

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. BEGNI¹ - M. HA DUONG² - J.P.LACAUX³ - E. LAMBIN⁴ - H. LE TREUT⁵ - A. MOREL⁶, E. RASCHKE⁷ - B.SAUGIER⁸ - P.VELLINGA⁹, A.G.DEKKER⁹, H. VAN DER WOERD⁹, J. GUPTA⁹ - S. ZERBINI¹⁰.

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

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

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

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

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

⁶ LPCM, Observatoire Océanologique - B.P. 8 - 06230 Villefranche sur Mer - France

⁷ Institut für Atmosphärenphysik, GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Postfach_1160 - D-21494 Geesthacht - Germany

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

⁹ Institut voor Milieuvraastukken, c-66, de boelelaan - 1115, Amsterdam - The Netherlands

¹⁰ 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 Europe¹ 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.

¹ 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 (CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs et SF₆) 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 CO₂ et CH₄. 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
Puits	
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 CO₂ sont exprimées en Gigatonnes de carbone par an (IPCC, 1994)

Sources	Tg(CH ₄)/an
Naturelles	
• Zones marécageuses	115 (55-150)
• Termites	20 (10-50)
• Océans	10 (5-50)
• Autres	15 (10-40)
Anthropiques	
• 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)
Puits	
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 ¹⁴CH₄ à ¹²CH₄

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

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

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

Tableau 5 : Estimation des sources et puits de N₂O 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 CO₂, 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 CH₄ 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 N₂O, 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 CO₂. 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

CO₂. Suite aux progrès technologiques, mais aussi au recul de cette activité en Europe, les émissions ont chuté de 55%.

- Le SF₆ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂", c'est à dire que les autres gaz sont ramenés à la quantité de CO₂ 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

