

# Chapitre 1

## Introduction

### Sommaire

---

1.1	Préambule : les changements de la composition atmosphérique	14
1.2	Le système de systèmes GEOSS . . . . .	15
1.3	Objectifs et plan de cette thèse . . . . .	18

---

## 1.1 Préambule : les changements de la composition atmosphérique

L'atmosphère, enveloppe gazeuse de la Terre, est très mince en comparaison du rayon du globe. Sa présence est pourtant essentielle à la vie sur Terre. L'air sec est composé à 78,09% d'azote ( $N_2$ ), 20,95% d'oxygène ( $O_2$ ), 0,93% d'argon ( $Ar$ ) et de 0,03% d'autres gaz dits en traces. Ces gaz en traces, bien que minoritaires, jouent un rôle primordial. Ils participent à de nombreuses réactions photochimiques et déterminent certaines propriétés optiques de l'atmosphère. Par exemple, l'ozone ( $O_3$ ) stratosphérique régule la quantité de rayonnement ultraviolet atteignant la surface. La vapeur d'eau ( $H_2O$ ), le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ), avec d'autres gaz actifs dans l'infrarouge, sont responsables de l'effet de serre naturel qui détermine *in fine* la température à la surface de la Terre. D'autres gaz, les polluants, peuvent être nocifs pour les plantes, les animaux et l'être humain. Ainsi, les modifications dans la distribution globale des gaz en traces peuvent avoir un impact important sur notre environnement.

Un problème environnemental majeur s'est posé dans les années quatre-vingts avec la diminution globale de l'épaisseur de la couche d'ozone et la formation saisonnière d'un trou d'ozone au-dessus de l'Antarctique. Grâce à sa forte absorption dans l'ultraviolet, l'ozone protège la biosphère des effets nocifs du rayonnement solaire de courte longueur d'onde. La constatation de la destruction de cet ozone stratosphérique et le danger que cela représente ont vivement alerté la communauté internationale. En 1987, le protocole de Montréal [*Montreal Protocol*, 1987] fut adopté, interdisant la production et l'utilisation de plusieurs substances responsables de la destruction de l'ozone, dont les chlorofluorocarbones (CFC). Les modèles numériques actuels prévoient un retour à la normale de l'ozone stratosphérique vers 2050 [*WMO*, 2007] si ces mesures sont respectées. La fiabilité de ces prévisions est cependant limitée par l'existence de mécanismes de couplage complexes avec le système climatique, par le problème du réchauffement global et ses implications sur le système stratosphérique et par l'incertitude sur les hypothèses sur lesquelles se basent ces modèles (évolution réelle des émissions, ...)

Un autre enjeu environnemental, celui de l'augmentation de l'effet de serre et du réchauffement climatique, est actuellement le plus médiatisé. Depuis le début de l'ère industrielle, les quantités de dioxyde de carbone, de méthane ( $CH_4$ ) et d'hémioxyde d'azote ( $N_2O$ ) dans l'atmosphère ont fortement augmenté. Cette augmentation est liée aux activités humaines telles que l'utilisation massive des carburants fossiles, l'intensification de l'agriculture et la déforestation. Une conséquence de l'augmentation dans l'atmosphère de la quantité de ces gaz, dits à effet de serre, est l'augmentation de la température à la surface. Celle-ci a déjà augmenté de  $0,5^\circ$  au cours du siècle passé. Les mesures prises dans le cadre du protocole de Kyoto [*Kyoto Protocol*, 1997], entré en vigueur en 2005, visent à diminuer les émissions de gaz à effet de serre. Elles restent cependant très limitées et les modèles de prévision climatique montrent que la température moyenne à la surface augmentera probablement encore de  $1$  à  $2^\circ$  au cours des cinquante prochaines années [*IPCC*, 2007]. Cette perturbation anthropique de l'équilibre climatique de la Terre entraîne potentiellement d'autres

changements, comme la fonte des glaciers et des calottes polaires, la montée du niveau des océans, la désertification de certaines régions, une pénurie d'eau potable, la modification de la faune et de la flore, une intensification des phénomènes météorologiques extrêmes, ... Certains de ces changements sont déjà en cours. La limitation des émissions et la préparation aux éventuelles conséquences écologiques et humanitaires du réchauffement planétaire font partie des grands défis du 21ème siècle.

Le problème de la qualité de l'air est un autre enjeu environnemental majeur. L'environnement des grandes villes et des zones industrielles est de plus en plus pollué. Cette pollution est à l'origine de problèmes de santé, notamment respiratoires, plus fréquents et répandus. Il n'est d'ailleurs plus rare de voir les autorités prendre des mesures comme la limitation de la vitesse sur autoroute lorsqu'un pic de pollution est annoncé. Ce problème prend une bien plus grande ampleur dans les pays en plein développement industriel et dont la démographie est très élevée, comme la Chine et l'Inde. Pour pouvoir prévenir et agir, une surveillance constante de la qualité de l'air est nécessaire.

Ces menaces environnementales et bien d'autres encore justifient une surveillance globale et continue de la composition de l'atmosphère et en particulier d'une liste de composés et de paramètres définis comme prioritaire divers comités et programmes sous l'égide des Nations Unies et de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM; *en anglais, World Meteorological Organisation, WMO*). Il s'agit des gaz en traces comme l'ozone, les gaz à effet de serre, la vapeur d'eau, les oxydes d'azote, les composés halogénés,..., des aérosols, et de la pression et de la température.

## 1.2 Le système de systèmes d'observation globale de la Terre GEOSS

Face aux enjeux environnementaux, la communauté internationale du GEO (*Group on Earth Observations*, composé actuellement de 77 gouvernements, de la Commission Européenne et de 56 organisations intergouvernementales, internationales et régionales dont l'OMM) a commandité l'implémentation d'un système de systèmes d'observation globale de la Terre (GEOSS, *Global Earth Observation System of Systems*, <http://www.earthobservations.org>). De nombreux instruments d'observation de la Terre existent à l'heure actuelle, comme par exemple les instruments de mesure de la composition atmosphérique, mais aussi d'observation par imagerie des océans, de la cryosphère ou encore de l'utilisation du sol. L'objectif du GEOSS est d'exploiter les synergies potentielles de ces systèmes d'observation de la Terre et de fournir une information intégrée et fiable qui permettra de prendre des décisions bénéfiques pour la société. Neuf thèmes ou "domaines de bénéfice sociétal" (*Societal Benefit Areas*) du GEOSS ont ainsi été définis : les catastrophes, la santé, l'énergie, le climat, l'agriculture, les écosystèmes, la biodiversité, l'eau et la météorologie. En pratique, l'implémentation du "système de systèmes" GEOSS revient à établir des liens entre les systèmes d'observation existants, à identifier les lacunes d'observation actuelles et à mettre en oeuvre de nouveaux systèmes répondant à ces lacunes. Le GEOSS fournira

ainsi un point d'accès unique à des données multi-disciplinaires et à des images pertinentes concernant toutes les parties du globe. Il favorisera également la définition de normes et de méthodes permettant de combiner les observations provenant de centaines d'instruments différents en des jeux de données harmonisés. Le concept du système d'information du GEOSS est schématisé à la figure 1.1. Les informations fournies par le GEOSS devraient par exemple permettre de mieux protéger la biodiversité, mieux gérer les ressources d'eau potable en Afrique, déterminer les meilleures routes d'accès et évaluer les dégâts lorsqu'un tremblement de Terre touche une région particulière, ou encore améliorer les prévisions sur l'évolution du climat.

Au niveau européen, le projet GEOmon (*Global Earth Observation and Monitoring of the Atmosphere*), intégré au 6ème programme cadre de la Commission Européenne, constitue une première contribution observationnelle à l'implémentation du GEOSS. Son objectif est la mise en place d'un système d'observations systématiques et coordonnées des gaz à effet de serre, des gaz réactifs, des aérosols et de l'ozone au niveau européen. Il devrait permettre une optimisation de la politique environnementale européenne concernant les changements de la composition de l'atmosphère. Une des tâches explicites de GEOmon, coordonnée par l'IASB (Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique), est de définir et développer les outils nécessaires à l'intégration des mesures satellitales avec celles résultantes des réseaux au sol. Dans le cadre de la participation belge aux projets de l'Agence Spatiale Européenne (ESA, *European Space Agency*), le projet ProDEx SECPEA (*Space-based Exploration of the Chemistry and Physics of the Earth's Atmosphere*), lui aussi coordonné par l'IASB, complète ces études GEOmon avec une tâche dévolue plus particulièrement à l'assimilation des observations satellitales dans les modèles de prévision et d'analyse numérique de la composition de l'atmosphère.

Ces études répondent aux attentes de la stratégie internationale IGACO (*Integrated Global Atmospheric Chemistry Observation, WMO 2004*) définie en 2004 par un consortium d'organisations intergouvernementales et qui participe de l'implémentation du GEOSS. IGACO prône l'intégration des différents instruments de mesure dans un système d'observation globale de l'atmosphère terrestre de manière à exploiter la complémentarité des différents jeux de données. Une diversité d'instruments et de techniques de mesure depuis le sol et embarqués à bord de satellites, de ballons et d'avions existe actuellement. Chacune de ces techniques offre ses avantages mais comporte aussi ses limitations. En fonction de sa géométrie de visée, de sa gamme spectrale ou encore de sa source de rayonnement, chaque instrument de mesure permet de sonder différents aspects d'une atmosphère variable et structurée. Les réseaux au sol composés de stations réparties dans le monde ou dans des régions spécifiques et équipées de différents d'instruments de mesure de la composition atmosphérique sont un premier exemple. Ces réseaux permettent de mesurer, entre autres, la concentration de certains gaz au niveau du sol et leur distribution verticale souvent jusqu'à la moyenne stratosphère. La facilité d'accès et de maintenance des instruments permet de maintenir une stabilité de la qualité des mesures dans le temps. Les mesures par télédétection depuis un satellite permettent d'accéder à différentes gammes d'altitude partant de la colonne troposphérique à la distribution verticale de certains gaz dans la mésosphère. Les mesures par satellite avec une géométrie de visée vers le sol (nadir) offrent un échan-



FIG. 1.1 – Concept du système d'information du GEOSS.

tillonnage géographique complet du globe en quelques jours. Les instruments satellitaires souffrent, cependant, d'une importante dégradation dans un environnement spatial agressif. Cette dégradation altère progressivement la qualité des mesures et la sensibilité de l'instrument aux structures atmosphériques. Les instruments satellitaires ont par conséquent une durée de vie limitée.

Bien que recommandée, l'intégration des mesures provenant d'instruments totalement différents n'est pas évidente. On peut penser, par exemple, aux défis lancés par le couplage de séries temporelles provenant d'instruments plus anciens avec celles de mesures récentes provenant d'instruments d'une conception moderne différente. De même, le couplage de mesures effectuées dans des domaines spectraux distincts, allant de l'ultraviolet à l'infrarouge, est délicat. La comparaison de mesures de profils atmosphériques provenant de satellites, dont la géométrie de visée tangente à l'atmosphère (limbe) permet une haute résolution verticale, avec des mesures, dont la géométrie de visée au nadir ne permet qu'une faible résolution verticale, pose un autre type de problème. Divers moyens sont proposés pour l'intégration des éléments du système d'observation globale : l'amélioration des algorithmes d'inversion des données atmosphériques à partir des mesures spectroscopiques en vue d'en homogénéiser la qualité, le développement de techniques pour faciliter la comparaison de différentes observations, leur validation continue et à l'échelle globale, le développement de techniques pour le couplage des séries temporelles pour l'étude de tendances et le développement d'outils pour faciliter et améliorer l'ingestion des mesures dans les modèles d'assimilation permettant d'obtenir une vue globale et unifiée de l'atmosphère.

### 1.3 Objectifs et plan de cette thèse

Le travail de recherche présenté dans cette thèse s'inscrit dans le cadre général de l'étude des changements de la composition atmosphérique et contribue, en particulier, à l'effort international pour la mise en place du système d'observation globale de l'atmosphère. Réalisés dans le cadre de la stratégie internationale IGACO, du projet GEOMon et du projet SECPEA, nos travaux portent sur le développement de méthodes et d'outils utiles à l'intégration des mesures de la composition atmosphérique, et en particulier du profil vertical de l'ozone, dans un système global de veille de la composition atmosphérique. Les méthodes et concepts que nous développons sont variés et touchent aux différents axes prioritaires de la stratégie d'intégration : l'amélioration des algorithmes d'inversion, la caractérisation du contenu d'information des mesures, le développement de techniques facilitant la comparaison des mesures, la validation continue des données satellitales, le développement d'outils pour faciliter et améliorer le couplage des séries temporelles et l'ingestion des observations dans les modèles numériques de chimie et de transport.

Nous débutons ce manuscrit par deux chapitres généraux de mise en contexte. Dans le chapitre 2 nous introduisons les notions générales de chimie et de dynamique atmosphériques utiles à la bonne compréhension de notre travail. Ce chapitre est axé sur les grands changements de la composition atmosphérique et en particulier sur la distribution verticale de l'ozone et sa variabilité, la plupart de nos études portant sur les mesures du profil de l'ozone. Le chapitre 3 continue cette introduction générale en présentant les différents aspects théoriques de la télédétection spatiale. Nous y abordons les problèmes de transfert radiatif dans l'atmosphère et d'inversion de données atmosphériques à partir des spectres électromagnétiques enregistrés par les instruments de télédétection. Finalement, nous donnons une brève description des différents instruments étudiés dans la suite du travail.

Le chapitre 4 est le premier chapitre présentant les résultats de notre travail de recherche à proprement parler. Nous y présentons une étude en profondeur du contenu d'information du profil d'ozone inversé à partir de mesures satellitales du spectre ultraviolet et visible de la lumière solaire rétrodiffusée par l'atmosphère (mesures BUV, *Backscattered Ultraviolet*). Les mesures de type BUV ont débuté en 1978 avec la série de spectromètres américains TOMS et SBUV, suivi de SBUV/2. En 1995, une série européenne d'instruments du même type a été lancée avec GOME, puis SCIAMACHY, OMI et GOME-2. Plus récemment, la Chine a également commencé ce type de mesures avec la série FY-3 SBUS/TOU. Avec une série temporelle dépassant actuellement 30 ans, les mesures de type BUV constituent un des principaux éléments du système d'observation global de l'atmosphère. C'est pourquoi nous nous intéressons à l'instrument GOME (*Global Ozone Monitoring Instrument*), premier instrument européen de type BUV. GOME fut lancé en 1995 à bord de la plateforme ERS-2. Ses mesures étaient initialement destinées à l'inversion de la colonne totale de l'ozone, du  $NO_2$  et d'autres gaz en traces. Elles contiennent également une information sur la distribution verticale de l'ozone. Des profils à basse résolution verticale ont ainsi pu être inversés grâce à l'algorithme OPERA (Ozone Profile Retrieval Algorithm) développé par l'institut météorologique des Pays-Bas (KNMI). Cet algorithme est basé sur une modélisa-

tion complète du transfert radiatif à travers l'atmosphère et sur un algorithme d'inversion d'estimation optimale. Nous analysons le contenu d'information des profils inversés et son évolution au long de 8 années de mesures. Nous déterminons ensuite l'utilité du jeu de données pour différentes applications scientifiques.

Le chapitre 5 s'intéresse à une technique différente et complémentaire de mesure de profils verticaux de la composition atmosphérique basée sur une géométrie de visée au limbe. Des spectromètres à visée tangentielle à l'atmosphère ont été mis en orbite depuis la fin des années septante et ce type d'instruments constitue un autre élément important du système d'observation global de l'atmosphère. On peut citer, par exemple, les instruments d'occultation solaire SAGE II/ERBS et HALOE/UARS et ceux basés sur la mesure de l'émission thermique ou de la diffusion UV-visible. La mesure au limbe permet d'obtenir des profils de la composition atmosphérique à une résolution verticale de l'ordre de 1 à 3 km. La résolution horizontale de ce type de mesure est, par contre, limitée par la longueur du chemin optique à travers l'atmosphère. Selon la gamme spectrale de l'instrument les mesures au limbe donnent en outre accès au profil de la concentration de différentes molécules. Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'instrument MIPAS (*Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding*) lancé en 2002 à bord de la plateforme européenne Envisat. MIPAS est un spectromètre infrarouge à Transformée de Fourier et mesure l'émission thermique du limbe de l'atmosphère. Nous étudions en détail la résolution horizontale de ces mesures et développons des outils permettant de la prendre en considération lors de la validation et de l'assimilation chimique des observations. Le chapitre 6 met ces outils en pratique pour la validation géophysique des profils d'ozone inversés à partir des mesures de MIPAS. La validation des mesures satellitales est une étape essentielle à l'intégration des différents éléments du système d'observation globale de l'atmosphère. Nous présentons pour MIPAS une étude originale du bilan d'erreur total de la comparaison et étudions notamment la contribution due au lissage des gradients horizontaux présents dans la masse d'air sondée par l'instrument.

Dans les deux chapitres suivants nous nous intéressons non plus aux éléments du système d'observation global de l'atmosphère séparément mais à leurs possibilités de couplage. Le chapitre 7 propose d'abord une étude de la consistence entre sept jeux de profils d'ozone obtenus, au cours des vingt dernières années, à partir des principaux instruments à géométrie de visée au limbe. Pour cette analyse multi-mission, nous utilisons les réseaux au sol comme standard de transfert entre des jeux de données couvrant des périodes temporelles et des zones géographique différentes. Nous confrontons les structures temporelles, verticales et méridiennes des différents jeux de données satellitales à la référence commune offerte par les réseaux d'ozonosondes et de lidars. Cette analyse met en évidence certains problèmes à aborder afin d'obtenir un jeu de données harmonisé sur l'évolution de l'ozone à long terme.

Le chapitre 8 étudie les perspectives offertes par un système de conception résolution différente : le réseau neuronal. Durant sa phase d'entraînement, le réseau neuronal NNORSY, développé par le centre pour l'énergie solaire de Stuttgart (ZSW), approxime la relation statistique entre des spectres GOME et un jeu de profils d'ozone coïncidents provenant d'ozonosondes et des satellites à visée au limbe. Le réseau neuronal combine

donc l'information provenant de ces différents jeux de données pour générer un nouveau profil d'ozone. Ce système d'inversion, basé sur des méthodes statistiques, ne nécessite plus la modélisation, ni même la compréhension de la physique du transfert radiatif dans l'atmosphère. Il permet également d'accélérer considérablement les procédures d'inversion. Nous en étudions les apports et limitations dans le cadre de l'implémentation du système d'observation global de l'atmosphère.

Le chapitre 9 conclut ce travail et met en perspective nos différents résultats.