



## Proposition de thèse pour la rentrée 2022

Pour cette thèse, la possibilité d'un demi-financement CNES a été obtenue.

### Titre de la thèse :

*Estimation des sources et puits de méthane par assimilation de données satellitaires dans un système d'inversion atmosphérique*

### Thesis title:

*Estimating methane sources and sinks by assimilating satellite data in a global atmospheric inverse system*

### Laboratoire d'accueil : Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement

Directeur du laboratoire : Philippe Bousquet

Adresse complète du laboratoire : CEA Orme des Merisiers 91191 Gif Sur Yvette

Equipe d'accueil: SATINV – Thème 2

### Encadrement

Directrice de thèse : Marielle Saunois

Co-directeur de thèse : Antoine Berchet



### Description (Français) :

Les activités humaines perturbent les cycles biogéochimiques et contribuent à accroître les concentrations des principaux gaz à effet de serre (GES) dans la basse atmosphère, dont le méthane, 2ème gaz à effet de serre anthropique après le gaz carbonique (CO<sub>2</sub>). La connaissance des sources et puits de GES et de leurs précurseurs est fondamentale pour la compréhension des cycles biogéochimiques contemporains, mais aussi pour suivre l'évolution des sources anthropiques et pour établir des scénarios d'émissions pertinents destinés aux modèles de prévision du climat futur. Le méthane est 30 fois plus puissant que le CO<sub>2</sub> à l'échelle de 100 ans pour piéger le rayonnement infrarouge. Le méthane a contribué pour plus de 20% de l'effet de serre additionnel depuis 1750. C'est également un précurseur de vapeur d'eau dans la stratosphère et d'ozone dans la troposphère, deux autres gaz à effet de serre. Le méthane offre également des opportunités intéressantes d'atténuation du changement climatique, grâce à la variété de ses sources et à son temps de vie assez court dans l'atmosphère (~9 ans).

Le méthane est émis par une grande variété de sources qui s'organisent en trois catégories différenciées selon le processus responsable de l'émission : émissions biogéniques dues à la décomposition anaérobie de la matière organique par des micro-organismes (zones humides, termites, rivières et lacs, décharges, déchets, ruminants), émissions thermogéniques dues à la formation de combustibles fossiles dans le sous-sol à haute pression et température (dégazage de méthane naturel ou émission liée à l'exploitation du charbon/pétrole/gaz), et émissions pyrogéniques dues à la combustion incomplète de biomasse (feux de forêts, utilisation de biofuels). Ces émissions et puits, ainsi que leurs variations spatiales et temporelles, sont toujours très mal évalués aujourd'hui.

L'estimation de ces différentes sources de méthane peut se faire à l'aide de modèles de processus, d'inventaires d'émissions, ou par inversion du transport et de la chimie atmosphérique. Cette dernière approche optimise les sources et puits de méthane en combinant de façon optimale, au sens Bayésien, des observations atmosphériques de composés contraignant les sources, un modèle de chimie-transport et une estimation a priori des émissions et puits. Les stations mesurant le méthane à la surface sont éparses et rares dans des zones clés telles que les tropiques. Les données satellites complètent les mesures in-situ et permettent une couverture plus planétaire. Par contre les mesures sont moins précises et généralement intégrées sur la colonne atmosphérique. L'assimilation de colonne atmosphérique totale dans un système d'inversion nécessite une modélisation correcte du profil vertical de méthane par le modèle pour ne pas corriger des flux à la surface en réponse à une surestimation de la colonne stratosphérique. Des mesures passives dans le proche Infra Rouge (Short Wave Infra Red, SWIR) avec une résolution spatiale de quelques kilomètres, fournit une mesure de la colonne atmosphérique avec une sensibilité allant de la surface à la tropopause (GOSAT-TANSO-FTS depuis 2009, S5P-TROPOMI depuis 2019). Des mesures passives dans l'infrarouge thermique (TIR) permettent une caractérisation du profil atmosphérique avec typiquement un à trois éléments d'information entre la troposphère libre et la stratosphère (TES, CrIS, IASI). L'instrument actuellement utilisé pour l'estimation des sources et puits de méthane à l'échelle planétaire est GOSAT-TANSO dont la résolution spatiale est de 10 km, mais seules les mesures au-dessus des continents sont fiables et il existe des



biais aux hautes latitudes. La nouvelle génération d'instrument à bord de Sentinel 5P avec TROPOMI offre une résolution spatiale un peu plus fine (7x7km) mais avec une justesse constatée au-delà du pourcent, imposant un pré-traitement (à définir lors de la thèse) avant d'être assimilé à l'échelle planétaire. Une mission spatiale projette d'utiliser la technique active du LIDAR depuis l'espace (MERLIN), pouvant offrir différentes solutions aux limites rencontrées par l'observation passive (mesure aux hautes latitudes, même en hiver, source de biais sur les estimations de données de XCH<sub>4</sub> limitées grâce à une moindre sensibilité à des interférents tels que les aérosols, moindre sensibilité aux surfaces terrestres complexes ou accidentées). Aussi des travaux sont en cours visant à combiner le signal dans l'infra-rouge thermique (TIR) avec celui du SWIR afin d'obtenir deux informations verticales indépendantes et d'améliorer la sensibilité aux basses couches, proche des sources.

L'objet de la thèse est de tirer parti de cet ensemble de données satellitaires pour optimiser les émissions mondiales de méthane. Il s'agit de développer des outils de traitements numériques des nouvelles (et future) données satellites afin d'utiliser ces données dans un système d'inversion atmosphérique planétaire permettant d'estimer les sources et puits de méthane. L'évolution récente du méthane atmosphérique est particulièrement intéressante car il augmente rapidement depuis 2007 après presque 10 ans de stagnation. Le(La) doctorant(e) s'appuiera sur le système d'inversion développé au LSCE (Community Inversion Framework - CIF) associé au modèle de transport planétaire LMDz. Le CIF prend déjà en compte les données GOSAT, une adaptation aux données de TROPOMI et à des pseudo données MERLIN sera faite par le(la) doctorant(e). Après une phase de bibliographie (~3 mois) pour déterminer les techniques utilisées pour le filtrage des données TROPOMI dans le cadre d'autres applications régionales, le(la) doctorant(e) testera en parallèle les données GOSAT1&2, TROPOMI et IASI (SWIR) dans le système d'inversion (~1 an), puis il/elle développera des pseudo-données MERLIN ou/et intégration SWIR/TIR/LIDAR selon avancement des différents travaux (~1 an). Le reste du temps sera consacré, à la formation scientifique, à la rédaction d'articles scientifiques et du manuscrit de thèse. Un enjeu scientifique important de cette thèse est de mieux identifier et quantifier les sources responsables des variations du méthane atmosphérique récentes, aujourd'hui toujours mal comprises régionalement et très discutées dans la communauté scientifique.

Le(La) doctorant(e) pourra s'appuyer sur les moyens de calcul du LSCE et du centre national de calcul TGCC, ainsi que sur l'expertise de l'équipe SATINV du LSCE, qui est parmi les équipes en pointe à l'échelle mondiale sur les méthodes inverses appliquées aux gaz à effet de serre. Le modèle de chimie transport utilisé sera LMDz-INCA et le système d'inversion sera le CIF, développé au LSCE.

*Pré-requis :*

- Connaissances en physico-chimie de l'atmosphère
- Compétences informatiques en programmation requises (Python, Shell)
- Fort attrait pour la modélisation numérique
- Des notions en assimilation de données et en données satellites seront appréciées



**Description (English):**

Human activities have contributed to increase the concentrations of the greenhouse gases (GHGs) in the lower atmosphere, including methane (CH<sub>4</sub>), second-largest anthropogenic greenhouse gas after carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). Knowledge of sources and sinks of GHGs and their precursors is fundamental for understanding contemporary biogeochemical cycles, but also for establishing relevant emission scenarios for climate models. CH<sub>4</sub> is about 30 times more powerful than CO<sub>2</sub> at the 100-year scale for trapping infrared radiation and has contributed more than 20% of the additional greenhouse effect. CH<sub>4</sub> offers interesting mitigation opportunities due to the variety of its sources and its relatively short lifetime in the atmosphere (~9 years).

CH<sub>4</sub> is emitted by a wide variety of sources from three production processes: biogenic emissions due to the anaerobic decomposition of organic matter by microorganisms (wetlands, landfills, ruminants...), thermogenic emissions due to the formation of fossil fuels in the underground under high pressure and temperature (natural CH<sub>4</sub> degassing or emission related to coal/oil/gas exploitation), and pyrogenic emissions due incomplete combustion of biomass. The magnitude and the spatial and temporal variations of these emissions are still poorly estimated today.

Estimation of these different sources of CH<sub>4</sub> can be obtained using process models, emission inventories, or by inversion of transport and atmospheric chemistry. The latter approach infers CH<sub>4</sub> sources and sinks by optimally combining, in the Bayesian sense, atmospheric observations of source-binding compounds, a transport-chemistry model and a prior estimate of emissions and sinks. Surface stations measuring CH<sub>4</sub> are sparse and missing in key emissions regions such as the Tropics. Satellite data allow a more global coverage to the expense of precision and generally provide total atmospheric column. Assimilating a total column necessitate a good representation of CH<sub>4</sub> vertical profile to avoid correcting surface fluxes because of overestimation of stratospheric content. Passive measurement in the Short-Wave InfraRed (SWIR) with spatial resolution of few kilometers provide a measure of the total column with sensitivity from the surface to the tropopause (GOSAT-TANSO-FTS since 2009 and S2P-TROPOMI since 2019). Passive measurements in Thermal InfraRed (TIR) can derive an atmospheric profile with about one to three pieces of information between the free troposphere and the stratosphere (TES, CrOS, IASI). Today, GOSAT-TANSO data (10km horizontal resolution) are used at global scale to derive CH<sub>4</sub> fluxes at the surface but only daytime measurements over the continents are reliable and biases exist in the high latitudes. S5P-TROPOMI data have a better resolution (about 7kmx7km) but has an observed accuracy larger than one percent. This call for pre-processing (to be defined during the thesis) before being assimilating in the global inverse system. A space mission aims at using active measurement technic of LIDAR from space (MERLIN), allowing solutions to the limitations of passive measurements (high latitudes coverage even during winter, limited bias due to interference of particles, lower sensitivity to complex terrain). Finally, on-going research aims at combining SWIR and TIR signal to obtain two independent pieces of information on the vertical and improving sensitivity to the lower layers, close to the sources.



The PhD thesis aims at taking advantage of the set of satellite data to optimize CH<sub>4</sub> sources and sinks. Numerical tools will be developed to treat the new (and future) satellite data in order to assimilate them in a global atmospheric inverse system able to estimate CH<sub>4</sub> sources and sinks. The PhD student will rely on the inversion system developed at the LSCE (Community Inversion Framework - CIF), associated to the global transport model LMDz. The CIF already integrate the treatment of GOSAT data, adaptation for TROPOMI, MERLIN pseudo-data will be developed by the PhD student. After a bibliography phase (~ 3 months) to determine the technics used to filter TROPOMI data in regional studies, the doctoral student will test in parallel GOSAT1&2, TROPOMI and IASI (SWIR) data in the inverse system (~ 1 year), and then will develop MERLIN pseudo data and/or integrate SWIT/TIR data depending on the results of ongoing research on this topic (~1 an). The rest of the time will be spent in scientific training, writing scientific articles and the PhD thesis manuscript. An important scientific issue of this thesis is to better identify and quantify the sources responsible for the recent variations in atmospheric CH<sub>4</sub>, which are still poorly understood and widely discussed today in the scientific community.

The PhD student will rely on the LSCE and the national TGCC computing resources, as well as on the expertise of the LSCE's SATINV team, which is one of the leading teams in the field of global scale inverse methods applied to greenhouse gases. The transport chemistry model used will be LMDz-SACS and the inversion system will be CIF, both developed at LSCE.

*Prerequisites:*

- Knowledge of physics and chemistry of the atmosphere and biogeochemical cycles
- Computer skills and interest in programming is requested (Python, Shell)
- High interest for numerical modelling
- Notions of data assimilation and satellite data will be appreciated