré-Guérard et Vincent Cassé		CNES
Président du groupe Terre Solide	Michel Diament	IPGP
Président du groupe Surfaces Terrestres	François-Marie Bréon	LSCE
Présidente du groupe Océan	Pascale Delécluse	LODYC
Président du groupe Atmosphère	Didier Tanré	LOA
David Antoine	LOV	
Pierre Bahurel	SHOM	
Frédéric Baret	INRA	
Isabelle Braud	LTHE	
Patrick Buat-Ménard	Université de Bordeaux	
Claude Camy-Peyret	LPMA	
Claudie Carnec	BRGM	
Anny Cazenave	LEGOS	
Nadine Chaumerliac	LAMP	
Chantal Claud	LMD	
Cathy Clerbaux	SA	
Jean-Dominique Creutin	LTHE	
Alain Dabas	GAME	
Yves Dandonneau	LODYC	
Gérard Dedieu	CESBIO	
Carole Deniel	CNES	
Agnés Ducharne	UMR Sisyphe	
Laurence Galoisy	LMCP	
Hervé Jeanjean	CNES	
Michel Kasser	IGN	
Frank Lefèvre	SA	
Jean-Claude Menaut	CESBIO	
Herlé Mercier	IFREMER	
Bertrand Meyer	IPGP	
Patrick Monfray	LSCE	
Jacques Pelon	SA	
Frédérique Rémy	LEGOS	
Jean-Baptiste Renard	LPCE	
Hervé Roquet	Météo-France	
Pascal Tarits	Université de Brest	
Jacques Verron	LEGI	



## **ANNEXE 2 : LISTE DES PROPOSITIONS REÇUES A L'APPEL A IDEE POUR LA PREPARATION DE LA PROSPECTIVE**

### **ALTIKA\*\*3 (J. Verron - LEGI)**

ALTIKA power 3 est un projet de constellation de trois satellites emportant un radar altimètre en bande Ka, ainsi qu'un radiomètre micro-ondes nécessaire pour les corrections troposphériques. Le concept des instruments et de la plate-forme est le même que pour la proposition de micro-satellite ALTIKA. Les objectifs scientifiques associés à cette mission (et justifiant en particulier le concept d'une constellation de trois satellites par rapport à un satellite unique) portent sur la mesure à haute résolution spatiale et temporelle de la topographie de la surface océanique à meso-échelle, la détermination avec une précision accrue du courant de surface, ainsi qu'une meilleure description de la dynamique océanique dans les zones côtières.

### **COTR-SAT (P. Flamant - LMD)**

L'objectif de cette proposition est de réaliser une cartographie des sources et puits de gaz carbonique à l'échelle globale avec une précision supérieure à 1%. La technique de mesure est basée sur l'utilisation d'un lidar DIAL à 2 microns, pouvant être embarqué sur un mini- ou un micro-satellite.

### **DRIL-SAT (P. Flamant - LMD)**

Cette proposition concerne l'hydrologie continentale, et plus particulièrement l'évaluation des ressources en eau. La mesure est focalisée sur les décharges de fleuves et les rivières de plus de 250 m de large (caractérisation de la largeur et de la vitesse d'écoulement), et sur les lacs et zones inondées de plus de 100 km<sup>2</sup> (caractérisation de la hauteur). Le concept instrumental est basé sur l'utilisation d'une charge utile altimétrique classique (altimètre bi-fréquence Ku et C, et radiomètre tri-fréquence) et d'un lidar Doppler.

### **DYNSPA (P. Exertier - GRGS)**

La proposition DYNSPA a pour objectif l'amélioration de la détermination des précisions d'orbite en utilisant de nouvelles modélisations dans lesquelles les mesures orbitales seraient assimilées. Elle se place en préalable à la définition et au développement d'une nouvelle mission de micro-satellite géodésique.

### **HIPA (P. Drossart - DESPA)**

La proposition HIPA (Hyperspectral Imaging for Planetary Atmospheres) a été déposée simultanément en Connaissance de l'Univers et Sciences de la planète Terre. L'objectif est de poursuivre des travaux de R & D pour développer un Spectromètre Hétérodyne Spatial (SHS) permettant de faire de la spectro-imagerie planétaire en visée au nadir avec un interféromètre de Michelson sans partie mobile dans lequel les miroirs sont remplacés par des réseaux sous incidence Littrow.

### **ISIS (J. Artru - IPGP)**

L'objectif du projet ISIS (Imageur Sismo-IonoSphérique embarqué) est d'imager les perturbations ionosphériques consécutives aux déplacements du sol associés aux séismes. Il est proposé de réaliser une tomographie de la croûte terrestre depuis l'espace. Le principe de mesure se base sur l'interaction dynamique entre la Terre solide et l'atmosphère, et repose sur le fait que des déplacements de surface de l'ordre d'une fraction de millimètre peuvent engendrer une onde atmosphérique d'une amplitude de plusieurs centaines de mètres à 200 km d'altitude; le déplacement vertical du sol dû aux ondes de Rayleigh produit des ondes de pression ascendantes dans l'atmosphère, qui sont ensuite fortement amplifiées du fait de la décroissance de la densité atmosphérique. Il est envisagé de mesurer la propagation des ondes (Rayleigh) soit par réflexion HF, soit par transmission, avec une résolution de quelques dizaines de kilomètres, et en assurant une couverture globale, continentale ou régionale, actuellement inaccessible par des réseaux sismologiques au sol.

### **MAGIC (G. Hulot - IPGP)**

La proposition MAGIC porte sur la caractérisation des champs magnétique (mesure vectorielle absolue orientée) et électrique (mesure jusqu'à 100 Hz) terrestres et de leurs gradients à petite échelle. Le concept spatial est basé sur

trois (ou quatre) satellites identiques, placés sur une orbite polaire basse (500-600 km), et à faible distance les uns des autres (50 à 100 km), afin de couper en tout point de l'orbite les lignes de champ magnétique.

### **MICROMEGA (G. Balmino - GRGS)**

L'objectif de la proposition MICROMEGA (Mini-Constellation of Research Orbiters for Mapping the Earth Gravity Anomalies) est la cartographie du champ de gravité terrestre, avec deux options possibles :

- partie statique focalisée sur l'amélioration de la résolution spatiale du champ de gravité (de l'ordre de 50 km), postérieurement aux missions GRACE et GOCE;
- suivi systématique des variations temporelles du champ de gravité (qui offre notamment des possibilités d'application en hydrologie).

Selon l'option choisie, les concepts de mission proposés sont :

- concept de type GRACE (satellites à 150-300 km de distance sur la même orbite moyenne avec poursuite par GPS), ou un concept GOCE amélioré (utilisation d'un radiomètre cryogénique beaucoup plus sensible que celui de GOCE), avec des orbites basse altitude (300 km) permettant d'améliorer résolution spatiale du champ de gravité,
- nouveau concept basé sur une constellation de satellites proches, entre lesquels des mesures de vitesses relatives seraient effectuées. Cette constellation pourrait être constituée de quatre satellites en orbite quasi-circulaire et quasi-polaire basse (principe de type « roue gravimétrique »), distants les uns des autres de 5 à 100 km. Trois de ces satellites pourraient rester proches d'un plan moyen mobile ou d'un plan orbital moyen; le quatrième satellite effectuerait un mouvement de « yo-yo » par rapport à ce plan, ou restait à une distance moyenne constante du centre de la « roue ».

### **VIVA (A. Hauchecorne - Service d'Aéronomie)**

La proposition VIVA a pour objectif la quantification des déplacements des nuages en utilisant une mesure optique Doppler passive (source solaire) sur le sommet des nuages. Le principe de mesure est identique à celui de la mission SWIFT. Les précisions de mesure affichées (moins d'1 m/s) sont meilleures que celles de missions comme ADM/AEOLUS ou MSG.

### **WASA (C. Flamant - Service d'Aéronomie)**

L'objectif de la proposition WASA est la mesure de la distribution verticale des nuages (hauteur du sommet) et du contenu intégré en vapeur d'eau (par absorption différentielle) au-dessus et entre les nuages, à partir de mesures lidar à haute résolution spatio-temporelle effectuées en complément de mesures opérationnelles (IASI). La fauchée prévue pour le lidar est d'environ 2200 km. Ce système pourrait à terme être intégré dans un contexte opérationnel post-METOP-3, en supposant une démonstration antérieure.

### **Mesures géophysiques à haute altitude par véhicule aérien léger télécommandé (Y. Cohen - IPGP)**

L'objectif de cette proposition consiste à utiliser un drone haute altitude (15-30 km) et de grande endurance pour effectuer des mesures de champ magnétique et de champ de gravité terrestres, et permettant de réaliser des mesures selon un maillage régulier. L'utilisation de tels vecteurs constitue une possibilité unique pour des mesures de champ magnétique dans des gammes de longueur d'onde d'environ 10 km, dont les variations permettent de caractériser les structures profondes. Il est envisagé, en phase de démonstration, de réaliser des profils à travers des régions présentant des anomalies de grande longueur d'onde en domaine continental (Bangui en Afrique et Kursk en Europe). L'étape suivante pourrait être d'obtenir des profils transocéaniques, perpendiculaires aux orbites polaires des satellites.

### **Sondage vertical et horizontal de la basse troposphère et de l'interface air-mer par ballons captifs et dérivants (F. Dulac - LSCE)**

Cette proposition concerne l'utilisation de ballons captifs et dérivants afin réaliser des mesures de physico-chimie de la basse troposphère, de flux de gaz carbonique et d'émission de composés réactifs par la végétation, et de dynamique et bio-géo-chimie de l'océan de surface.

Le dispositif expérimental est adapté aux types de mesure recherché :

- Pour les profils verticaux : ballon captif à poste fixe à plusieurs centaines de mètres d'altitude, installé en site permanent sur de longues périodes ou de manière plus épisodique pendant des campagnes de terrain. Trois types de charges utiles sont envisagés : tubes fixes de prélèvements gazeux, plate-forme instrumentée arrimée sous le ballon ou plate-forme « ascenseur » le long d'un câble vertical.

- Pour les profils horizontaux : ballon tétraédrique dérivant en milieu marin à quelques dizaines de mètres d'altitude, et retenu par un guide flottant à la surface de l'eau et emportant de l'instrumentation marine et atmosphérique.

### **Sondages verticaux de l'atmosphère tropicale à partir de montgolfières stratosphériques (JP Duvel - LMD)**

Ce projet propose le développement d'un nouveau système de mesures in situ composé de drop-sondes (mesures de température, de pression, d'humidité, de vitesse et de direction des vents) dans les régions tropicales. Ces mesures sont destinées à documenter les processus de transport à l'origine de la variabilité de l'ensemble de la basse stratosphère et de la troposphère tropicale. Le programme de travail associé consiste principalement à adapter un système de drop-sondes existant à une montgolfière stratosphérique, et à mettre en place un centre de pilotage pour choisir la stratégie d'échantillonnage des largages des sondes le long de la trajectoire du ballon.

### **Etude de la basse stratosphère équatoriale par ballons pressurisés (B. Legras et F. Vial - LMD)**

Ce projet est une déclaration d'intention pour une campagne de ballons pressurisés (BP) en deux phases séparées d'un an (2005 et 2006). Le choix de ces dates, assez éloignées, résulte du calendrier des campagnes déjà planifiées (VORCORE en septembre 2004, HIBISCUS en février 2004), qui mobilisent les mêmes scientifiques et les mêmes personnels de la division « Ballons » du CNES. La proposition consiste donc à prendre date vis-à-vis du comité TAOB, en explicitant une stratégie scientifique et technique intéressante qui serait précisée par la constitution d'un groupe projet en 2002.

### **VOREEDGE (F. Vial - LMD)**

Le projet VOREEDGE découle du projet STRATEOLE dont l'étalement dans le temps a conduit à un découpage en deux phases : VORCORE, qui constitue une répétition à petite échelle en septembre 2003, et VOREEDGE, prévu en août 2006. Malgré cette échéance, le grand nombre d'aérostats à réaliser (de l'ordre d'une centaine) impose d'étaler le développement sur plusieurs années.

### **Etude des propriétés optiques et physiques des aérosols stratosphériques (J.-B. Renard - LPCE)**

La proposition concerne l'étude des aérosols dans la stratosphère (nature et taille pour les aérosols de fond), et ceux générés par les phénomènes naturels (volcans) ou anthropiques (suies, avions). Considérant que les instruments actuellement utilisés pour les mesures stratosphériques ne donnent que des indications partielles sur les propriétés des aérosols, il est suggéré de conduire des développements techniques permettant de combiner différentes techniques existantes pour améliorer la détermination des propriétés des aérosols. Sont notamment mentionnés un prélèvement de type compteur d'aérosols, le passage par plusieurs systèmes de détection (néphélomètre pour mesurer la fonction de phase de diffusion, couronne de cubes polarisants pour mesurer la polarisation). Par ailleurs, une nouvelle instrumentation basée sur un système d'imagerie permettrait de caractériser les particules non sphériques de taille supérieure au micron. Ce système pourrait être implanté sous ballon stratosphérique, sur avion ou être opéré à partir du sol.

### **Recherche des composés bromés dans la stratosphère nocturne (J.-B. Renard - LPCE)**

La proposition concerne la mesure des composés bromés, qui jouent un rôle fondamental dans la destruction de l'ozone polaire. De fortes incertitudes subsistent en particulier sur la chimie nocturne des bromes, notamment par la possible détection d'OBrO. Le constat actuel est qu'il n'existe pas de technique de mesure permettant de détecter des espèces comme BrONO<sub>2</sub> ou BrCl.



## ANNEXE 3 : EVALUATION DES MOYENS CONSACRES A L'ETUDE A L'OBSERVATION DE LA TERRE DEPUIS L'ESPACE DANS LES LABORATOIRES FRANÇAIS POUR L'ANNEE 2001

### 1) LISTE DES LABORATOIRES AYANT REPONDU AU QUESTIONNAIRE :

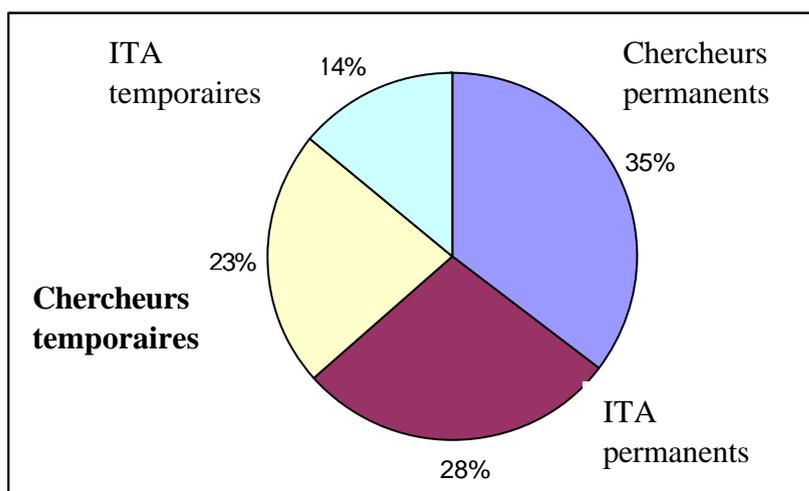
BRGM/Aménagement et Risques Naturels, CERFACS, CESBIO, CETP, Météo France/CNRM, GRGS, IFREMER/LPO + Ecologie côtière, IGN/LAREG+MATIS, INRA/Climat, Sol et Environnement, IPGP/Dpt Spatial, IPG Strasbourg, IPSL, IRD/Camélia, LA, LEGI/Modélisation écoulements océaniques, LEGOS, LGGE, LISA, LMD, LOA, LODYC, LPCE, LPMA, LPPM, LSCE, LTHE, Observatoire de Bordeaux/LAAA, Observatoire de Grenoble/Planétologie, Observatoire géodésique de la Polynésie Française, Observatoire de Villefranche/Géosciences Azur + LOV, ONERA, Observatoire de Clermont/LAMP+LMV, SA, SHOM (EPSHOM), Université de Bretagne Occidentale/Domaines océaniques, Université et ENS de Lyon/Sciences de la Terre.

### 2) TOTAL DES PERSONNELS CONSACRES A L'ETUDE ET A L'OBSERVATION DE LA TERRE DEPUIS L'ESPACE (CHERCHEURS ET ITA PERMANENTS ET TEMPORAIRES) :

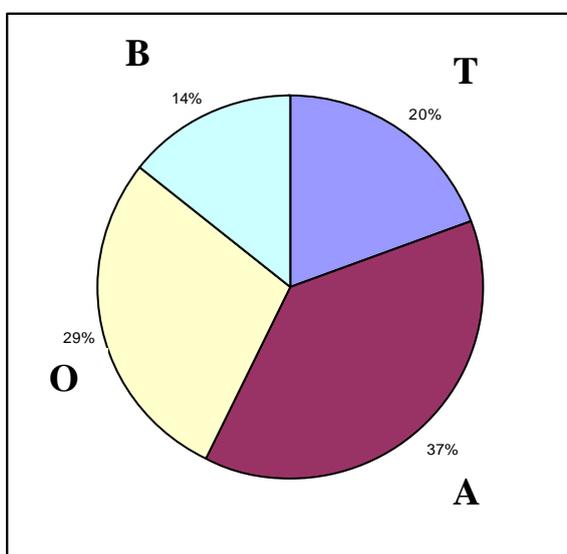
Total personnes concernées : 844

Total personnes équivalent temps plein : 467

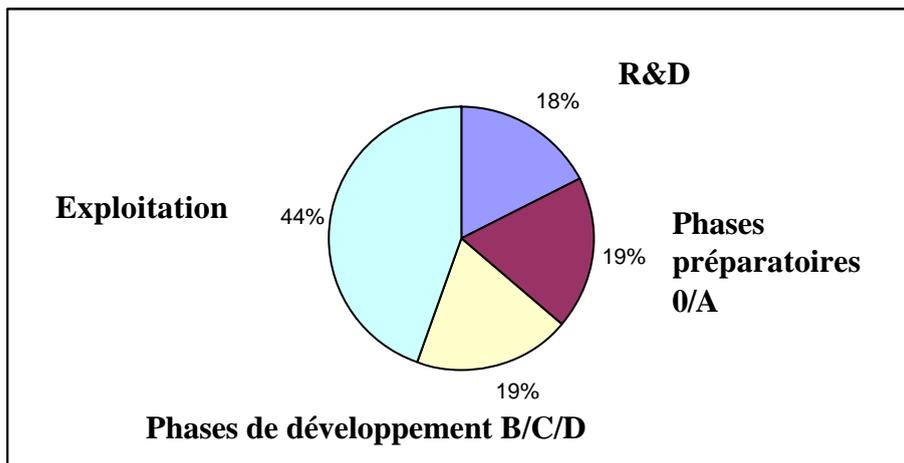
### 3) REPARTITION PAR TYPE DE POSTE DES PERSONNELS EQUIVALENT TEMPS PLEIN :



### 4) REPARTITION PAR THEMATIQUE DU COMITE TAOB :



## 5) REPARTITION PAR TYPE D'ACTIVITES :



# BRGM : PROPOSITION DE CONTRIBUTION A LA REFLEXION PROSPECTIVE SUR L'UTILISATION DES MOYENS SPATIAUX DANS NOS DOMAINES DE RECHERCHE

En ce qui concerne l'étude et l'observation de la Terre par des techniques spatiales, les principaux objectifs du BRGM sont d'améliorer par la voie satellitaire une capacité de métrologie de l'environnement en testant des méthodes de détection, de quantification et de suivi de paramètres physiques, minéralogiques ou chimiques. Les paramètres requis varient selon les domaines d'application (géologie d'exploration, géologie dynamique et risques naturels, hydrogéologie, environnement et aménagement, énergie). Ils ont été spécifiés dans divers documents TAOB ou PLEIADES. Les projets de recherche et développement conduits au BRGM sur ce thème s'efforcent de répondre à deux types de besoins :

- les besoins de connaissances sur les caractéristiques physiques, minéralogiques ou chimiques des milieux,
- les besoins de suivi de modifications brutales ou continues manifestées en surface, qui représentent des indicateurs pertinents pour diverses thématiques relevant de nos missions : risques naturels, ressources naturelles permanentes (minières) ou temporaires (hydrogéologie), impact d'activités anthropiques sur les milieux naturels (pollutions minières ou industrielles, sols contaminés, subsidence, érosion,...).

Dans cette dynamique, le BRGM participe à différentes instances qui contribuent à la réflexion prospective, à savoir le TAOB/CNES, - avec C.Carnec dans le groupe Terre Solide-, le PNTS (N.Baghdadi) et le groupe PME-Pleiades/CNES (C.King).

- 
- **Géologie d'exploration pour les énergies fossiles et les ressources minières:** l'accent est à mettre pour le moyen terme sur la maintenance d'outils d'imagerie de surface (Optique, SAR, MNT), avec si possible des améliorations pour atteindre:
    - *le relief* : le besoin en MNT précis est réaffirmé, y compris dans les zones fortement nébuleuses comme la ceinture tropicale où les potentialités minières sont importantes. Le concept de roue interférométrique est donc prometteur ;
    - *la minéralogie* : pour améliorer l'exploitation des signatures, les souhaits sont l'accès à des capteurs hyperspectraux à très haute résolution spectrale. L'échelle spatiale pourrait être de 20 m à 30 m, voire mieux ;
    - *la sub-surface* : il y a des exigences spectrales d'utilisation de SAR basse fréquence (bande P et/ou méthodes polarimétriques), pour espérer une détectabilité des structures en profondeur, supérieure à 50cm, allant idéalement pour des sols secs jusqu'à 8-10 mètres.
  - **Géologie dynamique et risques naturels** : qu'il s'agisse de séismes, d'éruptions volcaniques ou de mouvements de terrain au sens large ( mouvements de masse, coulées, subsidences..), les préoccupations ont été clairement développées par la communauté avec des besoins différents selon les interventions à conduire en prévention, prévision ou constat post-crise .
    - *La prévention* demande de privilégier une bonne qualité des MNT et une très bonne capacité à décomposer l'occupation du sol, mais sans répétitivité excessive.
    - *En prévision*, les attentes sont fortes pour améliorer les méthodes de prévision même si les pistes de recherche sont encore très prospectives : ainsi pour les séismes il faudrait privilégier, même si c'est pour un débouché long terme, la recherche d'indicateurs précoces voire précurseurs. Cela apparaît dans la dynamique instituée par le programme DEMETER et plus largement les programmes sur le «contenu électronique total dans l'ionosphère».
    - *Le constat post-crise* demande à privilégier la haute résolution optique et à favoriser la pérennité des observations dans ces modes.
    - Enfin en terme de *mesure*, et quelque soit le stade d'intervention destiné à réduire le risque, deux besoins restent à satisfaire pour améliorer la détection et l'estimation des déformations. Il s'agit du besoin en instruments pérennes d'interférométrie pour la constitution d'archives

cohérentes et les besoins de réduction des effets des artefacts. Sur ce point, on espère beaucoup des techniques d'observation multi-capteurs telles que déjà envisagées avec les instruments ENVISAT.

- **Ressources en eau et hydrogéologie**

- A long terme, la communauté laisse espérer des avancées sur l'estimation des composantes terrestres du cycle de l'eau par les méthodes de gravimétrie ou d'hyperfréquences passives, qui sont déjà engagées avec les missions GRACE, SMOS ...
- A court et moyen terme, il faut aussi se tourner vers des possibilités de couplage entre des informations satellitaires et des informations de sub-surface issues de métrologie géophysique (RMP) ou géochimique et donc nécessairement plus ponctuelles : pour favoriser la localisation et la quantification des ressources, voire le suivi de leur qualité. A ce titre, les méthodes de télétransmission de métrologie in situ nous semblent prometteuses et pourront être utiles à des programmes de calage et calibration de missions, telles celles citées précédemment.

- **Aménagement, environnement** : dans tous ces domaines et, en particulier, lorsque la pression anthropique s'exerce en milieux contraints (littoral, urbain), la très haute résolution spatiale ouvre des perspectives nouvelles qui vont se valoriser à court terme. Pour être prospectif :

- Le BRGM ayant un rôle actif dans les programmes d'érosion et d'aménagement côtier, nous insistons sur les enjeux de la bathymétrie en domaine littoral. Les besoins en capteurs superspectraux dans le Visible et le Proche Infrarouge, ainsi que le Thermique, ressortent également des travaux de la Communauté scientifique internationale.
- Les besoins en milieu urbain sont d'évaluer les conséquences de cette pression sur le milieu géologique (stabilité des terrains, imperméabilisation des surfaces, pollutions des sols et des eaux...) ; s'y concentrent donc les besoins de haute résolution optique, de MNT fins, de signatures hyperspectrales et thermiques, de capacités interférométriques exprimés par les autres rubriques.
- Dans le même esprit, le développement croissant des études de suivi des sols contaminés et des pollutions d'origine minière ou industrielle nécessite de plus des outils d'identification et de cartographie, si possible quantitative, des perturbations physiques, minéralogiques et/ou chimiques de surface. Ceci pourrait progresser avec des capteurs hyperspectraux et/ou thermique.

- **Energie** :

- Enfin, dans la mise en œuvre des savoir-faire industriels de la filière énergétique (exploration, exploitation, impact environnemental), le BRGM focalise ses efforts dans le domaine de l'ingénierie des réservoirs. Des besoins nouveaux peuvent apparaître, en particulier pour la géothermie et la séquestration géologique de CO<sub>2</sub>, où les techniques spatiales peuvent apporter un concours précieux, la surveillance des sites sur le long terme.

## **CEA : POSITION DANS LE CADRE DE LA PROSPECTIVE SCIENTIFIQUE DU CNES POUR LE DOMAINE DE L'ETUDE ET L'OBSERVATION DE LA TERRE.**

Dans le domaine de l'étude du climat le CEA poursuit avec le Laboratoire des Sciences de l'Environnement (LSCE) une activité orientée vers l'étude de la variabilité des systèmes climatiques et l'impact des activités humaines.

Les priorités du CEA concernent l'étude de l'influence des activités humaines sur l'environnement global. Il s'agit de mesurer l'étendue, l'impact et le devenir de la perturbation de l'environnement par l'homme, ce qui nécessite la connaissance du cycle du carbone (CO<sub>2</sub> inclus) et des gaz à effet de serre, de manière à les intégrer dans des modèles pronostiques globaux.

La compréhension du rôle et des processus mettant en jeu dans l'atmosphère des composés réactifs ou à impact climatique (CO<sub>2</sub> et aérosols) nécessite l'accès à des moyens d'observation globaux tels que les satellites. Le CEA souhaite que le LSCE puisse avoir accès aux données issues du satellite POLDER et du microsattellite PARASOL et plus généralement à tout instrument embarqué à venir permettant des mesures sur le CO<sub>2</sub> atmosphérique à haute résolution, tel que le projet OCO de la NASA ou une éventuelle micro-mission dédiée.

Le CEA souhaite également jouer son rôle dans la mise en place, la certification et l'exploitation des réseaux de suivi des gaz à effet de serre et le développement de nouveaux outils de mesure, notamment satellitaires.

Dans le domaine de l'étude du cycle du carbone dans l'océan, et plus particulièrement celui de la biogéochimie marine, le CEA est demandeur de mesures de la température de surface de la mer, de la réflectance spectrale océanique, de mesures de la couleur de la mer dans des conditions de meilleures performances spectrales et en résolution.

Dans le but d'améliorer la connaissance de l'environnement spatial de la terre (couplage atmosphère ionosphère magnétosphère), le CEA a entrepris l'étude des Sprites, phénomène récemment découvert au-dessus des orages.

Avec d'autres laboratoires français et internationaux, le CEA participe au projet de microsattellite à caractère scientifique TARANIS, sélectionné par le Comité des Programmes Scientifiques du CNES. Le concept de mesure de TARANIS a été validé par les observations menées en octobre 2001 et mai 2002 à partir de la station spatiale internationale (expérience LSO). Les réunions du séminaire de pré-prospective du CNES des 13 et 14 septembre ont montré que TARANIS est pris en considération dans le programme du groupe « études et exploration de l'Univers » pour lequel l'étude du couplage atmosphère ionosphère est une thématique nouvelle.

Pour répondre à ses missions dans le domaine de la surveillance du traité d'interdiction complète des essais nucléaires, le CEA (DAM/DASE) a développé des compétences pour le traitement des données de télédétection spatiale (optique et radar) et continuera à participer aux travaux du CCT (Centre de Compétence Technique) "traitement du signal et des images".



# **CIRAD : BESOINS DANS LE DOMAINE DE L'ETUDE ET DE L'OBSERVATION DE LA TERRE**

Michel Griffon

A partir de l'offre technique que représente le document de prospective du Comité TAOB, nous avons identifié quatre domaines d'intérêt pour les besoins du CIRAD.

1. La connaissance du cycle de l'eau à l'échelle de grands bassins versants de manière à mieux évaluer les effets sur la circulation superficielle du couvert végétal, en particulier dans les zones agricoles où les techniques culturales peuvent jouer un rôle important.
2. La connaissance des processus de désertification à l'échelle régionale et la mesure des phénomènes afin de mieux définir des stratégies d'intervention. La mesure de l'humidité de surface, l'estimation de la quantité d'eau dans les sols, la structure tri-dimensionnelle de la végétation, et la caractérisation d'écosystèmes seront d'un grand intérêt.
3. L'analyse et la mesure du bilan carboné d'écosystèmes locaux, en particulier la dynamique du carbone en vue d'accroître les capacités de séquestration et de stockage dans les sols et la biomasse ligneuse. Ces analyses combineront des données satellitaires et des données in-situ. La première application serait pour l'évaluation du carbone des sols forestiers des régions tropicales.

A plus long terme, le suivi de l'évolution de manière intégrée des principaux cycles bio-géochimiques dans des régions données en focalisant sur l'eau, le carbone, l'azote en fusionnant des données in-situ et satellitaires.



## IFREMER : AVIS SUR LA PROSPECTIVE CNES

Jean-François MINSTER  
Président Directeur Général

Monsieur le Directeur Général adjoint Scientifique,

Nous avons pris connaissance avec intérêt du document de prospective élaboré par le groupe de travail Terre – Atmosphère – Océan – Biosphère pour le domaine de l'Etude et de l'Observation de la Terre. Ce document rencontre plusieurs problématiques centrales pour l'Ifremer, et nous apprécions votre démarche visant à ce que la programmation à moyen terme qui sera retenue par le CNES dans ce domaine tienne le meilleur compte des besoins des organismes de vocation tels que notre Institut.

Comme vous le savez, les missions de l'Ifremer sont de connaître, évaluer, prévoir l'évolution des ressources des océans et permettre leur exploitation durable, d'améliorer les méthodes de surveillance, de prévision d'évolution, de protection et de mise en valeur du milieu marin et côtier, et de favoriser le développement socio-économique du monde maritime. Aussi, l'Ifremer conduit des activités de recherche, d'expertise d'intérêt public (surveillance de l'environnement littoral et contrôle de la qualité des produits de la mer), de mise à disposition de moyens (flotte océanographique et développement technologique), de transfert vers les entreprises et de valorisation de ses activités. C'est au regard de ces missions que nous exprimons les appréciations qui suivent.

Nous avons apprécié la qualité du document, séparant questions scientifiques, stratégies et observables, d'une part, et applications opérationnelles, d'autre part, ainsi que l'effort de hiérarchisation des priorités qui en résultent, même si le lien entre les différentes parties du document n'est pas toujours immédiat.

L'époque actuelle est celle du passage à ce que l'on a appelé l'océanographie opérationnelle, qui comporte plusieurs maillons dont chacun implique la coordination consciente des efforts de plusieurs organismes. L'observation spatiale en est un, et nous ne pouvons que nous féliciter de la politique suivie en ce domaine par le CNES, avec des programmes en coopération bilatérale comme Topex/Poséidon et Jason-1, et des programmes en coopération multilatérale comme ERS et ENVISAT. L'Ifremer est partie prenante de la démarche visant à assurer la pérennisation de l'altimétrie satellite et de son transfert progressif vers les entités opérationnelles concernées, avec en Europe l'implication de EUMETSAT dans Jason-2. Nous sommes aussi partie prenante des autres efforts relatifs à l'observation *in situ* (l'Ifremer est leader avec le SHOM du projet Coriolis, dont le centre de données est opérationnel et les flotteurs sont en cours de déploiement), et à la modélisation numérique (avec la mise en place du GIP MERCATOR OCEAN et la production opérationnelle depuis janvier 2001 de prévision de l'état tridimensionnel de l'océan). Le programme Jason-2 et sa continuité temporelle avec Jason-1 constituent donc notre première priorité. Il est néanmoins essentiel que la poursuite de ce programme ménage la place nécessaire à des développements technologiques nouveaux.

L'observation spatiale de paramètres océaniques a démontré sa puissance, et nous attachons une grande importance à la poursuite des efforts de R&D permettant d'étendre les bénéfices de l'observation globale par satellite à d'autres paramètres de surface comme la salinité. Le projet SMOS, en phase B, est à la fois une première scientifique et un pas en avant d'une importance considérable pour le futur de l'océanographie opérationnelle. La mesure du champ de salinité pourrait dans l'avenir se substituer à d'autres observations spatiales, et apporter une contrainte suffisante à l'estimation des flux nets d'eau entre l'océan et l'atmosphère et aux modèles numériques de circulation océanique. Pour sa part, l'Institut vient de recruter un chercheur spécialement affecté aux études préparant l'utilisation de SMOS et cofinance avec le CNES un boursier sur la télédétection de la salinité, qui constitue l'axe de développement des travaux de notre Laboratoire d'Océanographie Spatiale (dont les travaux concernaient surtout jusqu'ici le vent de surface et les glaces de mer). La poursuite dans le calendrier initial du programme SMOS est donc notre deuxième priorité.

D'autres projets importants, comme ALTIKA ou SWIMSAT, sont porteurs de progrès, sans toutefois revêtir le même degré de priorité pour l'Institut.

En revanche, l'action du CNES pour assurer la prise en compte d'un programme d'observation opérationnelle de l'océan dans le cadre de l'Agence Spatiale Européenne (programme «Ocean Watch») est

nous semble indispensable et urgente, afin que les développements entrepris précédemment avec ERS et ENVISAT (température de surface de la mer, couleur de l'eau, altimétrie en orbite polaire) soient poursuivis et rationalisés en liaison étroite avec les besoins des utilisateurs (EUMETSAT, agences nationales, secteur privé). L'accès en temps peu différé aux informations combinées des courants océaniques, de la température de la surface de la mer et de la concentration de pigments ou de l'étendue des glaces de mer déduites des données des satellites opérationnels, jointes aux prévisions météorologiques, constitue en effet une aide précieuse à la conduite des recherches océanographiques aussi bien qu'aux activités économiques en domaine maritime.

Les projets mentionnés dans les paragraphes précédents concernent essentiellement l'océan du large. Le domaine côtier est non moins important en ce qui concerne l'Ifremer, au regard de ses missions de surveillance et d'expertise. L'outil spatial n'a pas apporté de moyen convaincant d'assurer ces missions dans des conditions de pertinence spatiale et temporelle satisfaisantes. L'observation optique à haute résolution ou à très haute résolution permise par les systèmes commerciaux existants ou en projet ne se présente vis-à-vis de nos besoins ni comme un outil de recherche adapté, ni comme un instrument d'utilisation opérationnelle concurrentiel des moyens au sol ou aéroportés. La surveillance des pollutions par satellite défilant, la détection par imagerie UV des efflorescences d'algues microscopiques toxiques, la bathymétrie côtière par lidar, sont autant d'activités qui relèvent de la R&D et ne semblent pas pouvoir répondre au besoin d'alerte à très brève échéance : par exemple, on rappellera que le seuil d'alerte, en concentration, pour l'algue toxique dinophysis est de 100 cellules par litre, donc invisible par satellite. En revanche, une mission en orbite géosynchrone d'observation à large bande et haute résolution serait la seule à même, par la répétitivité qu'elle offrirait, de répondre aux spécifications du besoin côtier et aux besoins de surveillance des risques de façon plus générale. L'Ifremer est prêt à apporter son concours aux choix de R&D et d'avant-projet à long terme sur ce sujet.

Je vous prie de croire, Monsieur le Directeur général adjoint scientifique, à l'expression de mes sentiments distingués.

# INRA : CONTRIBUTION A LA PROSPECTIVE SCIENTIFIQUE DU CNES

F. Baret & B. Seguin

L'INRA a pour vocation de conduire des recherches à la fois pour l'avancement des connaissances, mais aussi pour répondre à la demande sociétale dans les domaines, de l'agriculture, l'alimentation et l'environnement. Pour l'INRA, il est donc difficile de séparer nettement la recherche purement scientifique de la recherche applicative. L'INRA se situe en amont des applications et collabore à leur développement et à leur mise en œuvre.

La spécificité de l'observation spatiale pour les thématiques de recherche de l'INRA est liée à sa capacité à décrire des entités d'espace allant de la parcelle agricole à la région en répondant ainsi à la nécessité de renseigner l'hétérogénéité spatiale des paysages extrêmement forte en régions agricoles. La dynamique de la végétation et des sols, accessible par l'observation spatiale, véhicule également des informations spécifiques sur le fonctionnement des systèmes naturels ou cultivés, et ceci pour des échelles de temps allant de l'heure à la saison de végétation, voire sur de longues séries pluriannuelles.

La « télédétection » constitue donc bien un outil essentiel pour un certain nombre de thèmes de recherches et d'applications qui sont brièvement listés ci-dessous :

1. Aide à la conduite des cultures, choix des cultures, traçabilité, suivi des pratiques agricoles
2. Evaluation des récoltes, des impacts de stress divers (sécheresse, inondation, maladies, ...)
3. Gestion de la ressource forestière
4. Impact des pratiques agricoles sur l'environnement : pollutions (nitrates, pesticides, OGM, ...),
5. aménagement du paysage (hydrologie, érosion, ressource cynégétique, biodiversité, qualité esthétique du paysage, effet sur le climat local, ...)
6. Identification et délimitation de terroirs, typicité des produits, épidémiologie (identification et organisation de niches potentielles de pathogènes ou de leurs vecteurs)
7. Cartographie des sols
8. Hydrologie, gestion de la ressource en eau
9. Description des cycles biogéochimiques (principalement carbone et azote) aux échelles parcellaire et régionale.

Avant d'aborder ces différents thèmes de recherche, l'INRA a principalement investi dans le développement méthodologique nécessaire à l'interprétation des signaux de télédétection. C'est ainsi que l'INRA a participé et participe encore à la définition d'un certain nombre de missions. Cette activité méthodologique est arrivée à un certain état de maturité, et les programmes de recherches directement liés à l'observation spatiale se tournent maintenant vers la mise en œuvre des méthodes développées. C'est ainsi que l'INRA participe activement au développement de produits de niveau élevé pour les capteurs à large champ dans le cadre de l'initiative GEOLAND.

La liste des principaux thèmes ayant recours à l'observation spatiale peut se décliner de manière plus précise en termes d'observables et des caractéristiques des capteurs:

- **Occupation du sol (3, 4, 5, 7, 8, 9).** Les capteurs actuels, en particulier la série SPOT fournit une bonne réponse à ce besoin. L'amélioration de la résolution spatiale serait intéressante pour les zones, relativement nombreuses en Europe, à parcellaire de petite taille. La capacité du système à imager à la demande avec une bonne probabilité de succès est particulièrement appréciée. Il serait intéressant d'étendre les observations à l'infrarouge thermique pour les thématiques « terroirs » (6), ainsi que dans l'infrarouge moyen avec une richesse spectrale suffisante pour la cartographie des sols (7).
- **Description des peuplements arborés (1, 2, 3, 5).** La très haute résolution spatiale est attendue pour permettre une description individuelle des arbres (taille des couronnes, densité de peuplement) en forêt, mais aussi pour les vergers et les vignobles. L'utilisation de lidars ou de l'interférométrie apporterait sans doute des informations pertinentes (encore à évaluer) sur la distribution verticale de la végétation.

- **Fonctionnement de la végétation et des sols (1, 2, 3, 4, 8, 9).** C'est certainement le domaine où l'INRA a le plus investi. Les échelles spatiales vont de l'intérieur de la parcelle à la région. La composante temporelle est essentielle, avec idéalement une répétitivité effective (après filtrage des nuages pour le domaine optique) de l'ordre de quelques jours (bilan hydrique par exemple) à la décennie (nécessaire pour l'aide à la décision à des stades de développement précis, mais aussi à cause de la forte dynamique de la structure et de la chlorophylle observée à certaines périodes). Les approches développées sont basées sur l'utilisation de modèles de fonctionnement de la surface, soit par forçage, soit par assimilation des données satellitaires pouvant provenir de différents types de capteurs.

Le besoin est maintenant relativement bien couvert pour la moyenne et basse résolution spatiale dans le domaine solaire (VEGETATION, MERIS, MODIS, MISR, MSG, POLDER) pouvant être utilisée pour les bilans à l'échelle régionale. Dans le domaine des hyperfréquences, le capteur SMOS pour lequel l'INRA est fortement engagé devrait apporter une bonne caractérisation du fonctionnement hydrique à des échelles larges. Toutefois, le besoin le plus pressant et non satisfait pour le moment correspond à la disponibilité d'observations fréquentes à haute résolution spatiale dans le domaine solaire avec une richesse spectrale suffisante permettant de réaliser des corrections atmosphériques autonomes et d'estimer les variables de structure du couvert (indice foliaire principalement) et de contenu en chlorophylle, éventuellement de contenu en eau. Outre les applications directes pour l'aide à la décision dans le cadre de l'agriculture raisonnée ou de précision, ces observations doivent permettre l'étude détaillée des processus. Pour cette raison, l'INRA soutient fortement les projets de missions telles que RHEA, la composante super-spectrale de PLEIADES, et SPECTRA de l'ASE. L'extension au domaine thermique comme proposé dans la mission SPECTRA, et au domaine des hyperfréquences permettrait d'accéder plus directement à la description du bilan hydrique. Enfin, l'observation de la fluorescence des végétaux nous semble devoir être une voie originale qui mérite d'être explorée plus à fond pour avoir accès plus directement à l'activité photosynthétique.

En marge de cette description des besoins de l'INRA en terme d'observations, il faut souligner plusieurs aspects relatifs à la disponibilité des données qui devrait permettre une plus large utilisation des observations spatiales par la communauté scientifique:

- Les images doivent pouvoir être utilisées par des chercheurs qui n'ont pas toujours les compétences nécessaires ni de temps à investir dans les phases préliminaires de traitement. Il est donc essentiel que des efforts soient réalisés pour hisser les produits actuels de niveau relativement bas, vers des produits biophysiques qui puissent être directement utilisés par une large gamme de chercheurs non spécialistes en télédétection. L'initiative GEOLAND apparaît tout à fait pertinente et devrait sans doute être étendue à d'autres capteurs que les capteurs optiques à grand champ initialement concernés,
- Il est apparu quelquefois des lacunes sur la documentation associée aux images, et il est important que les caractéristiques et traitements des images soient facilement disponibles et constamment mises à jour.

Enfin, il est important de conserver un prix des images compatible avec les budgets actuels de recherche. Ceci est d'autant plus vrai pour nos axes de recherches qui sont gourmands de séries temporelles. L'expérience ISIS pour les images SPOT s'avère d'un grand intérêt. La nouvelle politique des données de VEGETATION est très appréciée.

## INSUE DU CNRS : POSITIONNEMENT SUR LA PROSPECTIVE TAOB DU CNES

L'exercice de prospective auquel s'est livré le groupe «Terre-Atmosphère-Océan-Biosphère » du Centre National d'Etudes Spatiales va dans un sens tout à fait pertinent pour l'amélioration de notre compréhension du système Terre , et l'Institut National des Sciences de l'Univers ne peut que soutenir fortement les priorités qu'il a identifiées pour les différents domaines dans les années à venir.

L'observation spatiale est devenue un complément indispensable aux mesures in situ (depuis la surface ou par avion instrumenté) et à la modélisation numérique pour les recherches dans les domaines de la Terre profonde, des surfaces continentales, de l'océan, de l'atmosphère. Dans ce contexte, l'utilisation optimum des données satellitaires pour la recherche nécessite une adéquation entre les caractéristiques des processus étudiés, les paramètres mesurés, la résolution spatio-temporelle, la durée des observations. Aussi, l'adaptation des missions aux besoins affichés par la communauté, au terme de réflexions sur les défauts de compréhension ou les déficiences du réseau observationnel par rapport aux processus moteurs du système Terre, est la condition sine qua non de rationalité des investissements. Dans ce cadre, il est indispensable de disposer simultanément de filières dédiées d'une part à la pérennisation d'observations spatiales ayant une vocation opérationnelle (par exemple, l'altimétrie et la diffusiométrie), d'autre part aux réponses à des questions scientifiques précises. L'évolution vers des missions plus spécifiques sur des plateformes plus légères, mini- ou micro-satellites, est particulièrement à encourager, afin d'accroître les possibilités de réponse à des demandes diverses. La coopération internationale est aussi à encourager afin d'ouvrir des opportunités plus difficilement accessibles au seul niveau français.

En ce qui concerne les thématiques prioritaires, les choix affichés par le groupe « Terre-Atmosphère-Océan-Biosphère » du Centre National d'Etudes Spatiales paraissent tout à fait justifiés. Il faut distinguer les missions décidées, celles qui sont en cours de préparation, celles qui n'ont pas encore fait l'objet d'une décision et celles qui pourraient éventuellement entrer dans le cadre du projet PLEIADES :

### **MISSIONS DECIDEES :**

- microsatellite PICARD : pour l'étude de la variabilité du flux d'énergie en provenance du Soleil
- microsatellite DEMETER : La surveillance de l'activité sismique, avec un possible objectif opérationnel à terme, passe par un suivi extrêmement précis des mouvements de l'écorce terrestre. A cette fin, l'identification dans les perturbations électromagnétiques ionosphériques des ondes atmosphériques induites par les mouvements sismiques paraît très prometteuse.
- mini-satellite franco-américain CALIPSO et microsatellite PARASOL : les nuages jouent un rôle important dans le bilan énergétique de la Terre par leur impact radiatif, mais la quantification de cet effet est encore sujet à de larges incertitudes. Pour les résoudre, il est nécessaire d'observer de façon globale leurs caractéristiques détaillées (répartition, saisonnalité, structure horizontale, épaisseur, altitude, phase, distribution dimensionnelle) et de préciser les liens avec les aérosols (en précisant leur distribution horizontale et verticale, leur efficacité pour l'activation de la condensation en phase liquide ou glace, leur distribution dimensionnelle). Seule une combinaison d'observations par des radiomètres en visible et en infrarouge, avec polarisation et directionnalité, par lidar et radar permettra d'accéder à ces informations. Au-delà de l'«AQUA-train » auquel participeront le mini-satellite franco-américain CALIPSO et le micro-satellite français PARASOL, il faut envisager la pérennité de l'observation spatiale des nuages, notamment dans le cadre du projet européen Earth Care, tout en veillant à ne pas affecter les autres domaines d'étude par des missions lourdes.

*La communauté scientifique française est largement impliquée dans la réalisation de ces missions. Compte-tenu de l'importance des résultats attendus, l'exploitation des mesures qui seront acquises sera une des priorités des années futures.*

## **MISSIONS EN COURS DE PREPARATION :**

- microsatellite AMPERE (éventuellement dans le cadre de la constellation européenne SWARM) :  
La mesure précise du champ magnétique terrestre devrait donner accès aux structures en profondeur du manteau, avec des applications possibles pour la prévention des risques (séismes, tsunamis, éruptions volcaniques), et à la dynamique complexe du noyau actuellement très mal connue. L'inclusion de l'instrumentation AMPERE dans le cadre de la constellation SWARM, si celle-ci est retenue par l'ESA et si cela s'avère techniquement possible, est une option à étudier sérieusement. A défaut, il convient de soutenir le projet de microsatellite.
- participation au projet européen SMOS : Ce projet répond à deux objectifs :
  - Pour améliorer la connaissance des écosystèmes, il est indispensable de mesurer effectivement et globalement l'humidité du sol, actuellement déduite de façon diagnostique. Même si la radiométrie interférométrique en bande L ne permet pas d'accéder à l'humidité des premiers mètres, l'information de surface qui pourra être obtenue présente un très fort intérêt. A terme, une mesure active par radar en bande L devrait être envisagée afin de fournir des informations mieux adaptées aux besoins de l'hydrologie des sols.
  - La salinité de la surface océanique est un paramètre aussi important que la température pour caractériser l'état de l'océan et sa dynamique, mais il n'est pas pour l'instant accessible à l'observation spatiale. La mesure par radiométrie interférométrique en bande L est très prometteuse, avec un impact potentiellement fort sur la représentation numérique des processus et leur prévision (notamment opérationnelle) par l'assimilation des données.
- JASON-2 et microsatellite ALTIKA : l'altimétrie spatiale est devenue, avec les observations in situ, un élément irremplaçable pour l'océanographie. Les applications opérationnelles impliquent de sécuriser une filière assurant la présence simultanée en orbite de deux altimètres (l'un de précision moyenne avec une courte répétitivité, l'autre de haute précision). Il est donc crucial de prévoir dès maintenant la succession de la mission JASON-1, vraisemblablement dans la lignée de la coopération franco-américaine initiée avec TOPEX-POSEIDON et en relation avec l'évolution d'EUMETSAT. De plus, l'observation des phénomènes de moyenne échelle apparaît de plus en plus nécessaire, notamment pour mieux prendre en compte le rôle des tourbillons dans le déplacement et la diffusion des masses d'eau ainsi que les flux associés de chaleur et de quantité de mouvement. L'altimétrie en bande Ka, concept du projet ALTIKA, ou l'altimétrie à synthèse d'ouverture sont de possibles voies d'accès qu'il faut explorer. En outre, les applications possibles à l'océanographie côtière, avec de fortes retombées potentielles, justifient ces développements.
- mini-satellite franco-indien MEGHA-TROPIQUES et microsatellite ORAGES : Les systèmes précipitants sont une composante cruciale de l'environnement, notamment dans les régions tropicales, par la libération de chaleur latente associée à la condensation, par le contrôle des ressources en eau et par l'association avec des phénomènes potentiellement dangereux comme les tempêtes, les orages et les cyclones. Mais la mesure par télédétection spatiale, la seule à permettre un suivi global, ne donne qu'une estimation indirecte et partielle. Aussi, ce n'est que par une combinaison de mesures par radiométrie infrarouge et micro-ondes, radar multifréquences, détection de l'activité électrique, qu'il sera possible de déterminer avec une précision suffisante la répartition et l'intensité des précipitations. MEGHA-TROPIQUES se place naturellement dans le cadre du programme international GPM (Global Precipitation Mission), initialement nippo-américain avec une contribution européenne sans doute importante. Cependant, le ciblage de MEGHA-TROPIQUES et d'ORAGES sur les régions tropicales est particulièrement pertinent, compte-tenu des acquis des travaux passés et des interrogations sur l'évolution, et mérite d'être fortement soutenu.

*Ces missions correspondent clairement à de fortes priorités de la communauté scientifique française, avec de plus des applications opérationnelles certaines (JASON-2, ALTIKA, SMOS) ou probables (MEGHA-TROPIQUES). Il est donc indispensable de poursuivre les développements engagés et d'aboutir à des décisions fermes dans des délais raisonnables.*

## **MISSIONS POUVANT ENTRER DANS LE CADRE « PLEIADES » :**

- constellation de microsatellites SVO: La surveillance de l'activité sismique est une préoccupation importante, mais la détection de l'activité volcanique reste difficile depuis le sol et ne peut être conduite qu'en un nombre limité de lieux. L'observation spatiale est potentiellement prometteuse par la couverture globale, mais elle doit nécessairement respecter les conditions de haute résolution horizontale (<10 m) et verticale (<1 cm), d'intervalle de revisite (de l'ordre de la semaine en mode de surveillance, plusieurs fois par jour en mode d'alerte), et de visibilité tout temps. Il n'est pas assuré que la mission PLEIADES, à laquelle il a été proposé que SVO se rattache, réponde à ces contraintes impératives.
- instrument RHEA à haute résolution spectrale et spatiale (microsatellite ou sur la constellation PLEIADES) et participation au projet européen SPECTRA-PRISM: La caractérisation des écosystèmes nécessite de mesurer l'albédo et l'indice foliaire, ainsi que la nature, la température et l'humidité du sol, avec des résolutions métrique et journalière. Des mesures spatiales à haute résolution spectrale, spatiale et temporelle permettraient de suivre le fonctionnement de la végétation, l'occupation des sols et l'aménagement du territoire. La participation au projet européen SPECTRA-PRISM semble très prometteuse en raison de la richesse spectrale des instruments envisagés.

*L'opportunité de réalisation de ces missions importantes dans le contexte PLEIADES doit être étudiée avec soin. Les contraintes instrumentales et orbitographiques sont à prendre en compte afin que les observations qui seraient effectuées puissent répondre aux objectifs scientifiques affichés.*

## **MISSIONS NON DECIDEES :**

- participation au projet européen SWIMSAT: L'état de la mer est une caractéristique relativement mal observée de la surface océanique, qui conditionne cependant les flux à l'interface avec l'atmosphère mais aussi module la réponse radiométrique à la température et au vent de surface. L'altimétrie donne accès à une hauteur significative des vagues, le radar à synthèse d'ouverture fournit une description partielle du spectre de vague, seul un radar à ouverture réelle permettra une mesure complète.
- microsatellite TROC et participation au projet européen GEOTROPE: Les constituants minoritaires de l'atmosphère ont un impact considérable en raison d'une part de leur contribution à l'effet de serre, d'autre part du contrôle des épisodes de pollution. Des mesures sont actuellement conduites depuis l'espace, mais la variété des espèces observées et la précision spatiale, temporelle et quantitative ne sont pas suffisantes pour déterminer la distribution et l'évolution des sources naturelles et anthropiques, les transports horizontaux et verticaux, l'influence sur l'évolution du climat, ni pour alimenter les modèles numériques de suivi et de prévision de la qualité de l'air. Pour répondre à ces objectifs, il faut améliorer les précisions spectrale, temporelle et spatiale, vraisemblablement dans le cadre d'une combinaison de satellites en orbites basse et géostationnaire.

Le soutien aux activités de recherche et de développement est également important afin de préparer des missions futures qui pourraient permettre de mesurer depuis l'espace des paramètres importants mais actuellement inaccessibles. Ainsi, les projets européens AEOLUS pour la mesure du vent, et WALES pour l'humidité atmosphérique sont à suivre avec attention. D'autres domaines prioritaires pour ces études concernent l'océan côtier, les eaux continentales, la topographie à haute résolution spatiale et temporelle, la structure tridimensionnelle et l'état phytosanitaire de la végétation. Dans ce cadre, les combinaisons novatrices radar-lidar-radiomètre paraissent tout à fait prometteuses.

Il est important de souligner à nouveau qu'à côté des missions opérationnelles, des possibilités doivent exister pour tester l'observation de nouveaux paramètres, valider des approches instrumentales originales, ouvrir l'observation spatiale à de nouvelles thématiques. C'est le moyen d'assurer aux équipes françaises la maîtrise de développements techniques et de méthodes d'analyse au meilleur niveau mondial. C'est

dans ce cadre que peut s'élaborer des réponses pertinentes au défi de la compréhension et de la surveillance de notre environnement et de son évolution.

# METEO-FRANCE : PREPARATION DU SEMINAIRE DE PROSPECTIVE DU CNES

## 1-. INTRODUCTION

Météo-France est un utilisateur opérationnel de données spatiales, qui interviennent pratiquement dans tous ses produits élaborés, soit dans le cadre d'une utilisation directe par les prévisionnistes, soit pour déterminer des conditions initiales des modèles numériques de prévision du temps ; soit encore pour la validation des mêmes modèles. Ces données sont essentielles pour les missions visant à assurer la sécurité des personnes et des biens (cyclogénèses intenses, orages sévères, inondations, cyclones outre-mer, ...). Elles sont également précieuses pour la confection de nombreux produits distribués au public. Pour ses activités, et sans prétendre être exhaustif, Météo-France a besoin de données satellitaires dans trois milieux :

- dans l'atmosphère, en particulier des informations de vent, de température, d'humidité, d'occurrence et de type de nuages, de précipitations, d'aérosols, d'ozone et autres gaz trace ;
- sur mer, concernant le vent, la température de la mer, les vagues, les flux radiatifs, les flux de vapeur d'eau, les courants ;
- sur terre, avec la température, la végétation, l'humidité du sol, les flux radiatifs.

Les deux sources principales et complémentaires de données opérationnelles ont été historiquement les satellites défilants en orbite polaire NOAA des Etats-Unis, et les satellites européens Météosat. Météo - France utilise également les données des satellites européens ERS1 et 2, dotés d'instruments particulièrement utiles pour la prévision marine. La succession du programme Météosat actuel est assurée par le programme Météosat Seconde Génération (MSG), qui s'étendra de 2002 à 2014, MSG-1 ayant été lancé avec succès le 28 août 2002. Par ailleurs, l'Europe a lancé le programme EPS/METOP, dans lequel le CNES est fortement engagé tant dans le programme de développement à l'ESA que sur IASI, qui devrait assurer des observations depuis l'orbite polaire de 2005 à 2019. Au delà de ces programmes, la réflexion est déjà en cours dans le cadre d'EUMETSAT sur les besoins futurs post MSG. Elle couvre aussi, l'expression des besoins des usagers pour la suite de METOP en relation avec le programme américain NPOESS.

En parallèle, Météo-France et plus particulièrement le Centre National de Recherches Météorologiques participe à la définition et l'exploitation des satellites de recherche et développement qui souvent peuvent préfigurer de futures missions opérationnelles. Par conséquent, Météo-France a souhaité s'impliquer dans l'effort de réflexion du séminaire de prospective scientifique du CNES. Cette note a pour objet de décrire les besoins et attentes de Météo-France dans ce contexte.

## 2 – LES SATELLITES METEO OPERATIONNELS ET LEUR DEVENIR

### MSG

Le programme MSG va constituer dès 2002 une évolution très significative par rapport à Météosat en particulier grâce à l'instrument SEVERI (résolution spatiale et temporelle doublées, passage de 3 à 12 canaux). C'est à cette occasion qu'ont été développés les SAF pour Satellite Applications Facilities, centres de traitement et de développements de produits élaborés issues principalement des satellites exploités par EUMETSAT.

La suite du programme MSG, qui se termine en principe en 2014 avec MSG-3, devrait comprendre un MSG-4 de transition puis pourrait vers 2015 évoluer vers un système plus performant (Météosat 3eme génération), avec des instruments supplémentaires ayant des capacités de sondage et/ou tout temps. Une première réflexion est en cours dans le cadre d'EUMETSAT pour définir les besoins précis, mais elle ne devrait pouvoir réellement déboucher que quand nous aurons un retour d'expérience suffisant sur MSG.

## EPS/METOP

Avec le programme EPS/METOP, l'Europe prendra en charge, à partir de 2005, le satellite polaire du matin (9h30) à la place de la NOAA. Indépendamment de l'étape importante qui constituera l'arrivée de l'Europe sur le créneau de l'observation météorologique polaire, EPS/METOP doit marquer une évolution capitale dans le domaine du sondage atmosphérique grâce à l'instrument IASI dont l'approvisionnement est délégué au CNES. La surveillance opérationnelle de la chimie atmosphérique (ozone) par GOME-2 sera assurée et pérennisée.

La question des instruments US de METOP-3 (échéance 2014) reste encore ouverte, que ce soit pour AVHRR ou pour AMSU-A. Il est possible que l'Europe décide de développer un imageur simple et robuste pour remplacer AVHRR, sachant qu'il est envisagé qu'un satellite NPOESS-lite embarquant les imageurs avancés VIIRS et CMIS soit en tandem avec Metop-2 et 3. Une pré-étude de définition de cet instrument doit être effectuée par l'ESA.

## REANALYSES

Les analyses opérationnelles ainsi que les réanalyses sont largement utilisées par la communauté scientifique. Le fait marquant de ces dernières années est que les prévisions dans l'hémisphère sud ont maintenant atteint une qualité comparable à celle de l'hémisphère nord, ce qui montre que l'assimilation variationnelle quadridimensionnelle permet maintenant de tirer partie des observations satellitaires.

La continuité des satellites de météorologie opérationnelle est une nécessité absolue pour Météo-France. Les réflexions prospectives que cela soit du programme MSG ou METOP sont en cours dans le cadre d'EUMETSAT. Cette réflexion associe les utilisateurs météorologiques opérationnels et les utilisateurs de la communauté scientifique. Elle n'est pas déconnectée d'axes de recherche plus prospectifs. Dans le dernier paragraphe de cette note, sont résumés quelques axes techniques qu'il serait souhaitable de développer.

## 3 - LES SATELLITES DE RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT

Météo-France participe activement à de très nombreux programmes de recherches utilisant des données de satellites autres que les satellites météorologiques opérationnels, comme ERS et ENVISAT ou Topex-Poséidon et Jason, ADEOS (Polder), TRMM, SPOT (VEGETATION). Cette participation découle de l'outil indispensable pour ses recherches que constitue les données satellitaires mais est aussi nécessaire pour définir les futurs satellites opérationnels. Météo-France soutient ainsi la stratégie d'EUMETSAT qui a adopté une nouvelle convention afin de pouvoir mettre en œuvre des programmes facultatifs ayant pour objectifs de contribuer à l'observation opérationnelle du climat et à la détection des changements climatiques à l'échelle de la planète. De plus, l'Agence Spatiale Européenne a défini une stratégie d'observation de la Terre comprenant deux programmes : « Earth Explorer », qui peut préfigurer de futurs instruments opérationnels, et « Earth Watch », qui devrait permettre de mettre en œuvre des satellites pré-opérationnels. Ce concept est un outil essentiel pour Météo-France. En effet, METOP dont le développement est financé par l'ESA peut être considéré comme la première mission Earth Watch. De plus, un instrument comme le lidar à effet Doppler de la mission AEOLUS sélectionné par l'ESA dans le cadre des « core mission » du programme « Earth Explorer » est essentiel pour la météorologie. En effet, la méthode Doppler permet la mesure directe du vent, dont on connaît très mal la répartition sur les océans et les régions en voie de développement. Les résultats de cette mission sont attendus avec beaucoup d'intérêt par Météo - France qui s'impliquera dans la validation et l'utilisation temps réel des données.

Dans la suite sont décrits brièvement les besoins prioritaires dans chacune des grandes thématiques. En conclusion, quelques axes importants de développements seront dégagés.

### 3A) - ATMOSPHERE - INTERACTION AEROSOL-NUAGE-RAYONNEMENT

L'importance du rôle joué par les aérosols et les nuages dans l'énergétique de l'atmosphère est aujourd'hui reconnu. Il est aussi reconnu que les mécanismes de croissance des nuages, leur granulométrie et leurs propriétés optiques sont mal connues et grossièrement représentés dans les modèles climatiques et opérationnels. Mais pour l'heure, aucune observation globale n'a pu être réalisée au cours

de laquelle les propriétés micro-physiques et optiques ont été mesurées simultanément. La situation va changer en 2004 avec les missions d'ores et déjà décidées : CALIPSO (lidar rétrodiffusion + imageur IR), EOS-AQUA (satellite défilant d'observation météorologique), CLOUDSAT (radar « nuage ») et PARASOL (observation de la diffusion directionnelle des nuages par un POLDER nouvelle génération). Au delà, il est possible que la mission Earth-Care de l'ESA prenne le relais pour trois nouvelles années. Or, s'il est probable que CALIPSO apporte beaucoup au niveau de la compréhension des mécanismes de base de l'évolution des nuages, la mission ne permettra pas à elle seule un suivi du couvert nuageux sur le long terme et ne permettra donc pas d'observer une éventuelle dérive climatique des paramètres caractéristiques de celui-ci.

Pour l'heure, les observations portant sur les nuages ne sont pas assimilées par les modèles, la priorité à court terme est ailleurs (température et humidité). Mais à la fin de cette décennie on peut penser que la température de brillance des nuages sera assimilée, car de nombreuses observations existent de la part notamment des satellites géostationnaires, et on cherchera également à relier les caractéristiques granulométriques et morphologiques des nuages à leur impact radiatif à travers des paramétrisations nettement plus sophistiquées que maintenant. La continuité opérationnelle de ce volet « observation » est à déterminer.

### 3B) - CYCLE DE L'EAU

#### ➤ *Contenus en eau , Précipitations*

Pour l'instant, les modèles opérationnels commencent à utiliser des contenus en eau liquide et glace pronostiques . Le besoin en validation de ces paramètres est important dès maintenant, autant sur terre que sur mer. De plus, on assimilera ces variables vers la fin de la décennie, d'où l'importance de valeurs quantitatives précises. Quant aux données de précipitations, le manque est surtout crucial sur mer (dans nos régions, les radars fournissent des données sur terre, et sont essentielles notamment pour la validation des modèles et la prévision). Des essais d'assimilation de données de précipitation provenant de TRMM sont encourageants, et le besoin d'une constellation de sondeurs dans le domaine du micro-ondes est présent allant au delà de l'instrument GRAS. C'est pourquoi, Météo-France soutient le projet de constellations GPM ainsi que la mission MEGHA-TROPIQUES.

#### ➤ *Champ de vapeur d'eau atmosphérique*

En dépit de son importance dans les processus atmosphériques couvrant une large gamme d'échelles, le champ de vapeur d'eau atmosphérique est l'un des paramètres les moins connus actuellement. Un des domaines les plus demandeurs et qui est en plein essor est très certainement celui de la prévision à fine échelle des systèmes nuageux et précipitants.

Cependant aucune possibilité existe à ce jour pour mesurer la vapeur d'eau avec des résolutions spatiale et temporelle suffisantes. Les développements de nouveaux instruments dans ce domaine sont fortement soutenus par Météo-France (Projet de lidar vapeur d'eau spatial comme WALES ....)

#### ➤ *Humidité de basses couches*

La restitution de l'humidité dans les basses couches par les satellites est problématique. Pour les sondeurs dans l'infra-rouge, l'indétermination peut se poser sur terre en raison des incertitudes sur l'émissivité de surface. Quant aux micro-ondes, si elles fonctionnent assez bien sur mer, elles présentent aussi une moins bonne qualité de restitution sur terre et leur résolution verticale est assez lâche. Mais des progrès pourraient être accomplis dans le domaine grâce à l'utilisation de longueurs d'ondes différentes (plus basses).

#### ➤ *Hauteur de neige*

L'albedo et le masque de neige seront fournis par le SAF Land, mais pas la hauteur de neige. La connaissance du contenu en eau du pack neigeux est importante pour le suivi du bilan hydrique en surface (hydrologie et météorologie). Dans un contexte montagneux, une résolution spatiale adaptée à un relief complexe (100-500m) est nécessaire. La problématique de l'observation satellitaire du manteau neigeux a

été exposée dans la proposition « SnowSat » du « Second Call for Earth Opportunity Missions » de l'ESA.

➤ *Contenu en eau des sols*

Le stock d'eau du sol dans la zone racinaire est un facteur important de la partition des flux de surface entre chaleur sensible et latente. L'analyse de l'eau du sol est réalisée actuellement par assimilation d'observations de température et d'humidité de l'air. Cette méthode est un pis-aller et la qualité du résultat est fortement liée à la situation météorologique. La télédétection permet d'accéder plus directement à l'état hydrique des sols. Les travaux menés au CNRM, en particulier, ont montré que l'assimilation de températures de surface obtenues par infra-rouge thermique permet d'analyser l'eau du sol, mais en conditions sèches seulement, avec la contrainte supplémentaire que le ciel doit être sans nuages. L'assimilation de contenus en eau du sol superficiel obtenus par radiométrie micro-ondes en bande L ou, directement, de températures de brillance en bande L, est très efficace pour l'analyse de l'eau du sol dans la zone racinaire. Comme l'atmosphère est pratiquement transparente en bande L, un satellite du type SMOS (CNES/ESA), avec une résolution de 20 à 50 km, un temps de revisite de 2-3 jours, et des mesures multi-angulaires, permettra de couvrir par tout temps les besoins de Météo-France.

➤ *Biomasse et cycle du carbone*

L'évolution récente des modèles de surfaces continentales utilisés en hydrométéorologie permet désormais de simuler la biomasse de la végétation et l'indice foliaire, ce qui rend possible le couplage de ces modèles avec des modèles de transfert radiatif pour la simulation de radiances ou de réflectances dans divers domaines de longueur d'onde. Il devient donc possible d'assimiler des données de télédétection (visible, proche infra-rouge, moyen infra-rouge, infra-rouge, micro-ondes) pour analyser les paramètres environnementaux qui conditionnent la croissance des plantes. On peut donc envisager de mettre en place des systèmes globaux permettant non seulement d'observer, mais aussi d'analyser l'évolution de l'environnement, et son effet sur les différents stocks de carbone. Pour cela, l'instrument VEGETATION est un outil utile ainsi que les instruments Méris, POLDER, MODIS.

Etant donné le fort couplage entre les cycles de l'eau et du carbone, la faiblesse des systèmes d'estimation des précipitations à l'échelle globale, ainsi que la sensibilité de la radiométrie micro-ondes en bande L au contenu en eau total des couverts végétaux (en dehors des forêts denses), l'utilisation de données SMOS aura un impact décisif sur le succès d'un système intégré d'assimilation.

En conclusion, Météo-France soutient fortement la mission SMOS pour ces apports sur l'humidité des sols et pour l'étude du cycle du carbone. Ce projet de l'ESA (« 2<sup>nd</sup> Opportunity Mission ») et du CNES permettra pour la première fois d'analyser de manière précise le contenu en eau des sols pour une application directe dans les systèmes d'assimilation opérationnels, et le suivi climatologique de l'environnement.

De plus, les missions liées aux précipitations ( GPM, MEGHA-TROPIQUES ) sont aussi essentielles ainsi que celles dédiés aux systèmes nuageux ( CALIPSO, CLOUDSAT ..). Enfin, toute nouvelle technique pouvant améliorer le champ de vapeur d'eau atmosphérique les paramètres d'humidité dans les basses couches ou la hauteur de neige sera intéressante.

### 3C) - CHIMIE ATMOSPHERIQUE

➤ *Chimie troposphérique et pollution*

L'environnement atmosphérique est un des domaines émergents de Météo-France ; il apparaît à la fois dans le Plan Stratégique et dans le document de Prospective à 10 ans de la Recherche de l'Etablissement. Dans ce contexte, la prévision du « temps chimique », depuis l'échelle globale jusqu'à l'échelle régionale, représente un enjeu essentiel ; elle repose sur la modélisation du transport et de la transformation des espèces chimiques à partir des sources : émissions naturelles et humaines, en surface et en altitude (éclaircs, aviation,...) ; intrusions stratosphériques... Il existe un besoin identifié pour des observations de routine susceptibles d'être prises en compte dans des systèmes d'assimilation opérationnels. Mesures spatiales et in situ (stations en surface, mesures à bord d'avions, de trains,...) combinées sont susceptibles de permettre de répondre à plusieurs questions importantes :

- l'initialisation de modèles de chimie-transport de grande échelle, susceptibles de fournir des conditions aux limites pour des modèles de pollution régionale ;
- l'étude des flux de pollution aux frontières, réglementés au niveau international, la détection inverse des sources d'émissions ;
- la recherche sur les processus chimiques, dynamiques et radiatifs couplés entrant en jeu ;
- l'étude du lien entre l'évolution des composition et capacité oxydante de la troposphère et celle du climat.

Les techniques d'assimilation de mesures chimiques, à l'étude notamment dans le cadre de projets européens passés (SODA,...) ou en cours (ASSET,...) permettront de tirer profit d'observations spatiales de niveau 2 (mesures ponctuelles, profils et colonnes totales ou partielles) et probablement, à terme pour certaines espèces chimiques, de niveau 1 (radiance brutes). Les observations de chimie troposphérique sont réduites et se limitent à celles de MOPITT (CO, fonctionnement partiel depuis 2001), SCIAMACHY (dans l'UV-visible seulement : O3, NO2) et TES (Tropospheric Emission Spectrometer, EOS-Aura 2003).

Les expériences GEOTROPE et TROC proposées à l'ASE (janvier 2002) semblent couvrir l'essentiel du besoin, qui est essentiellement de nature exploratoire à moyen terme. GEOTROPE, proposé pour une orbite géostationnaire, est adapté à l'observation des différentes zones d'activité européennes, avec des résolutions spatiale et temporelle compatibles avec l'étude et la prévision de la qualité de l'air. TROC, placé en orbite polaire, couvre les échanges intercontinentaux et documente la chimie troposphérique à l'échelle globale et ses liens avec le climat.

### ➤ *Chimie Stratosphérique*

L'intérêt pour la chimie stratosphérique est principalement lié à l'étude des impacts climatiques de changements stratosphériques dus aux activités humaines. Le rejet dans l'atmosphère de composés CFC a conduit à la formation du trou d'ozone antarctique. Dans un autre domaine, des études sont en cours pour mieux connaître l'impact des rejets des avions (oxydes d'azote, vapeur d'eau, suies) dans la basse stratosphère et la haute troposphère. L'ensemble de ces rejets peut avoir un impact sur le climat et, réciproquement les changements du climat par suite de l'augmentation des gaz à effet de serre ont une influence sur la chimie stratosphérique.

En dehors des recherches sur la stratosphère (incluant chimie y compris la vapeur d'eau stratosphérique, dynamique et rayonnement), l'observation de l'ozone est nécessaire pour les applications suivantes :

- une meilleure connaissance de la dynamique de la basse stratosphère rendue possible par l'assimilation de profils verticaux d'ozone, ce constituant jouant le rôle de traceur ;
- l'examen de cartes d'ozone total (surtout des colonnes de la basses stratosphère) pour valider les analyses de tourbillon potentiel est utile au prévisionniste. Celui-ci utilise ainsi des cartes de colonnes d'ozone à la manière de cartes du canal vapeur d'eau, la carte d'ozone servant en particulier à repérer les jets d'altitude et les anomalies de la tropopause ;
- enfin le champ d'ozone total est un ingrédient essentiel du calcul du rayonnement UV parvenant en surface et pouvant produire des lésions erythémales.

Les besoins «opérationnels » liés à l'observation de l'ozone seront couverts par les satellites METOP (SAF Ozone). Au delà, il faut veiller à la continuité des observations.

La priorité de Météo-France est clairement sur les missions telles que TROC ou GEOTROPE même s'il ne faut pas oublier l'importance et la nature essentielle de surveillance de la stratosphère.

### 3D) - OCEAN

#### ➤ *Altimétrie*

La priorité en ce qui concerne les observations altimétriques est de sécuriser pour le long terme un système comprenant simultanément une mission de haute précision (de type JASON) et une mission de précision moyenne avec un cycle de répétitivité plus court, en particulier pour l'observation de la méso-échelle. En ce qui concerne le deuxième besoin, important pour les besoins de la défense, le concept ALTIKA est séduisant pour l'après ENVISAT.

*L'observation de la dynamique côtière est une priorité importante, à laquelle les systèmes satellite actuels ne répondent que de façon imparfaite, du fait des contraintes spécifiques liées aux zones côtières (échelles spatiales et temporelles fines, problèmes de contamination du signal par la côte). L'apport potentiel de nouveaux concepts comme ALTIKA ou un altimètre à ouverture de synthèse doit être étudié et clarifié.*

#### ➤ *État de mer*

En ce qui concerne l'observation des états de mer, il est prioritaire que les études déjà réalisées dans le cadre du projet SWIMSAT aboutissent. L'observation des spectres d'états de mer par un radar à ouverture réelle aura un impact important sur la prévision opérationnelle des états de mer.

#### ➤ *Vent de surface*

Il est essentiel pour les besoins de la météorologie et des océanographes. Le vent et l'état de la mer demeurent les paramètres prioritaires pour la sécurité en mer. La continuité des mesures oblige à avoir toujours deux diffusiomètres -embarqués simultanément.- Tout progrès dans la mesure du vent de surface doit par ailleurs être recherché et encouragé.

#### ➤ *Glaces de mer*

Limite de glace- épaisseur de glace: *Les besoins opérationnels de détection et de caractérisation de la couverture en glace de mer pour la prévision météorologique* sont aujourd'hui couverts par les satellites météorologiques existants ou en cours de développement (SSM/I puis SSM/IS, diffusiomètres). Par contre, le besoin de la prévision saisonnière et climatique nécessite l'étude de nouveaux concepts instrumentaux permettant d'accéder à l'estimation de l'épaisseur de la glace de mer.

#### ➤ *Iceberg dérivants et polluants*

La seule source de données satellite permettant aujourd'hui la détection et le suivi d'icebergs est le radar à ouverture de synthèse. Ces données sont également utilisables pour la détection des nappes d'hydrocarbures et des dégazages en mer. La disponibilité de plusieurs missions permet d'envisager l'emploi de ces techniques de détection aux moyennes latitudes. L'objectif prioritaire dans ce domaine est de sécuriser la prévision opérationnelle des missions actuelles (RADARSAT, ENVISAT), ainsi que l'augmentation de la fréquence temporelle d'observation.

#### ➤ *Couleur de l'eau*

Enfin, dans le domaine de l'observation de la couleur de l'océan, devant le nombre important de missions en cours de préparation ou déjà en vol, la priorité actuelle semble surtout d'évaluer de façon claire quel est le besoin opérationnel lié au suivi du cycle du carbone, et quelle est la précision réelle des données actuellement disponibles selon les conditions d'observation (ex : zones côtières).

*En conclusion, les priorités de Météo-France sont premièrement d'assurer la pérennisation des missions altimétriques ( haute résolution type Jason dans le cadre de la coopération quadripartite avec une implication des agences opérationnelles ) et la réalisation de la mission SWIMSAT. De plus, deux*

problèmes sont préoccupants, la détection des icebergs dérivants et la glace de mer. Enfin, l'observation de la couleur de la mer a été traitée auparavant dans le cadre des études sur le cycle du carbone.

### 3E) - RISQUES METEO

#### ➤ Nuages

La détection des nuages bas (en particulier les brouillards) sur terre n'est pas encore adéquate, même si l'arrivée de MSG devrait constituer une avancée notable par rapport aux caprices des METEOSAT actuels dans ce domaine.

#### ➤ Pression de surface

Ce paramètre est bien observé sur terre. Sur mer, une information indirecte peut être obtenue par l'assimilation des données de diffusiomètres, avec des approximations. Des données relativement précises depuis l'espace sur mer seraient très bénéfiques pour ce paramètre crucial particulièrement dans l'hémisphère sud. Pour l'instant cependant, on ne voit pas technique adéquate, la précision requise meilleure que le hPa semble très difficile à atteindre, même par des techniques actives (lidar).

#### ➤ Propriétés des sols

Les paramètres actuels de caractérisation des sols et de la végétation sont suffisants pour les besoins de la prévision numérique. Si l'on veut progresser toutefois, il faut améliorer l'estimation de certaines variables comme le contenu en eau des sols, les flux radiatifs incidents à la surface (rayonnement solaire et thermique), l'albédo.

#### ➤ Cendres volcaniques

La France est responsable de l'alerte sur une zone très vaste comprenant notamment l'Afrique et Météo – France doit donner une prévision de trajectoire. A l'heure actuelle, les détections sont effectuées à l'aide des satellites METEOSAT mais elles manquent de précision (quantité de cendres, altitude maximale des projections, granulométrie...), ce qui rend la prévision des trajectoires incertaines. Le besoin concernerait donc une détection automatique des éruptions et une meilleure caractérisation de celles-ci. Pour ce qui est de la détection, il semble que l'imagerie passive puisse répondre en parti au besoin. Des sondeurs chimiques plus grossiers en terme de résolution peuvent également être utilisés (cas de TOMS avec les mesures de SO<sub>2</sub>). Pour l'altitude, on ne voit guère qu'un instrument actif de type lidar. Celui-ci pourrait être en mesure de donner en sus des indications de granulométrie. Le problème est lié à la fauchée très fine de l'instrument peu adaptée à un mode de surveillance.

#### ➤ Fortes accumulations de hauteurs de neige

Sur le territoire français, Météo-France est responsable de la prévision du risque d'avalanche qui croît fortement en cas de fortes accumulations en zone montagneuse. Des sondeurs comme les altimètres ou mieux les radars de type SAR (bande ku polarisé) semblent être les instruments les plus adaptés mais le SAR permet d'espérer à moyen terme une possibilité intéressant d'évaluation de certains paramètres internes du manteau neigeux.

## 4 - AXES DE DEVELOPPEMENT TECHNIQUE

Compte tenu des besoins exprimés ci-dessus, les axes techniques suivants semblent devoir être développés :

### TROC ET LE CONCEPT DE VISEE «INTELLIGENTE»

La mission TROC possède un imageur infrarouge, qui lui permet de rechercher et de sélectionner les zones de ciel clair, limitant ainsi la fabrication des interférogrammes aux zones de températures de brillance les plus fortes. Ce principe innovant pourrait être repris et adapté pour les observations météorologiques grâce à une détection (et éventuellement une caractérisation) des nuages effectuée en temps réel, avant transmission vers le sol. Dans un premier temps, une collaboration de Météo-France

avec l'équipe TROC pourrait consister à quantifier le bénéfice apporté par une visée « intelligente » des zones de ciel clair.

Tant pour IASI que pour Aeolus, la principale limitation provient de la contamination nuageuse qui limite les possibilités de l'instrument dans les basses couches. Le concept de visée intelligente serait ici particulièrement utile, permettant au travers d'une boucle d'asservissement temps réel entre un imageur et l'instrument d'augmenter sensiblement le rendement scientifique de l'instrument.

## **AGIRS**

Il est souhaitable d'étudier la possibilité d'améliorer les capacités de sondages de MSG au delà de MSG-3 en ajoutant un sondeur infrarouge plutôt que de redéfinir complètement le satellite. Plus généralement, développer un sondeur infrarouge tel que AGIRS, c'est à dire permettant d'obtenir à partir d'un satellite géostationnaire en rotation ( tel Météosat seconde génération) une qualité de sondage intermédiaire entre géostationnaires GOES et la génération IASI. On en attend une précision de 1,5 K pour une résolution verticale de 1,5 km entre le sol et 400 hP. Ceci associé à une résolution horizontale de 12 km et temporelle d'une heure en fait un outil particulièrement bien adapté à la surveillance des phénomènes méso-échelle d'évolution rapide.

Il serait donc intéressant de poursuivre les études sur ce type d'instrument, spectromètre à réseau mesurant le spectre de l'atmosphère dans le domaine s'étendant de 4,33 à 5,49  $\mu\text{m}$  avec une résolution spectrale de 1/1000 soit 5 nanomètres.

## **LIDAR**

D'une manière générale, les lidars sont certainement une des techniques les plus prometteuses pour de futurs satellites d'étude de l'atmosphère. Au delà du développement du lidar doppler pour la mesure du vent et des lidars développés dans le cadre de CALIPSO, il est souhaitable de poursuivre des développements par exemple sur les lidars CO<sub>2</sub> pour obtenir des mesures de température très précises mais aussi comme mesure de l'altitude.

## **RADAR ALTIMETRE**

La poursuite de la filière altimétriques nécessite de poursuivre les développements sur les radars altimètres ; Il est aussi fortement souhaitable que la mission SWIMSAT puisse enfin être réalisée.

## **BALLONS**

Les mesures classiques par radiosondages sont les seules qui permettent de mesurer précisément et avec une bonne résolution verticale la variabilité de la structure dynamique et thermodynamique de l'atmosphère. Ces mesures sont cependant rares sur les régions océaniques et tropicales. Il est donc important de développer de nouveaux systèmes d'observation in situ de la structure verticale de l'atmosphère.

Le système ICARUS de dropsondes larguées à partir de ballons stratosphériques semble à ce titre prometteur et susceptible d'apporter une véritable révolution des connaissances sur les régions tropicales. Ce système sera probablement utilisé sur l'Afrique de l'Ouest en 2005

(Projet Mousson Africaine AMMA). Le projet français de montgolfières stratosphériques tropicales sur lesquelles serait adapté le système de dropsondes ICARUS et une nacelle de transmission satellite développée par la division ballon du CNES, permettrait d'étendre le système ICARUS l'emport d'un plus grand nombre de dropsondes et le contrôle de leur largage.

## **AVIONS**

Enfin, les moyens sol, avions sont un élément essentiel pour tester des instruments prototype ou démonstrateurs de capteurs spatiaux. ils sont aussi un élément important pour la validation des observations, une fois les satellites en fonctionnement. Les avions font partie du dispositif expérimental de Météo-France depuis plus de 50 ans. Dans le cadre du chantier de renouvellement des avions de recherche, Météo-France est chargé de la réalisation du projet relatif à l'avion basse altitude en concertation avec ses partenaires, le CNRS/INSU et le CNES. Dans ce contexte, Météo-France est particulièrement attaché à la création d'une structure intégrée de gestion des avions de recherche atmosphérique et de télédétection qui prendra la forme d'une Unité Commune. Cette structure constituera

le portail d'accès aux moyens aériens nationaux et permettra d'augmenter la synergie entre les différents acteurs et la visibilité des actions , en particulier au plan européen.

## **5 - UTILISATION DES DONNEES-BASES THEMATIQUES**

Enfin, Météo-France comme utilisateur de données spatiales consacre une part importante de son activité au développement de partie de bases de données. Dans le cadre des activités SAF d'Eumetsat , Météo-France a été impliqué, pour le développement de produits aval : SAF Prévision Immédiate (type de nuages, hauteur et température de sommet, développement de cellules orageuses), SAF Océans et Glaces de mer (SST, flux radiatifs à l'interface), SAF Ozone (ozone total SEVIRI), SAF Terres Emergées (albedo, flux ondes courtes. Dans le cadre de METOP, là aussi, des activités aval liées aux SAF ont été mises en place à Météo-France, notamment pour l'utilisation de IASI (SAF NWP) ou de AVHRR pour la SST (SAF Océans et Glace de mer).

De plus, Météo -France est déjà impliqué à travers MEDIAS a des bases de données liées aux campagnes expérimentales et est prêt à s'investir dans le pôle thématique POSTEL et également à participer à ICARE, ETHER. Il est aussi impliqué dans les données océanographiques via SSALTO ou Coriolis.

Dans le cadre du développement de l'initiative GMES, les SAF peuvent en être un des éléments à coté d'autres centres de données. Météo-France s'associe à la réflexion et au développement des initiatives dans ce cadre comme par exemple sur les risques hydrologiques.

## **6 - CONCLUSION**

En résumé, les priorités de Météo-France sont les suivantes :

- Premièrement améliorer l'observation des paramètres clés météorologiques que sont la température, humidité, meilleure résolution spatiale, et accompagner les réflexions engagées dans le cadre d'EUMETSAT pour les satellites opérationnels futurs. Cela implique de mener à bien les études instrumentales. Météo-France souhaite tout particulièrement un investissement en R&T sur le concept de visée intelligente.
- Deuxièmement, étudier le cycle de l'eau et de la vapeur d'eau dans tous ses états et à toute altitude reste une priorité fondamentale. A ce titre Météo-France soutient les missions sur les précipitations GPM et tout développement de capteur futur, particulièrement le lidar vapeur d'eau ;
- Troisièmement pour les satellites de recherche et développement, les priorités sont :
  - d'assurer le développement et la réalisation des missions engagées. Cela concerne la mission innovante SMOS de mesure de l'humidité des sols mais aussi AEOLUS ; CALIPSO et dans une moindre mesure MEGHA-TROPICQUES, PICARD et VORCORE ;
  - de développer une mission dédiée à la chimie troposphérique étudiant la pollution tout en n'oubliant pas le suivi de l'ozone stratosphérique ;
- Enfin, en océanographie et en prévision marine, l'implication de Météo-France dans la future océanographie opérationnelle nécessite que la filière altimétrie soit pérennisée dans ses deux composantes. De plus, une meilleure définition des états de mer justifie que tout soit fait afin que la mission SWIMSAT voit le jour.