

# L'INITIATIVE EUROPEENNE "SUIVI GLOBAL POUR L'ENVIRONNEMENT ET LA SECURITE" (GMES) ET LE PROTOCOLE DE KYOTO

## BESOINS EN MATIERE D'INFORMATIONS ET DE DONNEES ASSOCIEES

G. BEGNI<sup>1</sup> - M. HA DUONG<sup>2</sup> - J.P.LACAUX<sup>3</sup> - E. LAMBIN<sup>4</sup> - H. LE TREUT<sup>5</sup> - A. MOREL<sup>6</sup>, E. RASCHKE<sup>7</sup> - B.SAUGIER<sup>8</sup> - P.VELLINGA<sup>9</sup>, A.G.DEKKER<sup>9</sup>, H. VAN DER WOERD<sup>9</sup>, J. GUPTA<sup>9</sup> - S. ZERBINI<sup>10</sup>.

<sup>1</sup> MEDIAS-FRANCE, 18 avenue Edouard Belin, BPI 2102 - 31401 Toulouse Cedex 4 - France

<sup>2</sup> CIRED - Jardin Tropical, 45 bis avenue de la Belle Gabrielle - 94736 Nogent sur Marne Cedex - France

<sup>3</sup> Laboratoire d'Aérodynamique, O.M.P., 14 avenue Edouard Belin - 31400 Toulouse - France

<sup>4</sup> Université Catholique de Louvain, 3 Place Louis Pasteur - B 1348 Louvain la Neuve - Belgique

<sup>5</sup> Université de P. et M. Curie, Case postale 994, Place de Jussieu - 75252 Paris Cedex 05 - France

<sup>6</sup> LPCM, Observatoire Océanologique - B.P. 8 - 06230 Villefranche sur Mer - France

<sup>7</sup> Institut für Atmosphärenphysik, GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Postfach\_1160 - D-21494 Geesthacht - Germany

<sup>8</sup> Laboratoire d'Ecophysiologie Végétale, Bât 362 Université Paris-Sud XI - 91405 Orsay Cedex - France

<sup>9</sup> Institut voor Milieuvraastukken, c-66, de boelelaan - 1115, Amsterdam - The Netherlands

<sup>10</sup> Università di Bologna, Viale Bertini Pichat 8 - 40127 Bologna - Italy

### Résumé

En 1992, la Convention Cadre des Nations Unies pour le Contrôle du Changement Global (UNFCCC) a montré la prise de conscience internationale des effets néfastes de l'accumulation dans l'atmosphère des gaz à effet de serre, conduisant à un réchauffement climatique, sous l'effet direct ou indirect des activités anthropiques. Le Protocole de Kyoto, adopté en 1997, a fixé des engagements quantitatifs que les Parties signataires s'engageaient à respecter. Ceci suppose des moyens d'observation afin de comprendre, modéliser, mesurer l'évolution des sources et des puits de gaz à effet de serre, et tout particulièrement celles sur lesquelles l'Homme peut avoir une influence directe. Conjointement aux mesures *in situ*, l'observation de la Terre par satellite s'avère un moyen puissant pour répondre à cet objectif. L'Europe, comme le rappelle le "Manifeste de Baveno" adopté par un certain nombre d'agences impliquées dans les activités spatiales, dispose d'atouts majeurs pour remplir de tels objectifs. Le présent article s'efforce de donner une vue synthétique des différentes informations à rassembler pour le suivi des clauses de Protocole de Kyoto, de l'UNFCCC et de leurs conséquences globales sur le changement climatique, mettant en évidence les résultats obtenus, les moyens à entreprendre, les recherches restant à mener, pour atteindre ces buts.

**Mots-clés :** Bilan radiatif terrestre - Biomasse - Chimie atmosphérique - Chimie océanique - Couvert végétal - Cycle du carbone - Ecosystèmes - Forêt - GES (gaz à effet de serre) - Informations socio-économiques - Photosynthèse - Physique océanique - Protocole de Kyoto - Puits de GES - Sources de GES - Systèmes d'observation par satellite - UNFCCC (Convention Cadre des Nations Unies pour le Contrôle du Changement Global) - Utilisation des sols.

## Avant-propos

En octobre 1998, un certain nombre d'institutions impliquées dans le développement des activités spatiales en Europe<sup>1</sup> ont adopté un document appelé "Manifeste de Baveno", rappelant l'importance stratégique pour l'Europe de se doter des moyens de suivi global de l'environnement au niveau mondial. L'une des priorités identifiées est le respect et la surveillance des engagements pris dans le cadre du protocole dit "de Kyoto", en application de la Convention Cadre des Nations Unies pour le Contrôle du Changement Global (UNFCCC). Pour atteindre ce but, il est nécessaire d'identifier les mécanismes physiques et chimiques associés aux changements globaux de l'environnement, et plus particulièrement, aux gaz à effet de serre, à leurs sources et leurs puits. Il est également nécessaire de créer des outils d'observation et de contrôle afin de mettre en œuvre un système opérationnel de surveillance de l'environnement, permettant notamment de s'assurer de la mise en œuvre effective des engagements pris. Les systèmes d'observation spatiale sont des outils privilégiés pour répondre à un tel objectif (Belward, 2000).

Suite à l'adoption de ce manifeste, le CNES a proposé, au second semestre de 1998, de prendre en charge une étude, menée par un groupe d'experts européens auteurs du présent article, coordonnés par MEDIAS-FRANCE, afin d'identifier les besoins en information nécessaires. Un tel travail, présenté ici, peut constituer un point de départ permettant d'identifier comment les moyens spatiaux, conjointement à des informations collectées *in situ* et assimilées dans des modèles adéquats, peuvent répondre aux besoins précis énoncés dans le protocole de Kyoto. En dépit d'avancées importantes, ces questions sont loin d'être résolues par la communauté scientifique, institutionnelle et industrielle. Il est de la mission de la SFPT de promouvoir la recherche dans le domaine de l'Observation de la Terre. Les lecteurs de notre bulletin trouveront dans le présent article une source d'informations, mais également et surtout une source de réflexions pouvant permettre de donner de nouvelles orientations multidisciplinaires à leurs activités. Ils pourront, s'ils le souhaitent, trouver de plus amples descriptions des programmes spatiaux dans la documentation "papier" et électronique des diverses agences spatiales et du CEOS, et plus particulièrement, en ce qui concerne les programmes où la France est engagée, dans le bulletin spécial de la SFPT consacré au CNES (n°154). La bibliographie présentée ici concourt également à un tel objectif. Elle ne saurait naturellement être exhaustive, mais présente une série d'articles récents permettant au lecteur d'approfondir la plupart des sujets abordés au gré de ses besoins. Il

eût été fastidieux de référencer l'ensemble de ces articles dans le corps même du texte. Il importe enfin de souligner, comme nous le ferons à plusieurs endroits dans le texte, que ces recherches s'appuient sur de nombreux acquis. Il ne s'agit donc pas de partir "de zéro", mais de progresser dans l'analyse qualitative et quantitative de phénomènes liés à des processus physiques, chimiques, socio-économiques fortement couplés qui conditionnent l'évolution climatique de notre planète et sont maintenant régis par des accords internationaux répondant à une prise de conscience "citoyenne" et politique de la nécessité de maîtriser collectivement la part anthropique de ces processus. Les outils d'observation spatiale de la Terre sont la plupart du temps pertinents dans cette approche, mais leur utilisation scientifiquement validée nécessite des travaux de recherche appliquée ouvrant une voie prometteuse.

Le Manifeste de Baveno a donné naissance à une initiative européenne en cours de développement, "Suivi Global pour l'Environnement et la Sécurité", coordonnée par le CCR/IAS (JRC/SAI), et connue sous l'acronyme anglo-saxon GMES. Toute information sur le développement de cette initiative peut être obtenue auprès de cet Institut.

## 1. Introduction : Besoins en données globales

### 1.1. De l'UNFCCC au manifeste de Baveno

Il est certainement utile de rappeler le contexte général des conventions internationales sur l'environnement, de l'UNFCCC et du protocole de Kyoto. En effet, il existe plus de 870 accords légaux concernant de façon directe ou indirecte les problèmes liés à l'environnement, et plus de 152 traités internationaux concernant l'environnement et l'utilisation des ressources. Les principales conventions sont citées dans le Tableau 1 ci-dessous (Gupta, 1998). Ces conventions sont souvent précisées par des protocoles ; par exemple, le protocole "de Montréal", que nous serons amenés à évoquer (§ 2.1), précise la mise en œuvre des conventions de protection de la couche d'ozone.

<sup>1</sup> BNSC, CNES, DLR, Commission Européenne, EARSC, ESA, EUMETSAT, ultérieurement rejoints par l'ASI.

Objet	Conventions		Statut	But
Atmosphère	Couche d'ozone, 1985		En vigueur	Protection de la couche d'ozone
	Contrôle des CFC, 1987		En vigueur	Élimination progressive de l'utilisation des CFC et HFC
	Changement climatique, 1992		En vigueur	Stabilisation de la concentration globale en GES
Eau	Eaux douces	Cours d'eau internationaux	Adoptée en 1997	Réglementation qualitative et quantitative des cours d'eaux internationaux
	Océan	Rejets dans l'océan, 1972 ; convention OSPAR, 1992	En vigueur	Prévention des rejets de déchets dangereux, y compris de la part des navires, des avions et des plates-formes ; Réglementation des rejets d'autres types de déchets
		Pollution due aux navires, 1972	En vigueur	Réglementation des déchets rejetés par les navires
		Loi sur la Mer, 1982	En vigueur	Protection, préservation, et utilisation pacifique, équitable et efficace de la mer
Faune sauvage et habitat	Traité de l'Antarctique, 1959, 1980		En vigueur	Conservation et utilisation rationnelle des ressources marines vivantes
	Zones marécageuses, 1971		En vigueur	Protection et amélioration des zones marécageuses
	Espèces en voie de disparition		En vigueur	Protection de la surexploitation des espèces végétales et animales en voie de disparition par l'interdiction de leur commerce international
	Espèces migratrices, 1979		En vigueur	Conservation et gestion efficace des espèces migratrices
	Biodiversité, 1992		En vigueur	Conservation de la diversité biologique, utilisation durable de ses composantes et partage juste et équitable des bienfaits apportés par l'utilisation des ressources génétiques
	Désertification, 1994		En vigueur	Contrôle et diminution des effets néfastes de la désertification
Matières dangereuses	Déclaration d'accidents nucléaires, 1986		En vigueur	Déclarations et actions à entreprendre en cas d'accident nucléaire
	Circulation des déchets dangereux		En vigueur	Réglementation de la circulation des déchets dangereux

**Tableau 1.** Principaux traités sur l'environnement (Gupta, 1998)

La Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (UNFCCC) a été adoptée en 1992, et est entrée en vigueur en 1994. Depuis 1995, plusieurs assemblées annuelles ont eu lieu, réunissant la Conférence des Parties à la Convention (COP). L'objectif final de l'UNFCCC (Article 2) est la stabilisation des concentrations en gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère à un niveau empêchant une interférence anthropique dangereuse avec le système climatique. Un tel niveau devrait être atteint dans un laps de temps suffisant pour permettre aux

écosystèmes de s'adapter naturellement au changement climatique, pour s'assurer que la production alimentaire n'est pas menacée et pour permettre un développement économique durable.

Le protocole de Kyoto a été adopté en décembre 1997 lors de la troisième COP. Ce protocole énumère à l'Article 3 les objectifs quantitatifs de réduction d'émissions de gaz pour tous les pays cités en Annexe 1. Le protocole de Kyoto a pour objectif de réduire un ensemble de six gaz (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFCs, PFCs et SF<sub>6</sub>) d'environ 5% pour la période 2008-2012, 1990

étant l'année de référence pour les trois premiers gaz, et 1990 ou 1995 étant l'année de référence pour les trois autres gaz.

Toutes les Parties sont dans l'obligation de :

- dresser un inventaire au niveau national des émissions de GES en identifiant leurs sources et leurs puits (causes de leur disparition),
- préparer les programmes de politique nationale sur le changement climatique,
- développer les plans d'adaptation et de gestion des zones côtières, et enfin,
- intégrer les considérations climatiques dans les autres politiques concernées.

Les tâches principales consistent à développer une méthodologie commune pour le calcul des émissions (Article 4.1(a)) et leur absorption dans des puits (Article 4.2(c)). D'autres tâches consistent à examiner les communications faites par toutes les Parties concernant leurs émissions et leur mise en œuvre du protocole (Articles 4.1(a) et (j), Article 4.2(b)), à analyser et amender la liste des pays cités en Annexe I et II (Articles 4.2(f)). Il est prévu de prendre des dispositions pour fournir une aide technique et financière aux pays en voie de développement (Article 12.7) selon leur demande et en fonction de leurs engagements.

L'importance de ces questions a été formellement reconnue par le "Manifeste de Baveno". Selon les termes de celui-ci, le présent document examine les besoins en informations et données associées. L'objectif final est de concevoir un service de suivi

global pour l'environnement et la sécurité. Un tel service devrait avoir une dimension stratégique liée à l'identification, la prévention ou la diminution des effets indésirables susceptibles de menacer la stabilité de la société dans son ensemble. Il devrait aussi conforter l'indépendance européenne en permettant l'accès aux données pertinentes et en assurant leur traitement, permettant ainsi de fournir les informations nécessaires. Plus spécifiquement, il représenterait une contribution européenne significative pour le suivi de la mise en œuvre du protocole de Kyoto dans le cadre de l'UNFCCC. Il convient de garder à l'esprit que l'observation systématique de la Terre dans le cadre du protocole de Kyoto peut être fortement couplée au suivi et contrôle d'autres conventions internationales, telles que les traités sur la biodiversité ou la désertification ou le protocole de Montréal.

La convergence entre les besoins en données et informations et les possibilités offertes par les systèmes d'observation par satellite associés à des mesures *in situ* doit devenir un élément clé de l'agenda spatial européen.

## 1.2. Quelques estimations quantitatives globales

Les tableaux-2 et 3, publiés par l'IPCC en 1994, donnent une vue d'ensemble de l'ampleur des sources et puits principaux de CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>. Les flux de méthane sont bien plus faibles que ceux de gaz carbonique, mais l'effet de serre de ce gaz est nettement plus important, de sorte que sa contribution totale est significative.

Sources	GtC/an
Emissions de la surface océanique	90
Production et respiration primaire nette globale (végétation et sols)	60
Emissions provenant des combustibles fossiles et de la production de ciment	5.5
Emissions nettes dues aux changements dans l'utilisation des sols (principalement en zone tropicale)	1.6
<b>Puits</b>	
Absorption par la surface océanique	92
Absorption par la végétation et le sol	61.4
Changement dans l'utilisation des sols (principalement reboisement de l'hémisphère Nord)	0.5

**Tableau 2 :** Bilan moyen annuel de gaz carbonique de 1980 à 1989  
Les sources et puits de CO<sub>2</sub> sont exprimées en Gigatonnes de carbone par an (IPCC, 1994)

Sources	Tg(CH <sub>4</sub> )/an
<b>Naturelles</b>	
• Zones marécageuses	115 (55-150)
• Termites	20 (10-50)
• Océans	10 (5-50)
• Autres	15 (10-40)
<b>Anthropiques</b>	
• Combustible fossile total	100 (70-120)*
• Fermentation entérique	85 (65-100)
• Rizières	60 (20-100)
• Biomasse brûlée	40 (20-80)
• Enfouissement des déchets	40 (20-70)
• Déchets animaux	25 (20-30)
Eaux usées domestiques	25 (15-80)
<b>Puits</b>	
Augmentation dans l'atmosphère	37 (35-40)
Disparition dans l'atmosphère (durée de vie = 9.4 ans)	
• OH° troposphérique	445 (360-530)
• Stratosphère	40 (32-48)
• Sols	30 (15-45)

**Tableau 3** : Estimation des sources et des puits de méthane (Téragrammes par an - IPCC, 1994)  
 \* Source fractionnaire du carbone fossile basée sur une mesure du ratio atmosphérique de <sup>14</sup>CH<sub>4</sub> à <sup>12</sup>CH<sub>4</sub>

Gaz	Catégorie de source	Facteur d'émission	Données d'activité	Pourcentage d'incertitude globale
CO <sub>2</sub>	Energie	7%	7%	10%
CO <sub>2</sub>	Processus industriels	7%	7%	10%
CO <sub>2</sub>	Changements dans l'utilisation du sol et sylviculture	33%	50%	60%
CH <sub>4</sub>	Biomasse brûlée	50%	50%	100%
CH <sub>4</sub>	Activités liées au pétrole et au gaz naturel	55%	20%	60%
CH <sub>4</sub>	Mines de charbon	55%	20%	60%
CH <sub>4</sub>	Culture du riz	3/4	1/4	1
CH <sub>4</sub>	Déchets	2/3	1/3	1
CH <sub>4</sub>	Animaux	25%	10%	25%
CH <sub>4</sub>	Déchets animaux	20%	10%	20%

**Tableau 4** : Estimation du pourcentage d'incertitude concernant les émissions (IPCC, 1996)

Sources	Tg N /an
<b>Naturelles</b>	
• feux et réduction anaérobie des nitrates du sol par des bactéries	5,5 - 6,7
• processus bactériens dans les océans	1,4 - 2,6
<b>Anthropiques</b>	
• industrie, fertilisants, feux	3,6 - 5, 1
<b>Puits</b>	
• destruction dans la stratosphère (voir § 2.1)	8,7

**Tableau 5** : Estimation des sources et puits de N<sub>2</sub>O en Téragrammes d'azote par an (Graedel et al., 1993)

Ces données doivent être replacées dans une perspective historique (Briffa *et al.*, 1995 ; Mann *et al.*, 1998 ; Petit *et al.*, 1999). Les paléoclimatologues estiment par exemple que la teneur en CO<sub>2</sub>, restée relativement constante au cours du millénaire précédant l'ère industrielle (~275 ppmv) a augmenté de 30% depuis 200 ans et atteint aujourd'hui 370 ppmv ; la teneur en CH<sub>4</sub> est double de ses valeurs interglaciaires les plus hautes (B.Moore, 2000). Naturellement, les évolutions constatées ces dernières années sont suivies avec la plus extrême attention ; en ce qui concerne l'Union Européenne, on note par exemple une diminution des émissions de l'ordre de 4% entre 1990 et 1994, mais une remontée d'environ 2% entre 1994 et 1996 (Commission des Communautés Européennes, 1999). Seule une politique extrêmement volontariste permettra de respecter ou même d'approcher les objectifs recherchés.

Les émissions ne sont jamais mesurées directement. Les Parties ont convenu de mesurer des activités et d'attribuer à chacune des facteurs d'émission (cf. tableau 3). Les méthodologies de définition des facteurs d'émission de GES et les méthodes d'estimation des activités sont régulièrement mises à jour par l'OCDE et l'IPCC, ainsi que leurs correspondants nationaux (IPCC, 1996 ; Rivière, 1999).

Le tableau 4 donne les pourcentages d'incertitude concernant les facteurs d'émission et les données d'activités, tels qu'ils ont été publiés dans les Directives pour l'Inventaire des Gaz à Effet de Serre (IPCC, 1996). A noter que pour la culture du riz et les déchets, les incertitudes sont données en fractions de l'incertitude globale.

En ce qui concerne le N<sub>2</sub>O, dont la durée de vie dans l'atmosphère est estimée à 170 ans, les termes principaux du bilan sont connus avec une incertitude encore plus grande (Graedel & Crutzen, 1993). Ces auteurs proposent l'évaluation suivante :

Les composés fluorés sont essentiellement produits par l'activité industrielle ; ils sont extrêmement stables (durée de vie de l'ordre de 50.000 ans), et leur potentiel de réchauffement global est nettement plus élevé que celui du CO<sub>2</sub>. Les informations qui suivent sont extraites de la Communication de la Commission des Communautés Européennes de 1999 et concernent les pays de l'Union Européenne.

- En 1990, 100% des émissions en HFC étaient constitués de HCFC-22, substance qui détruit la couche d'ozone stratosphérique (voir §2.1). Suite à l'application du Protocole de Montréal, ces émissions ont décliné de 99%, mais d'autres HFC ont été utilisés comme produits de substitution ; leurs émissions ont fortement augmenté depuis 1990 ; les projections indiquent qu'en 2010, le niveau d'émission pourrait être 5 fois celui de 1995.
- Les PFC sont principalement produits par l'industrie de fabrication de l'aluminium. En 1990, l'émission était de 11 Mégatonnes en équivalent

CO<sub>2</sub>. Suite aux progrès technologiques, mais aussi au recul de cette activité en Europe, les émissions ont chuté de 55%.

- Le SF<sub>6</sub> est le gaz à effet de serre le plus puissant. Il est émis par diverses industries ; les émissions ont sans cesse été croissantes ; en 1995, 14 Mégatonnes en équivalent CO<sub>2</sub> ont été émises.
- Les paramètres les plus importants à mesurer afin de contrôler les changements concernant les GES seront analysés dans les chapitres suivants.

### 1.3. Un cadre d'étude selon trois approches

On peut identifier les questions sous-jacentes au Manifeste de Baveno à travers trois approches emboîtées :

**Approche (a) : Pour le Protocole de Kyoto.** Le principal défi auquel se trouvent confrontées les Parties au protocole de Kyoto est le suivi des sources et puits des GES, afin de quantifier la réduction des émissions de chaque Partie (en termes de bilan net entre les sources et puits) pendant la période définie. L'approche (a) est une approche de suivi pour la mise en œuvre de l'article 3 du Protocole de Kyoto. Elle implique que les outils pertinents soient disponibles et acceptés au niveau mondial, afin de contrôler le respect du protocole par chaque partie, et de permettre de mettre en place des mécanismes tels que la négociation de permis d'émissions, des crédits basés sur des projets, et les mécanismes pour un développement propre (CDM). Pour traiter ces questions, il n'est pas nécessaire de prendre en considération la dynamique ou les processus de chimie atmosphérique, ni d'utiliser des techniques de modélisation globale. Les émissions et absorptions de GES doivent être évaluées à l'échelle géographique adéquate, en utilisant les paramètres observables appropriés et les modèles spécifiques qui les concernent (par exemple, les flux de CO<sub>2</sub> absorbés par une forêt ne sont pas mesurés directement, mais peuvent être déduits d'informations telles que la superficie, la densité et les espèces d'arbres, l'état phénologique et phytosanitaire, etc.). Cette première approche ne prend en considération ni les conséquences de ces émissions et absorptions de gaz sur l'évolution climatique à l'échelle globale et régionale, ni leurs impacts. La difficulté de la tâche ne doit pas être sous-estimée : il y a actuellement une grande incertitude sur les inventaires des sources et des puits ; néanmoins, une réduction des émissions de 8 % doit pouvoir être réalisée en Europe, et donc mesurée, en 2012 (cette réduction est estimée en "équivalent CO<sub>2</sub>", c'est à dire que les autres gaz sont ramenés à la quantité de CO<sub>2</sub> conduisant à un effet de serre équivalent). Il faut évaluer si les techniques de télédétection, utilisées avec les mesures *in situ* adéquates dans le cadre de modèles appropriés en termes d'échelle et de précision, peuvent permettre d'atteindre ce but. De plus, il convient de remarquer que les mécanismes de mise en œuvre du protocole de

Kyoto, même envisagés dans une perspective aussi limitée, peuvent créer le besoin d'autres informations (par exemple, concernant la capacité à mettre en œuvre des projets dans le cadre du CDM).

**Approche (b) :** Pour la Convention sur le Climat. La deuxième approche concerne également le protocole de Kyoto, mais se place dans une perspective plus large, celle de l'Article 2 de l'UNFCCC (cf. ci-dessus). Elle peut être articulée en deux parties :

**Approche b1.** Les engagements décrits ci-dessus concernant la limitation et la réduction des émissions ne sont pas un objectif en soi. Ils ne sont qu'une façon concertée de limiter l'évolution de la concentration en GES et leurs effets néfastes liés aux changements climatiques induits, le but à long terme étant de stabiliser ces concentrations à des niveaux de sécurité acceptables. Pour une telle évaluation, les techniques de modélisation globale, qui comprennent les mécanismes globaux d'émissions, les phénomènes de transport et la chimie atmosphérique doivent être utilisés. Cette question ne concerne pas seulement le bilan en GES au niveau des Parties, mais aussi le cycle global du carbone (on utilise le mot «cycle» quand un composé spécifique est transporté et conservé sans changement) ainsi que les processus globaux. D'où le lien avec l'étape suivante :

**Approche b2.** Pour obtenir une vision claire de l'impact du Protocole de Kyoto, il faut que les effets réels de sa mise en œuvre sur l'évolution climatique pendant et après la période de référence soient vérifiés et évalués, de même que leurs impacts en termes d'écologie et d'alimentation. De plus, on doit aussi évaluer les impacts physiques de ces changements et leurs effets sur la société. Les zones côtières par exemple sont importantes de ce point de vue : 60 % environ de la population mondiale vit à moins de 100 km de la mer ; ce groupe pourrait être sérieusement affecté par une montée du niveau de la mer. On trouve également de grandes concentrations de populations humaines le long des fleuves ; les changements du régime des eaux fluviales induits par le changement climatique affecteront directement ces populations. Les modifications des cycles hydrologiques et des régimes de vents doivent être estimées afin d'étudier la sécurité alimentaire, l'accès aux ressources en eau et la dissémination des maladies transmises par divers vecteurs. Les prévisions météorologiques saisonnières seront importantes pour stimuler l'adaptation et réduire les effets socio-économiques dus au changement climatique.

Au-delà de ces objectifs de société, l'analyse des impacts peut être utilisée en tant qu'indicateur de l'évolution climatique (montée du niveau de la mer, nombre et superficie des feux de forêt, évolution de la cryosphère et de la désertification, etc.).

Il est nécessaire de développer des technologies appropriées se basant sur des paramètres vérifiables et contrôlables issus de l'observation spatiale de la terre et de données in situ associées pertinentes, ainsi que des techniques validées et adaptées de modélisation et d'assimilation des données.

**Approche (c) : Pour la Science.** La troisième approche est encore plus ambitieuse et va nettement au-delà du Protocole de Kyoto. Elle concerne le suivi global de l'environnement, prenant en compte toutes les contributions au changement global de climat et d'environnement, et son évolution dans le temps – et non seulement l'influence des effets dus aux variations des GES. Une telle approche peut être considérée comme le but final d'un système de suivi global de l'environnement. Il est quasiment impossible de la décrire de façon exhaustive. Toutefois, il est important de prendre en compte l'influence des éléments actuellement hors du contrôle des conventions internationales (protocoles de Montréal, de Kyoto,...), à la fois pour des raisons scientifiques et afin d'ouvrir la voie aux réglementations régionales et internationales à venir. Lors de l'élaboration du présent chapitre, les éléments paraissant importants de ce point de vue (aérosols, couvert nuageux, etc.) seront soulignés.

La compréhension du comportement des différentes composantes du système terrestre et de leurs interactions est l'un des principaux défis actuels de la recherche scientifique sur l'environnement. Il est nécessaire d'effectuer des observations très précises et à long terme de la plupart des paramètres pertinents décrivant les différents éléments du système, afin de garantir une compréhension et une documentation adéquate des interactions et des changements se produisant à différentes échelles spatio-temporelles. Dans ce chapitre, nous considérerons séparément les cycles et processus liés aux terres, aux océans et à l'atmosphère. Des paragraphes spécifiques seront également consacrés à la modélisation globale, et à quelques considérations socio-économiques. La Terre doit être analysée en tant que système global, à travers une approche multidisciplinaire utilisant les mesures faites depuis l'Espace et *in situ*, comprenant les composantes du système terrestre (atmosphère, hydrosphère, cryosphère, géosphère et biosphère). Les observations spatiales ont considérablement augmenté le volume des informations disponibles et leur couverture spatiale et temporelle, ainsi que leur homogénéité et leur fiabilité. Toutefois, les mesures *in situ* restent indispensables, car elles représentent une source indépendante d'informations complémentaires pour l'étalonnage et la validation des informations spatiales, au moyen d'une approche intégrée fondée sur l'assimilation des données par les techniques de modélisation (comme l'ont souligné les conclusions de l'IPCC, par exemple). L'initiative mondiale IGOS se propose de coordonner au plus haut niveau les organismes responsables de systèmes spatiaux

(regroupés dans le CEOS) et de collecte d'informations *in situ* ainsi que de modélisation globale pour assurer l'optimisation des moyens et des investissements associés.

## 2. L'atmosphère

### 2.1. Chimie atmosphérique et bilan radiatif de la Terre

Les molécules des GES présentent des niveaux de transition quantiques de faible énergie (ordre du dixième d'eV), caractéristiques de modes propres liés à leur configuration géométrique (aucune de ces molécules n'est bi-atomique), et correspondant à l'énergie de photons de la gamme de longueur d'ondes de 7 à 13  $\mu\text{m}$  (fenêtre de "l'infrarouge thermique"). L'équilibre thermodynamique de la Terre est fortement lié à l'absorption de ce rayonnement infrarouge par l'atmosphère. Sans cette absorption, la température terrestre serait plus basse de 30 degrés environ. Toute augmentation de concentration en GES tend donc à augmenter la température de surface, en même temps que surviennent des effets contraires, tels que l'influence des aérosols. La concentration dans l'atmosphère de  $\text{CO}_2$  et  $\text{CH}_4$  augmente à un rythme d'environ 0.5 % et 1 % par an, alors que dans le même temps, la température moyenne de surface a augmenté de 0.3 à 0.6 degrés en un siècle. Ce taux a notablement augmenté depuis le début de l'ère industrielle (Briffa *et al*, 1995). Cette tendance semble se poursuivre, malgré des événements exceptionnels, comme l'éruption du Pinatubo, qui auraient dû avoir une influence contraire. Les analyses paléoclimatologiques confirment la forte corrélation existant entre la température d'une part, la concentration en  $\text{CO}_2$  et  $\text{CH}_4$  d'autre part (Graedel *et al*, 1993). Ces chiffres résultent de recoupements de diverses informations et mesures d'origine indépendante et sont généralement admis. Des résultats liés à des mesures à plus court terme, provenant d'une source unique et parfois non optimale pour l'objectif recherché sont plus sujets à caution (Rasool *et al*, 1999).

Pour établir le bilan global du carbone, il est nécessaire de quantifier ou d'estimer les flux entrant dans certains réservoirs ou les quittant, comme par exemple, l'atmosphère, les océans ou les écosystèmes continentaux.

Pour établir le bilan radiatif de l'atmosphère, il est nécessaire de prendre en compte les GES, et notamment le  $\text{CO}_2$  et le  $\text{CH}_4$ .

Le  $\text{CO}_2$  n'est impliqué que dans les processus physiques et biologiques, et non dans les transformations chimiques : il n'est pas détruit dans l'atmosphère par réaction chimique, et de faibles quantités sont produites par l'oxydation du CO et les hydrocarbures. Les sources naturelles et anthropiques de  $\text{CO}_2$  sont énumérées dans le tableau 2.

Le  $\text{CH}_4$  n'est pas créé dans l'atmosphère, mais son puits principal est le mécanisme de perte par le radical

hydroxyle :  $\text{CH}_4 + \text{OH}^\circ \rightarrow \text{CH}_3^\circ + \text{H}_2\text{O}$  (cf. Tableau 3). Il faut souligner ici l'importance des radicaux  $\text{OH}^\circ$  pour la chimie atmosphérique et rappeler que la photolyse de l'ozone conduit à la production de radicaux  $\text{OH}^\circ$ .

Pour calculer le "bilan radiatif du carbone" ( $\text{CO}_2$  et  $\text{CH}_4$ ), trois composantes de base sont nécessaires :

- La détermination de la concentration en  $\text{CO}_2$  et  $\text{CH}_4$  par des mesures directes (réseaux au sol et plates-formes spatiales, permettant également d'analyser la concentration des autres GES). Le réseau primaire existant de stations de mesures au sol peut être complété par de nouvelles stations au sol, qui enregistreraient avec la plus haute résolution spectrale et la plus grande précision possible, les spectres du rayonnement infrarouge thermique montant et descendant, dans les bandes spectrales d'absorption les plus importantes des GES. Ces instrumentations devraient être effectuées sur des stations de mesure convenablement maintenues, comme les stations de premier niveau des services météorologiques. Les mesures depuis l'espace permettent de compléter ces mesures au sol. Compte tenu de la stabilité des composants concernés, quelques jours de mesures effectués tous les 5 à 8 ans pourraient suffire pour les mesures spatiales, qui seraient effectuées à partir de la Navette (ou plus tard de la Station Spatiale Internationale),
- La mesure ou l'évaluation des puits de  $\text{CO}_2$  et  $\text{CH}_4$  au niveau des écosystèmes (cf. § 3.1),
- La mesure ou l'évaluation des sources de  $\text{CO}_2$  et  $\text{CH}_4$  au niveau de chaque écosystème (cf. § 3.1), et pour les sources anthropiques, par les informations socio-économiques telles que les chiffres de consommation de carburants (cf. § 5.1). La connaissance détaillée de ces processus naturels est donc essentielle pour évaluer l'impact des émissions anthropiques. Ainsi, l'approche (c) qui étudie le système terrestre dans son ensemble est-elle essentielle pour comprendre les changements en  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère, et leurs relations avec les processus concernant les océans et les terres.

Pour évaluer la destruction de  $\text{CH}_4$  dans l'atmosphère, il est nécessaire d'effectuer le suivi de la photochimie troposphérique au niveau des gaz (principalement  $\text{O}_3$ , radiations UV et vapeur d'eau). On portera une attention toute particulière sur les régions tropicales où les concentrations en  $\text{OH}^\circ$  sont importantes, et où la circulation atmosphérique transporte les masses d'air des latitudes tempérées vers les latitudes équatoriales (Graedel *et al*, 1993).

Il faut également remarquer que les autres GES pris en compte dans le protocole de Kyoto ( $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{SF}_6$ , PFC, HFC) sont aussi très stables (50.000 ans pour certains de ces derniers !) et ne sont pas impliqués dans la chimie atmosphérique troposphérique. Cette stabilité explique la raison pour laquelle il est si important



d'exercer un contrôle sur les sources et les puits naturels ou anthropiques. Sans vouloir entrer ici dans des considérations détaillées liées à la chimie stratosphérique, et notamment au cycle de l'ozone et au Protocole de Montréal, trois remarques s'imposent cependant :

- La dissociation de l'ozone stratosphérique (dont la formation protège la terre contre le rayonnement solaire ultraviolet au-dessous de 242 nm) est catalysée par certains radicaux, lorsqu'ils peuvent se présenter sous la double forme  $X^\circ$  et  $XO^\circ$ . Le composé  $N_2O$ , très stable dans la troposphère, est oxydé par l'oxygène monoatomique stratosphérique en radicaux  $NO^\circ$  et  $NO_2^\circ$ , conduisant donc à la destruction de l'ozone.
- De la même manière, certains CFC tels que  $CFCI_3$  et  $CF_2Cl_2$  produisent des radicaux  $Cl^\circ$  et  $ClO^\circ$  conduisant au même processus. Les deux processus décrits ci-dessus sont naturellement limités par des réactions de neutralisation conduisant à la production du composé  $ClONO_2$ .
- La disparition particulièrement intense de l'ozone au-dessus de l'Antarctique est un processus complexe, notamment lié à une réaction du type  $ClONO_2 + HCl \rightarrow HNO_3 + Cl_2$ , à la surface de cristaux de glace, dans lequel l'acide nitrique reste à l'état solide (vers  $-80^\circ C$ ), tandis que le chlore se dégage à l'état gazeux et commence à se dissocier en radicaux  $Cl^\circ$  à partir du mois de septembre, lorsque les photons solaires réapparaissent, amorçant ainsi la réaction catalytique décrite ci-dessus, dont le résultat est rendu particulièrement intense régionalement par le confinement de l'air par le vortex circumpolaire.

La mesure et le suivi par observation spatiale de la concentration en ozone stratosphérique sont assurés par divers systèmes actuels ou futurs (TOMS, POAM/SPOT, GOMOS/ENVISAT).

Il convient ici de souligner que, en complément des systèmes d'observations spatiales et implantés au sol, les systèmes aéroportés et les ballons constituent des moyens *in situ* (au sens propre du terme) pour les études de l'atmosphère. Ces moyens sont bien développés en Europe. On notera par exemple en France un avion tel que l'ARAT (Avion de Recherche Atmosphérique et de Télédétection, géré par le CNRS/INSU, le CNES, l'IGN) ; on soulignera également que notre pays est le second au monde pour les activités "ballons" (seul moyen *in situ* pour l'exploration de la haute stratosphère), dont la communauté scientifique participe à de grandes expérimentations conjuguant divers types de moyens telles que la récente campagne INDOEX au dessus de l'océan Indien, et développe des projets ambitieux tels que STRATEOLE pour l'étude du vortex circumpolaire antarctique évoqué ci-dessus. La mise en œuvre de tels systèmes relève le plus souvent d'une approche de type (c).

## 2.2. Synthèse sur le bilan radiatif de la Terre

Actuellement, on dispose de méthodes fiables permettant d'évaluer assez bien, à partir des données satellitales, toutes les composantes du bilan radiatif, ainsi que le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) (cf. les travaux de l'ISLSCP). Ces méthodes prennent en compte les effets des GES (approche (b)), ainsi que ceux des aérosols et des nuages, qui agissent comme modulateurs des champs radiatifs dans l'atmosphère, ainsi qu'à ses limites supérieure et inférieure, par voie de conséquence. Le bilan radiatif au sommet de l'atmosphère, tel que les satellites peuvent l'observer (instrument SCArAB par exemple, ou prochainement GERB sur METEOSAT seconde génération, ou le projet ERM, objet d'une étude de phase A dans le cadre du programme "planète vivante" de l'ESA - Gudmandsen, 1999), est considéré comme un élément clé pour la modélisation globale (cf. ci-après, § 5.2).

L'augmentation des concentrations en gaz à effet de serre est susceptible de forcer le système climatique vers un état plus chaud. Il existe plusieurs estimations de ce réchauffement supplémentaire de l'atmosphère, qui donnent un total de 3 à 5  $Wm^{-2}$ . Les conditions atmosphériques étant présumées toujours statiques dans ces calculs, ceux-ci ne sont donc pas très réalistes. Les modèles globaux de Circulation Générale fournissent des résultats quelque peu différents, car les processus décrivant le système climatique y sont paramétrés de manière très différente. Aucune de ces estimations ne nous fournit d'informations fiables sur les changements de la nébulosité, des trajectoires et l'intensité des orages ou même des températures, ce que montrent par exemple les études de l'AMIP. Mais il est possible – et nécessaire – d'effectuer un suivi permanent, qui devra se fonder sur des plans de travail existants, tels que ceux du GOOS.

Il n'existe aucune chance de mener des recherches ou d'assurer le suivi de changements climatiques régionaux ou globaux grâce aux données provenant des composantes du bilan radiatif planétaire ou au sol, étant donné que ces flux radiatifs proviennent d'origines et de forçages trop différents. Il est toutefois important d'observer quelques composantes individuelles :

*Au sol* : les radiations spectrales descendantes dans le spectre solaire et infrarouge, les aérosols, les propriétés de la couche nuageuse (ex : épaisseur optique), les concentrations en gaz à effet de serre spécifiques,

*A partir des satellites* : les spectres mentionnés ci-dessus, certains types de nuages, les aérosols, la vapeur d'eau par occultation GPS. Divers projets d'observation de ces différents paramètres existent ou sont à l'étude : projet franco-japonais POLDER (Lifermann, 1998), instruments de chimie atmosphérique du satellite européen ENVISAT, projet franco-américain PICASSO-CENA...

Il est à noter de plus que le programme CLIVAR prévoit aussi un suivi permanent de différents paramètres atmosphériques, comprenant également les champs radiatifs, les nuages et les aérosols. Toutefois, il sera impossible de distinguer les variations climatiques "naturelles" de celles "induites par l'effet de serre".

Enfin, indépendamment de l'approche de type "bilan global", il faut que l'utilisation de modèles synthétiques globaux soit reconnue en tant que méthodologie parallèle. Ces modèles visent à comprendre la dynamique atmosphérique et les interactions des processus en ce qui concerne la chimie atmosphérique, l'absorption et l'émission de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> par les écosystèmes.

En conclusion, au-delà des défis liés au Protocole de Kyoto, l'observation de certaines composantes spécifiques du bilan radiatif au sol (mesures *in situ*) ou au sommet de l'atmosphère (par satellite), évoqués brièvement ci-dessus, peut donc permettre de déduire quelques informations individuelles nécessaires à l'approche (b).

### 3. Les terres émergées

Pour des raisons à la fois naturelles et anthropiques, les terres émergées sont au cœur des problèmes abordés par le Manifeste de Baveno et le protocole de Kyoto. L'approche (a) implique une analyse géographique puisque, dans ce cas, les variations des bilans doivent être décrites au niveau de chaque Partie.

Les facteurs socio-économiques et biophysiques sont profondément imbriqués, car les variations en GES sont très liées aux activités humaines sur Terre (quasi exclusivement en ce qui concerne les composés fluorés). Le recueil d'informations explicites sur les sources et puits de GES est un point important des aspects socio-économiques du Protocole de Kyoto, qu'il s'agisse du cycle du carbone (W. Steffen *et al*, 1998), ou du bilan des autres gaz.

#### 3.1. Suivi des écosystèmes

Dans le cadre de l'approche (a), il est nécessaire d'effectuer un suivi des paramètres énumérés ci-dessous. Ceci pourra selon toute vraisemblance être réalisé par des observations spatiales calées sur des observations *in situ* (au moins, pour la plupart de ces paramètres), lorsque le protocole de Kyoto entrera en vigueur. Lorsqu'ils sont pris en compte à l'échelle géographique adéquate, ces éléments sont également des points-clés en ce qui concerne les approches (b) et (c).

1. **Un indice du couvert végétal transformable** en fraction de rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) interceptée par le couvert végétal. Les indices de végétation observables depuis l'espace à diverses résolutions temporelles et spatiales (LANDSAT, SPOT, IRS, NOAA-AVHRR, VEGETATION...) tels que le NDVI

ou SR sont liés à  $f_{PAR}$ , la fraction de PAR, par des relations qui ne semblent pas dépendre du type de végétation.

La Productivité Primaire Nette (NPP) peut alors être calculée proportionnellement à la radiation absorbée :

$$NPP = e f_{PAR} PAR$$

$e$  étant le degré d'efficacité de conversion biologique de la PAR absorbée par la biomasse. Dans certains modèles, il est considéré comme une caractéristique d'un type de végétation, dans d'autres il est calculé selon la formule suivante :

$$e = e_{max} f(SWD) g(VPD) h(T) i(C_a)$$

où  $e_{max}$  est la valeur maximum de  $e$  et  $f$ ,  $g$ ,  $h$  sont des facteurs de pondération (entre 0 et 1) qui prennent en compte l'effet du déficit en eau du sol SWD, le déficit de pression de vapeur d'eau dans l'air VPD et les températures non-optimales  $T$ . La fonction  $i(C_a)$  dépend de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub>  $C_a$ .

Dans des modèles plus complexes,  $e$  est calculé suivant un modèle détaillé de photosynthèse du couvert végétal et de respiration des plantes.

La Productivité Nette de l'Ecosystème NEP est le flux net intégré de CO<sub>2</sub> entre un écosystème et l'atmosphère. Il dépend non seulement de la NPP, mais aussi de la respiration hétérotrophique  $R_h$ :

$$NEP = NPP - R_h$$

$R_h$  dépend principalement des déchets, des matières organiques contenues dans le sol, de la température et de l'humidité du sol, mais n'est pas directement mesurable par satellite. On la calcule habituellement suivant un modèle de matière organique contenue dans le sol.

Actuellement, NOAA-AVHRR et VEGETATION fournissent des informations NDVI globales avec une bonne résolution temporelle (typiquement, une semaine pour une scène par temps clair), et une résolution spatiale d'un km environ. Ceci est dans l'ensemble suffisant pour les études globales sur le bilan du carbone. Les régions comme l'Europe ont toutefois besoin d'obtenir des informations ayant une meilleure résolution spatiale tout en gardant la même résolution temporelle, pour permettre par exemple le suivi des productions agricoles. Le système russe MSU-SK/RESURS, ainsi que le système MODIS/TERRA, le futur système MERIS/ENVISAT et certains projets à moyen terme du CNES tendent à répondre à ces besoins.

2. **Un indice du contenu en azote du couvert végétal**, qui est fortement corrélé à sa capacité de photosynthèse. Quelques tentatives ont été faites pour déduire cet indice de la réflectance dans le moyen infrarouge (entre 1500 et 2000 nm), mais il peut être difficile d'établir une relation générale valable pour des types de végétation différents. Il est également possible de déduire en premier lieu le contenu en chlorophylle du couvert végétal de la réflectance dans le spectre optique (en utilisant un modèle des propriétés optiques des feuilles) et de le corrélérer avec le contenu en azote.

Cette méthode pourrait fonctionner mais devrait être vérifiée sur plusieurs types de couvert végétal.

3. **Un indice d'activité photosynthétique.** Il est bien de connaître le couvert végétal, mais il serait mieux de savoir s'il souffre ou non de stress. Ceci s'applique en particulier aux forêts qui gardent longtemps leurs feuilles, et répondent au stress hydrique par la fermeture de leurs stomates bien avant de perdre leurs feuilles. Dans ce but, plusieurs solutions ont été étudiées. La température (radiation thermique) n'est pas une donnée très sensible pour les forêts « fermées » dont la température de surface n'augmente pas de plus de 3° lorsque les stomates se ferment. La prise en compte de la fluorescence de la chlorophylle est une solution possible, mais qui demande l'utilisation des raies de Fraunhofer et sa faisabilité reste à prouver. Cette solution doit néanmoins être explorée. Entre temps, il est possible d'utiliser les changements de réflectance dans le spectre 500-550 nm, qui reflète les changements dans la composition caroténoïde des feuilles (ce que l'on appelle le cycle xanthophylle). Ceci nécessite un capteur à plusieurs bandes (10 nm ?) dans ce spectre, ce qui sera prochainement disponible (instruments MERIS/ENVISAT et MODIS/TERRA).

4. **Un indice de biomasse par surface au sol pour les forêts.** On a essayé avec succès d'obtenir cet indice au moyen de la diffusion radar dans la bande P (longueur d'ondes d'environ 0.6 m), pour un certain type de forêt et pour une biomasse inférieure à 150 t.ha<sup>-1</sup> environ. Toutefois, on ne sait pas si cette relation est généralisable. Une autre approche intéressante consiste à mesurer la hauteur de la végétation par Lidar. Un capteur américain (Vegetation Canopy Lidar, VCL) devrait être lancé en l'an 2000. La biomasse est liée à la hauteur pour une partie importante du cycle de croissance des forêts.

5. **D'autres variables** sont assez intéressantes pour le cycle du carbone. Le contenu du sol en carbone et en azote est un paramètre important. Toutefois, il ne semble pas mesurable par satellite. L'humidité de la surface du sol est également assez intéressante, et peut être déduite de mesures radar. L'humidité du sol influence sa capacité à agir en tant que puits de méthane ; d'autre part, le réchauffement global fait fondre le permafrost, ce qui constitue une importante source de méthane. Le projet SMOS, développé par le CESBIO, retenu comme "mission d'opportunité" du programme "planète vivante" de l'ESA, se propose d'atteindre de tels objectifs. Sa résolution spatiale n'est pas assez fine pour satisfaire tous les besoins exprimés ici, en particulier en ce qui concerne l'approche (a), mais c'est une tentative importante dans cette direction.

Les principales sources de méthane susceptibles d'être déterminées par les techniques d'observation de la terre sont les rizières et les marécages (cf. tableaux 3 et 4). La cartographie des marécages a été entreprise

dans le cadre du programme IGBP-DIS (Darras et al, 1999). Il est toutefois difficile de déterminer quantitativement les flux réels de méthane, qui impliquent des processus biochimiques complexes. La détermination des flux concernant d'autres sources sont étroitement liés aux paramètres socio-économiques (cf. §2.2).

### 3.2. Changement dans l'utilisation et la couverture des sols

Les changements dans l'utilisation des sols sont, avec l'activité industrielle, la principale cause anthropique de modification du bilan des GES, et méritent donc une attention particulière (Adger *et al*, 1994 ; Estes *et al*, 1999 ; Henderson-Sellers, 1994 ; Houghton, 1994 ; Meyer *et al*, 1994 ; Turner II, 1994). Les besoins en informations concernant l'utilisation et la couverture des sols afin de contrôler le bilan en gaz carbonique ou les émissions de méthane et de protoxyde d'azote sont bien différents. Dans le premier cas (CO<sub>2</sub>), on a surtout besoin de données sur les changements de biomasse pour les écosystèmes forestiers et les tourbières. Dans le second cas (CH<sub>4</sub> et secondairement N<sub>2</sub>O), on a besoin d'informations détaillées sur les pratiques de culture et d'élevage (utilisation d'intrants, fumure, irrigation, etc.).

Pour ce qui est de l'utilisation et de la couverture des sols, on peut distinguer quatre besoins primordiaux en matière d'informations :

- Une carte de référence du couvert végétal,
- L'évaluation quantitative des transformations et des modifications du couvert végétal,
- Le suivi des perturbations du paysage, plus particulièrement pour les écosystèmes forestiers (ex : incendies, orages, maladies, etc.) et du taux de régénération du couvert végétal après ces perturbations,
- Des informations sur les pratiques d'utilisation des sols (type de gestion de la forêt, pratiques agricoles, utilisation d'intrants, etc.).

Les informations sur les pratiques sylvicoles sont essentielles pour comprendre le rôle des forêts dans le cycle du carbone. Par exemple, on voudrait obtenir des informations sur *les pratiques de conservation de la forêt* (protection, conservation et exploitation durable de la forêt, politiques visant à réduire le taux de déforestation et la dégradation des forêts), *les pratiques de gestion des stocks* (le stockage de carbone dans les forêts lié à une augmentation de la zone forestière, des rotations plus longues, des densités d'arbres plus élevées et une meilleure préservation des produits du bois) et *les pratiques de gestion de produits de substitution* (utilisation de biocarburants exploitables durablement). De telles données ne peuvent pas être estimées par la télédétection. Elles ne sont pas habituellement disponibles en tant que données géoréférencées.

La conséquence des points ci-dessus est que l'incertitude relative la plus élevée pour l'évaluation de

l'émission de gaz carbonique concerne le facteur "changement dans l'utilisation des sols et sylviculture" (LUCF) (cf. tableau 4). Pour l'étude de l'évolution des puits de carbone liée aux changements dans l'utilisation des sols, le problème de l'évaluation de la situation pour l'année de référence 1990 doit être résolu. L'observation de la Terre n'est pas seulement une activité tournée vers l'avenir et destinée à assurer un suivi après l'an 2000, elle répond également à un besoin d'archivage (LANDSAT, SPOT et plus marginalement ERS) afin d'évaluer la situation pour les années de référence du Protocole de Kyoto.

Le pourcentage d'incertitude sur l'estimation de l'émission globale de méthane due aux activités humaines est aujourd'hui évalué à 30 % environ. Les estimations des sources sont incertaines, principalement à cause du manque de facteurs d'émission représentatifs. Il est nécessaire d'améliorer les données concernant les activités dans le secteur du LUCF, en particulier pour les pays en voie de développement. Par exemple, le taux d'émission de méthane par les rizières est très incertain. Pour cette activité, les informations nécessaires comprennent des données sur les zones de rizières et les périodes d'inondation. Toutefois, l'incertitude la plus grande provient de facteurs variés et très imbriqués, tels que la variété de riz, les propriétés du sol, la température, la présence de microbes, les pratiques de fertilisation par les agriculteurs locaux, etc.

Afin de satisfaire les besoins de l'approche (a), les informations doivent être explicites au plan spatial et leur résolution spatiale doit être assez fine (quelques dizaines de mètres). Il faut aussi que les informations soient quantitatives, non seulement en termes de surfaces concernées, mais aussi en termes de changements de biomasse et des flux impliqués. Seule une combinaison de données issues des systèmes de télédétection, des inventaires forestiers effectués sur place, de données expérimentales issues de parcelles échantillons, et de données socio-économiques détaillées sur les pratiques de gestion et les facteurs technologiques permettra de satisfaire les besoins en informations concernant le changement dans l'utilisation et la couverture des sols pour la période post-Kyoto.

Certains modèles globaux de changements dans l'utilisation des sols calculent les taux de ces changements à venir en fonction des facteurs socio-économiques et de leurs interactions avec les processus biophysiques. Bien que ces modèles soient utiles pour la conception de scénarios globaux, la valeur de leurs prévisions est limitée. En fait, ces modèles ne sont pas encore très fiables en termes de projections à long terme. En effet, de nombreux facteurs tels que les changements institutionnels, technologiques ou politiques interfèrent de façon significative avec les facteurs les plus facilement prévisibles de changement dans l'utilisation des sols. Les modèles de changement dans l'utilisation des sols

ne sont pas encore tout à fait opérationnels non plus en ce qui concerne la prévision des caractéristiques spatiales des changements et la prise en compte de l'hétérogénéité spatiale. Toutefois, un effort considérable est actuellement consacré à la conception de modèles robustes de changement dans l'utilisation des sols.

### 3.3. Synthèse

En synthèse globale de ce chapitre 3, les outils spatiaux nécessaires en priorité sont d'une part les systèmes à haute résolution (optiques et radar) permettant une définition précise de l'occupation du sol et de ses changements sur une base typiquement annuelle, et d'une part des systèmes d'observation à moyenne résolution (typiquement hectométrique à kilométrique) des caractéristiques de la végétation et plus généralement des écosystèmes listées au § 3.1 sur une base typiquement décadaire. Un certain nombre de modes complémentaires d'observation (radar en bande P, lidar, microondes passives, mode hyperspectral dans certaines régions du spectre...) ont également été évoqués. Les principaux systèmes spatiaux d'observation actuels et futurs pouvant répondre à ces besoins ont été évoqués plus haut. Ces données doivent être couplées à des informations *in situ* de nature très diverse, dont certaines ont été évoquées ci-dessus. Ces informations peuvent être directement reliées localement aux paramètres à mesurer (tours permettant la mesure de flux de carbone, analyses aéroportées), être relatives à des paramètres physiques (densité du couvert forestier,...) ou à des facteurs socio-économiques permettant de remonter plus indirectement et de façon plus délicate aux paramètres d'intérêt (pratiques culturelles,...). Les données spatiales et *in situ* sont généralement mises en œuvre à travers des modèles adéquats. Cette technique est en perpétuelle évolution, souvent de manière itérative ; les résultats de ces modélisations, après validation, permettent d'établir de nouveaux équilibres entre besoins en informations d'origine spatiale et *in situ*, en termes de précision, d'opérationnalité et de coût. Les modèles mis en œuvre doivent être pertinents, notamment en termes de précision et d'échelle spatio-temporelle. Il convient notamment de disposer de modèles pertinents à l'échelle des régions (au sens européen du terme). Ce n'est actuellement pas réellement le cas (Menaut, 1999, communication personnelle). L'attention s'est surtout concentrée jusqu'à une date récente soit vers les modèles locaux, ou relatifs à des phénomènes spécifiques (Lacaux *et al*, 1991, 1993), soit vers les modèles globaux ou relatifs à de très grandes étendues (Bicheron *et al*, 1998 ; Dedieu *et al*, 2000 ; Maisongrande *et al*, 1995 ; Houghton *et al*, 1993 ; Lafont *et al*, 1999 ; Lambin, 1997 ; Ruimy *et al*, 1994, 1995, 1996), généraux ou relatifs à certains types d'écosystèmes (Dixon *et al*, 1994 ; Le Dantec *et al*, 2000 ; Rotmans *et al*, 1991, Skole *et al*, 1993). Ce

