



## Proposition de thèse pour la rentrée 2022

Cette thèse fait partie d'un projet ANR dont le financement est entièrement assuré.

### Titre de la thèse :

*Sources et puits de méthane : quantification de l'apport des espèces co-émises dans l'inversion atmosphérique*

### Thesis title:

*Methane sources and sink: assessment of the co-emitted species assimilation in atmospheric inverse modeling*

**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. Si on utilise seulement des observations de méthane, on obtient une contrainte sur les émissions totales de méthane mais peu sur les contributions des émissions individuelles car l'atmosphère les mélange très efficacement. Il faut donc ajouter d'autres contraintes, par exemple sous la forme d'observations de composés atmosphériques traçant une ou plusieurs sources spécifiquement. C'est le cas des isotopes du méthane (<sup>13</sup>CH<sub>4</sub> et CH<sub>3</sub>D) qui sont fractionnés différemment selon le processus d'émission. Une précédente étude a mis en place un système d'inversion atmosphérique multi-contraintes des isotopes du méthane. Celui-ci permet de redistribuer en partie les émissions par secteurs mais de nombreuses incertitudes restent. D'autres traceurs peuvent aussi servir : c'est le cas de l'éthane qui peut contraindre les émissions liées aux fuites de gaz naturel, du monoxyde de carbone qui peut contraindre les



émissions de méthane liées aux feux de biomasse, ou encore du  $^{14}\text{CH}_4$ , pour contraindre les émissions fossiles.

L'objet de la thèse est de tirer parti de cet ensemble de données de surface et satellitaires pour optimiser les émissions mondiales de méthane. Il s'agit d'évaluer le bénéfice de l'assimilation de données de différents traceurs et de différents types (surface/satellites) sur l'estimation des sources et puits de méthane avec le système d'inversion atmosphérique du LSCE.

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 satellites GOSAT et le système a été adapté pour les isotopes stables du méthane. Après une phase de bibliographie (~3 mois) pour déterminer les données existantes (mesures, inventaires) sur les traceurs envisagés (éthane, CO voire  $^{14}\text{CH}_4$ ), le(la) doctorant(e) adaptera le système d'inversion afin d'effectuer des inversions assimilant le méthane et l'éthane, puis le méthane et le CO, et finalement les trois espèces (~1 an). Dans un second volet, le(la) doctorant(e) analysera la complémentarité des observations de surfaces avec les mesures satellites en appliquant le système à des inversions assimilant conjointement les mesures de surfaces (méthane totale et isotopes, co-traceurs) et mesures satellites (~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 to 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. Using only total methane measurements constraint well total emissions but disentangling overlapping sources remains difficult as atmospheric mixing is efficient. Additional constraints are necessary, for example atmospheric tracers for specific sources. Methane sources have different isotopic signature that could help to differentiate them. A former study has developed a multi-constraints inverse system able to assimilate methane isotopic signal along with total methane. This system is able to redistribute emission by sector but numerous uncertainties remains. Other tracers could be useful as well: ethane for oil and gas sector emissions; carbon monoxide for biomass burning emissions; or <sup>14</sup>CH<sub>4</sub> for fossil fuel and geologic emissions.

The objective of the thesis is to take benefit of the ensemble of existing data to better estimates methane sources and sinks. In particular, this thesis will assess the add-on value of assimilating different tracers and different types of observations (surface and satellite) to retrieve methane fluxes.

The PhD candidate will rely on the atmospheric inverse system developed at LSCE, the Community Inversion Framework (CIF) coupled to the chemistry transport model LMDZ-SACS. This system has been adapted to handle methane surface observations, including the isotopic signal and satellite data (incl. GOSAT).



After a first step (~3 months) of literature research to determine the existing data useful to the study (observations, inventories, emission factor), the PhD candidate will adapt the inverse system to first assimilate ethane along methane, and then possibly the other tracers CO and  $^{14}\text{CH}_4$  (~1 year). In a second axis, the PhD candidate will assess the complementarity of assimilating surface and satellite data to constrain total methane along with its isotope and/or co-emitted species (~1 year).

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  $\text{CH}_4$ , 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 physico-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