

Chapitre 9

Conclusion

Les rejets massifs de gaz et de particules fines liés aux activités anthropiques comme l'industrie, le transport, l'agriculture intensive, l'urbanisation et la consommation des ménages, modifient la distribution des gaz en traces dans l'atmosphère. Ces changements de la composition atmosphérique représentent une menace environnementale et sanitaire. La destruction de la couche d'ozone qui protège la biosphère du rayonnement solaire ultraviolet nocif, le réchauffement climatique et la pollution de l'air aux abords des grandes villes et des zones industrielles sont parmi les principaux problèmes actuels. La nature globale et à long terme des enjeux environnementaux et économiques soulevés par les changements de la composition atmosphérique en justifie une surveillance globale et continue. Plusieurs types d'instrument permettant de mesurer à distance la concentration de certains gaz dans l'atmosphère ont été développés et déployés tant au sol que sur ballon et sur satellite. Chaque technique de télédétection possède ses spécificités et permet de sonder différents aspects d'une atmosphère variable et structurée. En effet, l'information géophysique accessible à un instrument donné dépend fortement des paramètres d'observation, certains variant avec le temps et la latitude. La source de rayonnement (le soleil, l'émission atmosphérique, les étoiles,...), la géométrie sous laquelle ce rayonnement est observé (lumière qui quitte l'atmosphère tangentiellement ou verticalement), la gamme spectrale, le champ de vue de l'instrument et l'inclinaison de l'orbite pour les satellites sont quelques-uns de ces paramètres qui, tous ensemble, déterminent la gamme de sensibilité verticale, la couverture et l'échantillonnage géographique et temporel, et la résolution horizontale et verticale des données atmosphériques inversées à partir des mesures de télédétection. Les réseaux d'instruments au sol assurent la surveillance à long terme de la composition atmosphérique à diverses stations réparties dans le monde ou dans des régions particulières. Ils donnent généralement accès aux concentrations au sol et à la colonne ou distribution verticale de certains gaz jusqu'à la moyenne stratosphère. La télédétection à partir de plateformes satellitaires permet d'accéder à d'autres gammes d'altitude depuis la colonne verticale et/ou troposphérique de certains gaz, à leur distribution verticale depuis la tropopause jusqu'à la mésosphère. Les mesures au nadir permettent notamment d'obtenir une couverture géographique globale en quelques jours. Les missions satellitaires ont cependant une durée de vie limitée. En outre, la performance des instruments optiques dans un environnement spatial hostile se dégrade avec le temps. Cette dégradation peut altérer la qualité des mesures et la sensibilité de l'instrument aux structures atmosphériques réelles.

Après plusieurs décennies de développement et d'opération d'instruments satellitaires indépendants utilisant une technique de mesure déterminée, la stratégie internationale actuelle d'ob-

servation de notre environnement global vise l'exploitation de la complémentarité existant entre les différentes techniques d'observation et l'intégration des différents instruments indépendants en un système coordonné de systèmes d'observation globale de la Terre, le GEOSS (*Global Earth Observation System of Systems*). L'implémentation de ce système de systèmes a été décidée par la communauté internationale formant le GEO et rassemblant plus de 70 gouvernements et plus de 50 organisations intergouvernementales. L'objectif du GEOSS est de réunir et combiner les données provenant de différents systèmes d'observation de la Terre, tant celles concernant l'atmosphère que celles concernant les océans, ou encore la cryosphère, pour fournir une information intégrée utile au bénéfice de la société. Quelques exemples pratiques où le GEOSS devrait apporter une aide précieuse sont : la gestion des ressources en eau potable, la prévision de l'évolution du climat, la protection de la biodiversité, ou encore la gestion des catastrophes naturelles.

Concernant les données atmosphériques, la stratégie internationale IGACO (*Integrated Global Atmospheric Chemistry Observation*) propose comme moyens d'action le contrôle et l'harmonisation des données et le développement d'outils et de méthodes visant à produire une vue unifiée de l'atmosphère. Ils incluent explicitement, entre autres, 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.

C'est autour de cette stratégie d'intégration et des moyens proposés par IGACO pour y parvenir que s'est axé le travail présenté dans cette thèse. Nous nous sommes attachée, en particulier, à développer des méthodes de diagnostic et d'intégration pour les mesures du profil vertical de l'ozone dans l'atmosphère ; dans certains cas nous avons étendu nos études au profil vertical d'autres gaz en traces et de la température. Les différentes études présentées ici ont été réalisées dans le cadre de plusieurs projets internationaux. Ils nous ont notamment permis d'initier et d'entretenir diverses collaborations internationales, de présenter et de discuter nos résultats lors de réunions de projet, et de confronter les points de vue de différents acteurs d'un système aussi ambitieux et vaste que le GEOSS. Au long de ce travail de recherche, nous avons également eu l'occasion de présenter nos travaux lors de colloques internationaux et de les publier en tant qu'auteur ou co-auteur dans des revues scientifiques. Nous résumons ci-après les principaux résultats de nos différentes études et tentons de distinguer notre apport personnel au cheminement vers le système coordonné de systèmes d'observation globale de la terre GEOSS.

9.1 Conclusions et perspectives par chapitre

Dans un premier temps, nous sommes intéressée à un des principaux éléments du système d'observation global de la composition atmosphérique que sont les mesures au nadir du rayonnement UV-visible rétrodiffusé par l'atmosphère terrestre. Ce type de mesures, débutées dans les années septante par la mission BUV de la NASA, puis par le programme américain de monitoring de l'ozone couplant la série des spectromètres TOMS de la NASA et SBUV et SBUV/2 de la NOAA, et bientôt de leur successeur NPOESS/OMPS, forme une série temporelle dépassant actuellement les 30 ans. La série européenne de sondes débutée en 1995 avec l'expérience GOME de l'ESA, prend le relais de la série américaine en lui adjoignant la mesure d'autres espèces en traces ainsi que des aérosols. La mission GOME, toujours opérationnelle à l'heure actuelle, est poursuivie par les missions SCIAMACHY (depuis 2002) et OMI (depuis 2004) et par trois exemplaires de l'ins-

trument GOME-2. Le premier exemplaire de GOME-2 a été lancé en 2006 et le dernier devrait être lancé en 2014 de manière à obtenir à terme une série temporelle ininterrompue de 25 ans. La Chine s'est également engagée dans un programme à long terme de ce type de mesure avec les instruments FY-3 SBUS/TOU, copies conformes des instruments SBUV et TOMS.

Suite à la variation de la section efficace d'absorption de l'ozone sur plusieurs ordres de grandeur dans l'ultraviolet, les mesures de l'instrument GOME contiennent une information sur la distribution verticale de l'ozone. L'algorithme d'inversion OPERA, développé par le KNMI, a permis l'inversion de profils à faible résolution verticale. Cet algorithme est basé sur la modélisation du transfert radiatif à travers l'atmosphère jusqu'à l'instrument et une méthode d'inversion par estimation optimale. Nous avons étudié en profondeur le contenu d'information et la qualité des profils d'ozone GOME inversés par OPERA. Cette étude ne se limite pas à la comparaison des mesures GOME avec celles d'instruments indépendants et de qualité connue. Nous lui combinons une étude diagnostic originale de l'information réellement perçue par l'instrument, par opposition aux différentes contraintes a priori introduites par l'algorithme d'inversion. Notre étude montre que le contenu en information réellement mesurée des profils GOME OPERA varie avec l'altitude, la latitude et le temps. L'algorithme d'inversion OPERA parvient à inverser un maximum de 6 pièces d'information verticales indépendantes. Ce nombre de degrés de liberté et la sensibilité verticale de la mesure diminuent cependant au long du jeu de donnée s'étendant de 1996 à 2004. Cette évolution reflète clairement la dégradation instrumentale de GOME présentant les mêmes alternances de périodes stables et de transitions abruptes. Nos résultats montrent que le contenu d'information troposphérique des profils de l'ozone diminue progressivement et disparaît complètement après 2001. Nous mettons également en évidence une variation de la sensibilité verticale avec la latitude et une redistribution abrupte des pièces d'information troposphérique lors du passage des moyennes vers les basses latitudes. La combinaison de cette étude du contenu d'information avec des comparaisons classiques nous a permis de déterminer l'utilité des profils d'ozone GOME OPERA pour les applications scientifiques suivantes : l'étude des tendances à long-terme de l'ozone stratosphérique et la destruction d'ozone aux pôles, l'étude de la chimie troposphérique et la qualité de l'air, et l'utilisation de l'ozone troposphérique comme traceur dynamique. Notre diagnostic des profils de l'ozone GOME-OPERA effectué parallèlement au développement de versions successives de l'algorithme a permis son amélioration jusqu'à la version R2 étudiée ici. Une nouvelle version R4 de l'algorithme comprenant des améliorations supplémentaires est toujours en cours d'implémentation. La méthode d'analyse combinant étude du contenu d'information et comparaison avec des mesures indépendantes que nous avons développée devrait pouvoir servir d'exemple pour une évaluation harmonisée des autres instruments du même type et obtenir à terme une série temporelle d'au moins 40 ans de données sur le profil vertical de l'ozone atmosphérique.

Dans le chapitre suivant, nous nous sommes intéressée à une autre technique de mesure du profil vertical de l'ozone et d'autres constituants atmosphériques : la mesure de l'émission infrarouge au limbe, par l'instrument MIPAS en particulier. Les instruments de télédétection spatiale à visée au limbe sont un autre élément essentiel du système d'observation de la composition atmosphérique globale. Ce type de mesure est également développé depuis les années septante. Il comprend, outre les mesures de l'émission thermique, les mesures en occultation solaire, lunaire ou stellaire et les mesures en diffusion UV-visible. Quelques exemples importants sont les missions d'occultation solaire SAGE II, HALOE, POAM II et III et plus récemment ACE FTS et ACE MAESTRO, l'instrument d'occultation stellaire GOMOS à bord de la plateforme européenne Envisat et le spectromètre à transformée de Fourier MIPAS également à bord d'Envisat. Les instruments à visée

tangentielle à l'atmosphère permettent d'obtenir un profil vertical avec une meilleure résolution verticale que les mesures au nadir. C'est cependant au détriment de leur résolution horizontale. En effet, le signal mesuré résulte de différents processus d'émission, d'absorption et/ou de diffusion concourant tout au long du chemin optique à travers le limbe de l'atmosphère. La résolution horizontale de telles mesures n'est pourtant que rarement prise en considération lors de leur utilisation. La pratique commune est de traiter l'information sondée comme si elle était ponctuelle, et se concentrait autour du point tangent du chemin optique. Dans ce chapitre, nous avons cherché à caractériser l'information réellement sondée dans les plans horizontal et vertical par les mesures en émission infrarouge de MIPAS. La première partie de notre étude était dédiée à l'analyse des effets radiatifs et géométriques à l'origine du signal mesuré. Grâce à un modèle de transfert radiatif simplifié développé pour nos besoins, nous avons montré que la portion du chemin optique qui contribue au signal vu par l'instrument s'étend sur plus de 1000 km et que la contribution est maximale pour la portion du chemin optique située entre le point tangent et le satellite. La deuxième partie de notre étude considère, en plus de la physique du transfert radiatif à la base de la mesure, le système d'inversion. Cette étude réalisée en collaboration avec le FZK-IMK à Karlsruhe, à l'aide de leur modèle de transfert radiatif opérationnel KOPRA, nous a permis de calculer des "averaging kernels" horizontaux pour MIPAS. Ces fonctions montrent comment le système composé du modèle de transfert radiatif et du modèle d'inversion lisse l'information dans le plan horizontal. Nos résultats montrent que la résolution horizontale des mesures MIPAS dans la direction de la ligne de visée, c'est à dire parallèlement à l'orbite, est de l'ordre de 380 km (largeur à mi-hauteur des "averaging kernels" horizontaux). Comme le champ de vue de MIPAS perpendiculairement à l'orbite est de 40 km, les masses d'air sondées par l'instrument sont asymétriques dans le plan horizontal. Le déplacement du maximum d'information est principalement gouverné par le déplacement du point tangent avec l'avancée du satellite sur son orbite pendant l'enregistrement des spectres à des altitudes tangentes successives. Le profil de température fait exception avec un déplacement de 50-100 km du maximum d'information en avant du point tangent probablement dû à une plus grande épaisseur optique dans la fenêtre spectrale d'inversion. Bien que nos résultats soient spécifiques à l'instrument MIPAS, la méthode développée pour le calcul des kernels horizontaux devrait être applicable à d'autres instruments du même type et également (avec de légères modifications) aux autres techniques de visée au limbe. Les *averaging kernels* horizontaux développés dans ce chapitre sont des outils utiles à de nombreuses applications utilisant les données MIPAS. Ils peuvent notamment remplacer les opérateurs d'observation monodimensionnels actuellement utilisés pour l'ingestion des observations dans les modèles d'assimilation. Ils sont également utiles à la validation géophysique en permettant une meilleure définition des critères de coïncidence spatio-temporelle des observations à confronter et une évaluation plus complète du bilan d'erreur de cette confrontation. Notre étude s'est limitée à quelques états atmosphériques typiques et pourrait bien sûr être raffinée avec une analyse détaillée de la variation en fonction de la latitude, de la saison, de la pression et de la température des *averaging kernels* horizontaux. Cependant, des incertitudes plus importantes que celles liées à la variation des *averaging kernels*, entachent encore actuellement la modélisation des processus et constantes photochimiques et de transport atmosphérique. Un tel degré de sophistication des opérateurs d'observation n'est pas nécessaire. De plus la résolution spatiale des modèles actuels dépasse rarement le degré en latitude et longitude alors que le cycle annuel ne devrait pas dépasser quelques dixièmes de degré.

La validation géophysique des données satellitales est une des étapes essentielles à leur intégration dans un système d'observation globale. C'est pourquoi, comme rapporté dans le chapitre

suivant, nous avons contribué à un effort coordonné international de validation des données MIPAS. L'analyse présentée dans ce chapitre s'intéresse plus particulièrement au profil de l'ozone et s'articule autour de comparaisons entre les données MIPAS et les observations indépendantes acquises par les ozonsondes et les lidars des réseaux au sol GAW et NDACC. Afin de tester la pertinence et la rigueur métrologique des méthodes de validation traditionnelles imposées pour cette campagne coordonnée internationale, nous avons tenté d'évaluer tous les termes d'erreur intervenant dans les comparaisons, y compris l'erreur due à la différence de lissage horizontal entre MIPAS et les observations corrélatives. Dans ce chapitre nous présentons cette analyse détaillée et originale du bilan d'erreur et démontrons l'utilité des *averaging kernels* horizontaux obtenus au chapitre précédent pour l'estimation de l'erreur due à la différence de lissage horizontal des gradients atmosphériques. Ne disposant pas de champs atmosphériques tridimensionnels à suffisamment haute résolution spatiale pour calculer exactement l'erreur due au lissage des structures horizontales fines, nous estimons plutôt l'erreur due à la présence d'un gradient atmosphérique dans le champ de vue de l'instrument. Cette contribution peut être importante lorsqu'il existe de forts gradients atmosphériques parallèles à la ligne de visée de l'instrument comme par exemple en bordure du vortex polaire et en présence d'inhomogénéités régionales du champ d'ozone. Un résultat remarquable de notre approche est qu'elle permet d'expliquer l'écart-type observé dans la majorité des comparaisons. En effet, ce dernier dépasse parfois d'un ordre de grandeur les erreurs de mesure et d'inversion individuelles réunies et ne peut être expliqué sans prendre en considération les erreurs de lissage horizontal et de distance spatio-temporelle. En outre, nos comparaisons mettent en évidence un biais positif systématique dans les profils d'ozone MIPAS dans la basse stratosphère et la haute troposphère. Les conclusions de la validation coordonnée suggèrent que cette surestimation serait due à une interférence résiduelle des nuages dans les mesures MIPAS [Cortesi et al., 2007]. De manière plus générale, l'approche que nous avons développée, avec pour fondement l'étude systématique et la discussion du bilan total de l'erreur des comparaisons, et testée avec succès pour la validation de MIPAS pourra servir de référence pour la validation harmonisée des missions existantes et futures.

Après nous être intéressée aux différents éléments du système d'observation globale de la composition atmosphérique de manière séparée, nous étudions dans les deux chapitres suivants leur possibilité d'utilisation intégrée. Dans le chapitre 7 nous avons proposé une étude de la consistance entre les jeux de profils d'ozone provenant de sept sondeurs atmosphériques à visée au limbe : ACE-FTS, GOMOS, HALOE, MIPAS, POAM II, POAM III et SAGE II. Nous utilisons les réseaux au sol comme standard de transfert pour comparer des jeux de données qui ne couvrent pas forcément les mêmes zones de latitude ni les mêmes périodes de temps. Cette utilisation intégrée des mesures provenant des réseaux au sol nous permet d'analyser la consistance des jeux de données provenant de satellites très différents et les possibilités de couplage des différentes séries temporelles pour l'étude des tendances de l'ozone à long terme. Nous montrons que dans la stratosphère les données des différents satellites sont consistantes dans une marge de $7\%(\mu) \pm 10\%(\sigma)$. Quelques exceptions sont cependant à noter comme un biais négatif des données GOMOS en Arctique, un biais positif de MIPAS dans l'UTLS aux latitudes intertropicales et un biais systématique entre les mesures des instruments polaires successifs POAM II et POAM III. Sous une certaine altitude, la qualité des mesures au limbe diminue rapidement pour tous les instruments. Cette altitude limite varie entre 20 km pour le sondeur d'occultation stellaire GOMOS et 10-15 km pour les sondeurs infrarouges. Notre étude a également permis de mettre en évidence une nette dérive des mesures GOMOS en Arctique et une très légère dérive des données HALOE entre 20 et 35 km d'altitude.

La qualité des autres jeux de données étudiés semble rester stable tout au long des périodes de fonctionnement des instruments. Cette stabilité est requise pour l'étude de tendances planifiée dans le projet européen GEOmon. Notre étude démontre l'efficacité des réseaux au sol comme standard de transfert pour une analyse multi-mission et dans les limites de qualité actuellement atteinte par les instruments satellitaires. Pour l'instant limitée à ces sept sondeurs au limbe, cette étude pourra utilement être étendue à d'autres instruments. En prévision des futures missions européennes PREMIER [ESA, 2008] et GMES Sentinels [Langen, 2007] qui feront probablement usage du domaine des micro-ondes, nous projetons notamment de joindre à notre analyse multi-mission les sondeurs du limbe micro-onde MLS/UARS (1991-2001) et MLS/Aura (en opération depuis 2004).

Finalement, dans le chapitre 8, nous étudions les perspectives offertes par un système intégré basé sur une méthode statistique : le réseau neuronal. Durant sa phase d'entraînement, le réseau neuronal NNORSY, développé par la ZSW, approxime la relation statistique entre les spectres GOME et un jeu de profils d'ozone coïncidents provenant d'instrument indépendants. Le jeu d'entraînement NNORSY contient les mesures des ozonsondes dans la troposphère et les mesures des instruments à occultation solaire SAGE II, HALOE et POAM III dans la stratosphère. Une fois entraîné, le réseau neuronal permet de générer de nouveaux profils d'ozone à partir des spectres GOME sans nécessiter la modélisation du transfert radiatif à travers l'atmosphère. En dépit de la non-disponibilité de paramètres de diagnostic mathématiques du réseau neuronal, tel que les *averaging kernels*, nous avons dans ce chapitre, tenté de caractériser les propriétés du profil de l'ozone inversé par l'algorithme NNORSY grâce à des méthodes empiriques. Cette étude est complétée par des comparaisons entre les profils NNORSY GOME et des mesures au sol et par satellites. Notre analyse montre que l'incertitude sur le profil inversé dépend fortement de la qualité du jeu d'entraînement du réseau neuronal. Là où l'entraînement couvre suffisamment d'états atmosphériques probables, les comparaisons concluent à une bonne qualité des profils d'ozone NNORSY. Certains problèmes apparaissent cependant quand la représentativité du jeu d'entraînement est plus faible, comme par exemple aux pôles avant le début des mesures POAM III en 1998. D'autres problèmes semblent par contre liés à un contenu d'information plus faible des spectres GOME comme par exemple dans la troposphère à grand angle solaire zénithal, lorsque la colonne de l'ozone est importante, et sous une forte couverture nuageuse. De même, le pointage en altitude, les résolutions verticales et horizontales des profils NNORSY sont à mi-chemin entre les caractéristiques attendues des mesures GOME et de celles des satellites d'occultation du jeu d'entraînement. La haute résolution verticale des données d'entraînement permet au réseau neuronal d'inverser un maximum d'information verticale des spectres GOME. Le réseau neuronal semble également tirer profit de son jeu d'entraînement pour compenser la dégradation instrumentale progressive entachant les spectres GOME. Cet effet risque cependant d'être limité dans le temps puisque le contenu d'information inversable des spectres GOME est lui-même limité. D'autres caractéristiques des profils NNORSY reflètent par contre, certaines difficultés des mesures au limbe, comme le pointage en altitude et la résolution horizontale limitée. Ainsi, le réseau neuronal NNORSY exploite une part de la complémentarité entre les mesures au nadir de GOME et les mesures en occultation au limbe et par ballon sonde de son jeu d'entraînement, mais est également limité par la qualité et les propriétés intrinsèques du jeu d'entraînement. Les données NNORSY ont permis la constitution d'une nouvelle climatologie dynamique du profil vertical de l'ozone. Différents projets existent visant, notamment, à utiliser cette climatologie comme profil a priori pour l'inversion des colonnes verticales d'ozone GOME. Des projets existent pour appliquer l'algorithme d'inversion du profil

de l'ozone par réseau neuronal NNORSY aux mesures des instruments SCIAMACHY et GOME-2. Un autre projet commandité par l'EUMETSAT vise à appliquer NNORSY conjointement aux spectres de GOME-2 et de IASI, tous deux sur sa plateforme MetOp-A, afin d'obtenir un profil hybride de l'ozone exploitant au mieux tout le potentiel de ces deux instruments aux *kernels* très complémentaires.

9.2 Conclusions et perspectives générales

De manière générale, toute tentative d'utilisation intégrée des données requiert l'étude des erreurs générées par les différences d'échantillonnage et de lissage existant entre les signaux capturés par des instruments aux caractéristiques techniques différentes. Dans cette thèse nous avons tenté d'étudier de manière systématique l'impact de ces différences dans les quatre dimensions de l'atmosphère (latitude, longitude, altitude et temps). Nous avons étudié en détail les propriétés de lissage vertical des mesures en diffusion UV-visible à géométrie nadir et les propriétés de lissage horizontal des mesures en émission infrarouge au limbe de l'atmosphère. Nous avons ensuite comparé l'erreur de lissage horizontal aux autres termes du bilan d'erreur pour un cas réel de comparaison entre les profils d'ozone MIPAS et les données corrélatives provenant des réseaux au sol. Dans la suite de ce travail, nous avons étudié les structures méridienne et temporelle de jeux de données couvrant des régions géographiques et des périodes de temps très différentes. Finalement, nous avons étudié comment ces propriétés transparaissent à travers le résultat final d'un réseau de neurones. D'autres points restent bien évidemment à étudier. C'est le cas des propriétés de lissage horizontal des instruments d'occultation solaire et en diffusion UV-visible au limbe et des instruments à visée nadir. Une étude détaillée des effets de dilution horizontale pour les mesures à visée nadir en diffusion UV-visible est actuellement en cours à l'IASB et des études similaires concernant les autres techniques de télédétection sont également programmées.

Comme nous venons de le résumer, les différentes études présentées dans cette thèse contribuent toutes à la stratégie IGACO d'intégration des mesures atmosphériques dans un système d'observation de l'atmosphère globale. Nos travaux contribuent également à divers projets nationaux, européens et internationaux offrant différentes perspectives dans le domaine de la recherche scientifique sur les changements de la composition atmosphérique. De manière générale, nos études participent à l'implémentation du GEOSS à travers différentes contributions européennes.

Une première contribution européenne au GEOSS est le programme GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*) et son futur service atmosphérique (GAS, *GMES Atmosphere Service*). GMES est une initiative conjointe de l'ESA et de la Commission européenne pour fournir des "services à l'utilisateur" pour la gestion et l'amélioration de l'environnement, de la sécurité et de la santé à l'échelle paneuropéenne. Les utilisateurs en question sont les preneurs de décision, les politiciens, les organisations locales et nationales, les scientifiques et le public. Les thèmes principaux du service atmosphérique sont la qualité de l'air, les changements climatiques, l'ozone stratosphérique et le rayonnement ultraviolet reçu au sol. D'autres thèmes atmosphériques liés à la sécurité sont envisagés, comme l'impact des émissions volcaniques sur la sécurité aérienne.

Nos études ont été réalisées dans le cadre de plusieurs projets de recherche préparatoires au GAS. Il s'agit notamment du projet GEOmon, projet intégré du 6ème programme cadre de la Commission européenne, et des projets ProDEX CINAMON et SECPEA, deux contributions nationales aux programmes de l'ESA. Pour rappel, GEOmon vise à mettre en place 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. Une des tâches explicites de GEOmon, coordonnée par l'IASB, à laquelle nous avons activement participé, est la définition et le développement des outils nécessaires à l'intégration des mesures satellitales avec celles résultantes des réseaux au sol. Le projet ProDEX SECPEA (à la suite du projet CINAMON) complète ces études 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 pour la prévision du "temps chimique" (*chemical weather*).

Différents services pionniers du GAS ont été développés, testés et évalués au cours du projet de l'ESA PROMOTE (*PROtocol MOniToring for the GMES Service Element : Atmosphere*). Au cours de ce projet un protocole de validation a été défini s'inspirant notamment de certains de nos travaux en qui concerne la méthodologie générale que doit suivre une procédure de validation, le bilan d'erreur d'une comparaison et la question du contenu réel d'information. Le projet MACC (*Monitoring Atmospheric Composition Changes*), qui débutera cet été, vise à développer le noyau du GAS, à savoir l'intégration de nombreux modules de calcul développés par des instituts de recherche, dans le système intégré de prévision (*Integrated Forecast System*) de l'ECMWF. Ce noyau (*GMES Atmospheric Core Service*) fournira en prévisions et ré-analyses les agences environnementales publiques de l'Union européenne ainsi que les prestataires de services en aval (*GMES Atmospheric Downstream Services*). L'IASB, en plus de fournir certains services, est chargé de mettre en place l'architecture du noyau du GAS. Certaines tâches du projet MACC auxquelles nos études contribueront sont : l'établissement de protocoles, l'assimilation multi-mission des observations et la validation opérationnelle des différents systèmes (réseaux GAW et NDACC, satellites ESA, EUMETSAT, NOAA, NSMC, CNES et JAXA).

Une autre importante contribution européenne au GEOSS est la mise en place du système de positionnement par satellite GALILEO. Le système GALILEO ne constitue pas la pierre d'angle de ce travail. Néanmoins, dans le cadre des applications atmosphériques des sondages en occultation radio de GALILEO et de leur validation, les concepts d'étude des propriétés de lissage et d'échantillonnage trouveront toute leur utilité.

Une troisième contribution européenne à l'implémentation du GEOSS est la directive INSPIRE (*Infrastructure for Spatial Information in Europe*, 2007/02/EC). Cette directive entend favoriser la production et l'échange des données géo-référencées au sein de l'Union européenne en établissant différentes normes auxquelles ces données et les systèmes qui les produisent doivent répondre. Nos travaux contribuent à négociation actuelle de ces règles et de leurs dispositions pratiques pour les données atmosphériques. La directive INSPIRE impliquant surtout des données géographiques à caractère bidimensionnel (cadastre, gestion des ressources côtières, protection civile,...) les dispositions originales étaient inadaptées aux thèmes atmosphériques et à leurs quatre dimensions. Nos résultats permettent d'étayer les discussions menées par les communautés météorologique et atmosphérique cherchant à incorporer les aspects propres à l'atmosphère.

A l'échelle européenne, nos recherches contribuent également à différents projets de validation opérationnelle de satellites atmosphériques pour le compte de l'ESA (projets TASTE et Multi-TASTE) et de l'EUMETSAT (projet O3M-SAF). Ces projets assurent la continuité de la validation géophysique des mesures et la vérification des nouveaux algorithmes tout au long de la vie des satellites, ainsi que la cohérence des jeux de données entre deux missions consécutives. Ils participent à la stratégie de qualité en avant du GAS.

A l'échelle mondiale, le comité inter-agences CEOS (*Committee on Earth Observation Satellites*) a été chargé par le GEO d'établir une stratégie globale de qualité des données QA4EO

(*Quality Assurance framework for Earth Observation*) pour le GEOSS (données concernant autant les océans, la surface, la cryosphère que l'atmosphère). Dans ce cadre, nos travaux contribuent à la classification des sites de calibration et validation (Cal/Val). Ils permettent de trier les sites en fonctions de critères basés sur l'échantillonnage et le lissage des structures atmosphériques et des erreurs qui leur sont associées, plutôt que des critères géopolitiques ou plus arbitraires. Nos travaux contribuent également à l'établissement de "bonnes pratiques" pour la validation, dont un des principes fondateurs est la discussion de la méthode de comparaison sur base du bilan complet d'erreur tel que nous l'avons développé.

Enfin, les concepts et outils développés trouveront d'autres applications concrètes, ainsi que des perspectives de complémentaires, dans deux programmes de recherche récemment mis sur pied. Le premier concerne la problématique du réchauffement climatique. L'ozone et la température, dont nous avons étudié le contenu d'information des mesures, font parties des variables climatiques essentielles (ECV, *Essential Climate Variable*). Ces ECV sont définies dans le cadre du système global d'observation du climat (GCOS, *Global Climate Observing System*). Leur mesure est requise pour la surveillance et l'étude de l'évolution du climat. Le second concerne la constellation atmosphérique du CEOS (*Atmospheric Composition Constellation*), constellation virtuelle se construisant sur les programmes satellitaires en cours et définissant les missions à venir pour satisfaire aux enjeux observationnels des programmes et protocoles environnementaux majeurs [CEOS, 2008]. L'exploitation optimale de cette constellation nécessite plus que jamais des outils d'interprétation entre missions, au long terme et autres techniques de mesures complémentaires. C'est également ce qui a été vivement recommandé, encore récemment, par les *Ozone Research Managers* des Parties à la Convention de Vienne. Lors de leur dernière réunion, ils ont réaffirmé la nécessité de maintenir un système coordonné d'observations satellitaires en diffusion UV-Visible au nadir (parce que ces mesures donnent accès aux gaz réactifs entrant dans la chimie de l'ozone et pour continuer les séries temporelles entamées dans les années septante), en limbe infrarouge et millimétrique (car ces mesures donnent accès aux gaz sources et réservoirs, au NO_y , Br_y et Cl_y , et à la distribution verticale d'espèces réactives) et en occultation solaire (pour continuer les séries temporelles entamées dans les années septante) [WMO-UNEP, 2008].

