



CACCI

COMPREHENSIVE ACTION FOR
CLIMATE CHANGE INITIATIVE

No. 10, mars 2024

NOTES DE TERRAIN CACCI (CACCI Field Notes)

**Exploration de la dynamique de concentration
de méthane au niveau des terres cultivées du Sénégal**

Racine Ly, Khadim Dia et Mansour Dia



À propos des notes de terrain CACCI

Les notes de terrain CACCI (CACCI Field Notes) d'AKADEMIYA2063, publiées par les chercheurs et les collaborateurs d'AKADEMIYA2063, sont basées sur les activités de recherche menées dans le cadre du projet CACCI (Comprehensive Action for Climate Change Initiative), l'Initiative d'action globale sur le changement climatique. Le projet CACCI s'efforce d'accélérer la mise en œuvre des Contributions Déterminées au niveau National (CDN) et des Plans Nationaux d'Adaptation (PNA) en répondant aux besoins en termes de données et d'analyses, en renforçant les capacités institutionnelles et en participant à la coordination des activités. En Afrique, le projet CACCI se déroule en collaboration étroite avec la Commission de l'Union africaine, AKADEMIYA2063, le Réseau africain des instituts de recherche sur les politiques agricoles (ANAPRI - African Network of Agricultural Policy Research Institutes) et les acteurs nationaux de l'action climatique, afin de soutenir la planification de l'action climatique et de renforcer les capacités d'élaboration de politiques fondées sur des données probantes pour progresser vers les objectifs climatiques.

Publiées sur le site web d'AKADEMIYA2063 (en libre accès), les notes de terrain CACCI permettent d'accéder, en temps utile, à des données et autres informations significatives issues de nos activités de recherche dans les domaines de l'adaptation au changement climatique et de l'atténuation de ses effets. Les données ainsi mises à disposition dans les pays sélectionnés par le projet CACCI fourniront des solutions fondées sur des données probantes aux professionnels et aux décideurs politiques engagés dans l'action climatique.

La contribution d'AKADEMIYA2063 au projet CACCI consiste à fournir une expertise technique visant à renforcer les capacités nationales, régionales et continentales pour la mise en œuvre des CDN et des PNA.

AKADEMIYA2063 s'engage à soutenir les pays africains dans leurs efforts de lutte contre le changement climatique en fournissant des données et des analyses obtenues grâce aux toutes dernières technologies disponibles en matière de recherche scientifique. Dans cette note de terrain, les chercheurs d'AKADEMIYA2063 examinent la dynamique de la concentration de méthane au niveau des terres cultivées du Sénégal, au cours de la période allant de novembre 2021 à avril 2023, à l'aide de la base de données TROPOMI.

Le projet CACCI est soutenu par l'Agence américaine pour le développement international (USAID). Les opinions exprimées dans cette publication ne reflètent pas nécessairement celles du donateur.

À propos d'AKADEMIYA2063

AKADEMIYA2063 est une organisation de recherche à but non lucratif implantée en Afrique, dont le siège se trouve à Kigali, au Rwanda et le bureau régional à Dakar, au Sénégal. S'inspirant des ambitions de l'Union africaine et fondée sur l'importance cruciale de disposer de solides systèmes basés sur des connaissances et sur des données probantes, la vision d'AKADEMIYA2063 est celle d'une Afrique dotée de l'expertise nécessaire pour créer l'Afrique que nous voulons. Cette expertise doit répondre aux besoins du continent en matière de données et d'analyses pour une conception et une mise en œuvre de politiques de qualité. L'élaboration de politiques inclusives et fondées sur des données probantes est essentielle pour répondre aux aspirations du continent en matière de développement, créer des richesses et améliorer les conditions de vie des populations.

La mission globale d'AKADEMIYA2063 est de créer, à travers l'Afrique et sous la direction de son siège au Rwanda, des capacités techniques de pointe visant à soutenir les efforts des États membres de l'Union africaine dans la réalisation des objectifs clés de l'Agenda 2063 de l'Union africaine, à savoir transformer les économies nationales pour stimuler la croissance économique et la prospérité.

Conformément à sa vision et à sa mission, l'objectif principal d'AKADEMIYA2063 est de contribuer à répondre aux besoins de l'Afrique aux niveaux continental, régional et national en termes de données, d'analyses et d'apprentissage mutuel pour la mise en œuvre efficace de l'Agenda 2063 et la réalisation des résultats attendus par une masse critique de pays. AKADEMIYA2063 s'efforce d'atteindre ses objectifs à travers des programmes organisés en cinq domaines stratégiques – l'innovation politique, les systèmes de connaissances, la création et le déploiement de capacités, le soutien opérationnel et la gestion des données, produits et technologies numériques – mais aussi à travers des partenariats et des activités de sensibilisation. Pour plus d'informations, veuillez consulter le site web de l'organisation www.akademiya2063.org.

Référence à citer : Ly, R., K. Dia et M. Dia. 2024. *Exploration de la dynamique de concentration de méthane au-dessus des terres cultivées du Sénégal*. Note de terrain CACCI, N°10. Kigali : AKADEMIYA2063. <https://doi.org/10.54067/caccifn.010/FR>

Auteurs:

Racine Ly est Directeur du Département Management des données, produits et technologies numériques à AKADEMIYA2063 : rly@akademiya2063.org.

Khadim Dia est chercheur associé senior à AKADEMIYA2063 : kdia@akademiya2063.org.

Mansour Dia est chercheur associé à AKADEMIYA2063 : mdia@akademiya2063.org.

Table des Matières

| | |
|---|-----------|
| 1. Introduction | 4 |
| 2. Méthodologie..... | 5 |
| 2.1. Mesures satellitaires du méthane | 5 |
| 2.2. Principes de mesure | 5 |
| 2.3. Région concernée : le Sénégal..... | 5 |
| 2.4. Analyse des données..... | 6 |
| 3. Conclusions et analyse..... | 7 |
| 3.1. Vue d'ensemble des émissions de méthane au niveau des terres cultivées au Sénégal | 7 |
| 3.2. Vue d'ensemble par zone agroécologique | 8 |
| 3.3. Distribution spatiale des émissions | 9 |
| 3.4. Variations saisonnières des émissions | 13 |
| 4. Discussion sur les options d'atténuation | 17 |
| Références | 17 |

1. Introduction

La question des émissions de méthane (CH₄) suscite une attention croissante en raison de son rôle substantiel dans l'augmentation des niveaux de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale, en mettant l'accent sur la nécessité de lutter contre le changement climatique (Saunois et al. 2020). Il est désormais établi que l'extraction de combustibles fossiles et l'élevage sont des sources d'émissions de méthane. De même, les recherches actuelles mettent l'accent sur la contribution significative des activités agricoles, et plus particulièrement des terres cultivées, à la libération de méthane (Smith et al. 2021 ; Nisbet et al. 2019).

Les émissions de méthane au niveau des terres cultivées constituent un élément substantiel et variable du budget carbone mondial. En effet, ces émissions résultent d'une interaction multiforme entre les méthodes agricoles, les processus microbiens du sol et les conditions environnementales. Les sols inondés jouent un rôle important dans la production de méthane, car les conditions anaérobies favorisent la production de méthane par les micro-organismes méthanogènes. Les rizières contribuent considérablement aux émissions de méthane d'origine agricole, les plants de riz fournissant à la fois des facteurs qui augmentent et d'autres qui limitent la production de méthane (Rajendran et al. 2023). En outre, l'application d'engrais azotés (N) pour augmenter le rendement des cultures exerce une influence significative sur l'émission/l'absorption de méthane (CH₄) et d'oxyde nitreux (N₂O) dans le sol (Bin-feng et al. 2016). Divers facteurs, y compris les systèmes d'irrigation, les conditions du sol et les variétés de cultures, exercent une influence sur l'ampleur des émissions de méthane au niveau des terres cultivées.

Il est essentiel d'évaluer la dynamique du méthane pour comprendre sa fonction complexe dans le système climatique de la Terre et pour concevoir des approches efficaces qui permettront de résoudre les problèmes environnementaux à l'échelle mondiale. Le méthane exerce un effet de forçage radiatif substantiel sur le climat, le deuxième après le dioxyde de carbone (Myhre et al. 2013). Il est donc crucial d'obtenir des données précises et complètes concernant les concentrations du méthane, afin d'améliorer notre compréhension de son comportement et de ses interactions dans l'atmosphère. Ces connaissances permettent d'améliorer non seulement les modèles climatiques, mais aussi la précision des prévisions (Saunois et al. 2016). En outre, ces données permettent de mieux comprendre l'efficacité des politiques visant à atténuer les émissions de méthane et elles permettent également de contribuer au développement d'interventions ciblées pour réduire l'impact du méthane sur le réchauffement climatique (Nisbet et al. 2019). L'utilisation de méthodes de mesure robustes pourrait faire progresser notre compréhension de la dynamique du méthane. Ces progrès pourraient à leur tour renforcer notre capacité à lutter efficacement contre le changement climatique, à préserver les écosystèmes et à offrir un environnement durable aux générations futures.

Les concentrations de méthane sont généralement évaluées grâce à des réseaux de surveillance au sol et des méthodes de télédétection par satellite. Les mesures au sol comprennent l'utilisation d'instruments spécialisés tels que des spectromètres infrarouges à transformée de Fourier (FTIR) et des chromatographes en phase gazeuse, placés sur différents sites pour collecter et examiner les concentrations de méthane dans l'atmosphère (Peterson et al. 2010). Ces mesures permettent d'obtenir des données précises et exactes pour des sites définis, ce qui contribue à la validation et à l'étalonnage des observations par satellite. En revanche, les études basées sur les satellites utilisent des instruments avancés installés sur les satellites pour détecter l'absorption du méthane par la lumière du soleil ou le rayonnement thermique émis par la surface de la Terre (Bergamaschi et al. 2007). L'utilisation de technologies modernes, telles que l'instrument de surveillance de la troposphère (TROPOMI) et le satellite d'observation des gaz à effet de serre (GOSAT), a considérablement amélioré notre capacité à cartographier dans l'espace et à surveiller en permanence les niveaux de méthane à l'échelle mondiale d'un point de vue satellitaire (Kuze et al. 2009 ; Palmer et al. 2021). L'exploitation des observations terrestres et satellitaires facilite une compréhension holistique de la dispersion, de la fluctuation et des schémas du méthane à travers diverses étendues spatiales, donnant des indications significatives sur ses origines et ses ramifications écologiques potentielles.

Cette note de terrain vise à étudier la dynamique des émissions de méthane au niveau des terres cultivées du Sénégal pour la période allant de novembre 2021 à avril 2023, en utilisant les bases de données TROPOMI. Les terres cultivées sont importantes pour assurer la sécurité alimentaire et la stabilité économique au Sénégal, une nation fortement dépendante de l'agriculture (FAO 2021). Cette évaluation permettra de i) mieux comprendre la dynamique des concentrations de méthane dans les terres cultivées du Sénégal et de ii) soutenir la conception de stratégies d'atténuation efficaces et d'interventions ciblées pour réduire les émissions, améliorer la santé des sols et contribuer aux objectifs mondiaux de réduction des émissions.

Cette étude n'attribue pas les concentrations de méthane à leurs sources. Elle explore plutôt la dynamique des concentrations de méthane au niveau des terres cultivées. Cependant, le principe des mesures rend les données

sensibles aux niveaux inférieurs des mesures de la colonne d'air sec, ce qui signifie que les émissions provenant du sol contribueront grandement aux niveaux de concentration. En outre, l'étalonnage des mesures TROPOMI avec les stations au sol permet de les utiliser comme une approximation potentielle des niveaux d'émission. Par conséquent, l'utilisation du terme émission au lieu de concentration sera faite à plusieurs reprises dans le document sur la base de la justification ci-dessus.

Avis de non-responsabilité :

Ce document utilise des données de télédétection satellitaire accessibles au public. Le contenu des données enregistrées aux frontières nationales sénégalaises pourrait être ajouté à des fins d'illustration. Les frontières nationales sont définies par des fichiers de formes dérivés de la base de données des zones administratives mondiales (GADM) disponibles ici : https://gadm.org/download_country.html. AKADEMIYA2063 utilise les fichiers de formes mentionnés ci-dessus uniquement pour limiter la carte des données à l'étendue géographique du pays. Par conséquent, les limites administratives, les noms indiqués et les désignations utilisées sur les cartes n'impliquent pas l'approbation ou l'acceptation officielle d'AKADEMIYA2063.

2. Méthodologie

2.1. Mesures satellitaires du méthane

Pour mesurer la densité du méthane, nous avons utilisé l'instrument de surveillance Troposphérique (TROPOMI), qui est la charge utile unique de la mission *Sentinel 5 Precursor (S5P)* de l'Agence spatiale européenne (ASE). L'instrument est un spectromètre à ondes courtes en visée nadir. Il utilise une technique de télédétection passive pour mesurer les rayonnements réfléchis et émis par la Terre au sommet de l'atmosphère. L'instrument collecte des informations correspondant aux longueurs d'onde UV-visible, proche infrarouge (NIR) et infrarouge à ondes courtes (SWIR) via un capteur à deux détecteurs. Le TROPOMI a une largeur de fauchée de sept kilomètres pour la durée d'une seconde et dans la direction de vol. Les données collectées pour chaque fauchée sont divisées en deux parties : la première intègre la position des informations dans la fauchée et la seconde, ses informations spectrales. Le TROPOMI est entré dans sa phase opérationnelle en avril 2018 et devrait terminer sa mission en 2023.

2.2. Principes de mesure


La concentration de méthane fournie par le TROPOMI est un rapport de mélange d'air sec moyenné sur colonne. La concentration en méthane est mesurée en fraction de son abondance dans une colonne atmosphérique par rapport à la quantité correspondante d'air sec. Le calcul a été effectué en additionnant les concentrations déterminées dans chaque sous-couche atmosphérique à l'intérieur de la colonne. La formule est présentée ci-dessous.

$$X_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{V_{air,dry}}$$

Dans l'équation ci-dessus, est le rapport de mélange du méthane dans l'air sec moyenné sur colonne, est la concentration de méthane pour chaque sous-couche de l'atmosphère dans la colonne et, est le volume d'air sec dans la colonne. Ce dernier a été fourni par le Centre européen de prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT) et a été extrait de l'algorithme physique complet (RemoTeC). La formulation ci-dessus signifie également que la concentration de méthane fournie par TROPOMI ne doit pas être considérée comme une concentration de méthane à la surface de la Terre mais comme sa concentration dans une colonne atmosphérique. Son utilisation ici est justifiée par trois facteurs : i) la capacité de couvrir de vastes zones d'intérêt, ii) sa résolution temporelle et spatiale et iii) sa sensibilité à la concentration de méthane en surface, qui peut être utilisée comme indicateur des émissions de méthane au sol. En outre, la concentration de méthane a été calculée avec une sensibilité accrue dans la couche la plus proche de la Terre. Pour plus d'informations sur le processus de validation des données, veuillez vous référer à une note de terrain précédente (Ly et al. 2023).

2.3. Région concernée : le Sénégal

Situé à la périphérie la plus occidentale du continent africain, le Sénégal présente un large éventail de caractéristiques topographiques, agroécologiques et météorologiques qui influencent profondément sa topographie agricole. Le Sénégal couvre une masse continentale d'environ 196 712 kilomètres carrés et affiche une hétérogénéité significative dans ses zones agroécologiques. Ces zones peuvent être classées génériquement en zones sahéliennes, soudano-sahéliennes et soudaniennes. Les zones mentionnées présentent un continuum de niveaux d'aridité ; la région nord,



connue sous le nom de zone sahélienne, étant caractérisée par des conditions semi-arides. En revanche, la partie sud, appelée zone soudanienne, présente un taux d'humidité plus élevé, ce qui favorise une gamme plus complète de cultures.

Le climat du pays est caractérisé par une période aride clairement définie qui s'étend de novembre à mai, suivie d'une période humide de juin à octobre. Le Sénégal présente un gradient de précipitations distinct du nord au sud, caractérisé par une disparité notable en termes de quantité et de prévisibilité des précipitations. La région nord du pays reçoit des quantités relativement plus faibles de pluie, avec une tendance pluviométrique moins fiable en termes de calendrier et de fréquence, contrairement à la partie sud du Sénégal. Ces variables climatiques ont des ramifications notables pour les activités agricoles ; elles influencent les décisions concernant la sélection des cultures, la gestion des ressources en eau et les méthodes d'élevage.

Le paysage agricole des terres cultivées au Sénégal se caractérise par sa diversité et ses contributions substantielles à l'économie et aux moyens de subsistance du pays. Selon les données les plus récentes, le secteur agricole sénégalais fait vivre actuellement environ 70 % de la population et contribue à environ 16 % du produit intérieur brut (PIB) du pays (Banque mondiale 2021). Les terres cultivées considérées englobent une variété de zones agroécologiques, allant des zones semi-arides sahéliennes aux régions plus productives situées dans les parties méridionales. Les principaux produits agricoles cultivés au Sénégal sont le mil, le sorgho, le maïs, les arachides et le riz. La riziculture contribue notamment à environ 35 % de la production céréalière totale du Sénégal (FAO 2021 ; Banque mondiale 2021). Les terres cultivées, qui jouent un rôle crucial dans la sécurité alimentaire et le maintien des moyens de subsistance, sont également soumises à des obstacles importants liés aux impacts du changement climatique et à la dégradation de la qualité des sols. Il est impératif de s'attaquer à ces difficultés en mettant en œuvre des pratiques agricoles durables, en améliorant les techniques de gestion de l'eau et en adoptant de nouvelles technologies, afin de préserver la production et la résilience continues des terres cultivées au Sénégal.

2.4. Analyse des données

Dans cette étude, nous avons utilisé les concentrations de la colonne de méthane de TROPOMI pour le Sénégal entre novembre 2021 et avril 2023. Pour chaque date d'observation – à une fréquence temporelle hebdomadaire – une carte de la concentration de la colonne de CH₄ était disponible pour l'ensemble du pays. Par la suite, pour cibler les terres cultivées, nous avons utilisé la carte discrète de l'occupation du sol du programme spatial *Copernicus Global Land Service* (CGLS-LC100m V3.0 Level 1) comme masque de terres cultivées, avec une résolution spatiale de 100 x 100 mètres. En recoupant chaque observation de méthane TROPOMI avec le masque de terres cultivées, une carte d'émission de la colonne de CH₄ a été obtenue pour le Sénégal au niveau des terres cultivées.

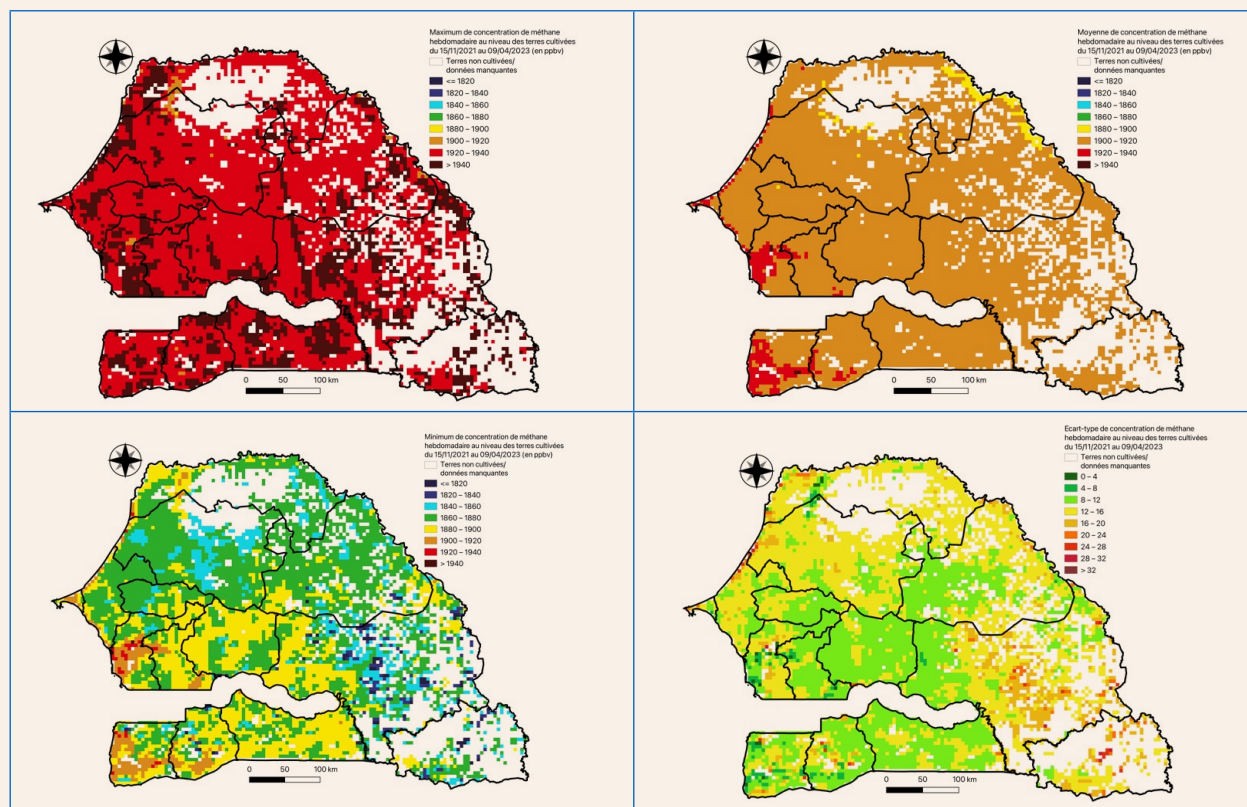
Deux calculs ont donc été effectués : 1) les calculs des statistiques descriptives du méthane au niveau des terres cultivées pour la période d'étude : moyenne, maximum, minimum et écart-type pour les émissions de méthane au niveau des terres cultivées dans le territoire national ; 2) l'agrégation des émissions de méthane au niveau des terres cultivées dans les 14 régions administratives du Sénégal et la représentation graphique de leurs fluctuations dans le temps, et en fonction des semailles, de la croissance et de la récolte des principales cultures telles que le riz, le maïs, le mil et l'arachide.

Le traitement des données et la cartographie ont été réalisés en utilisant respectivement la distribution Anaconda Python (version 4.12.0) et le système Q-GIS (version 3.36.0).

3. Conclusions et analyse

3.1. Vue d'ensemble des émissions de méthane au niveau des terres cultivées au Sénégal

Figure 1 : Concentration du méthane au niveau des terres cultivées de novembre 2021 à avril 2023



Traitement des données et cartographie : les auteurs.

Au Sénégal, les concentrations de méthane (Figure 1) observées au niveau des zones de culture de novembre 2021 à avril 2023 révèlent un spectre complet de valeurs qui reflètent l'interaction de divers facteurs au cours de cette période. L'ensemble des données englobe toute une gamme de concentrations de méthane, les niveaux maximums s'étendant de 1 920 à 1 940 parties par milliard en volume (ppbv) et dépassant occasionnellement ce seuil. Ces limites supérieures indiquent des cas où des influences localisées et des changements de pratiques agricoles coïncident pour produire davantage d'émissions.

Inversement, les concentrations minimales de méthane enregistrées se situent entre 1 860 et 1 900 ppbv. Ces mesures inférieures représentent les émissions de méthane de base inhérentes à la région et servent de point de référence pour évaluer les fluctuations causées par des facteurs externes.

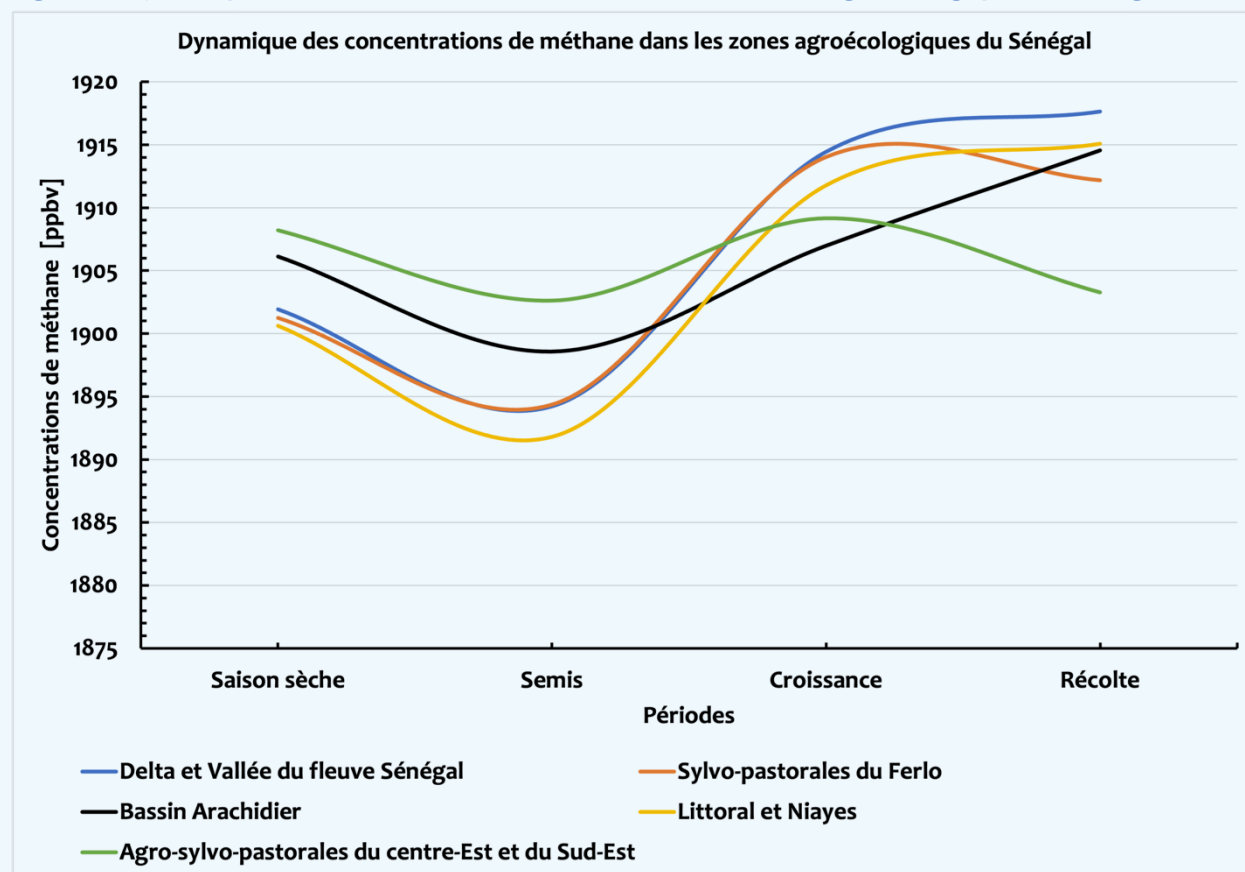
Lorsque l'on considère la concentration moyenne de méthane sur les terres cultivées du Sénégal pendant cette période, la moyenne calculée se situe entre 1 900 et 1 920 ppbv. Cette moyenne offre un aperçu représentatif des émissions de méthane provenant des activités agricoles, compte tenu de l'évolution des pratiques et des conditions au cours de la période étudiée.

Il est à noter que l'écart-type des concentrations de méthane reste constamment inférieur à 16 ppbv, ce qui indique un modèle d'émissions relativement stable et prévisible. Ce faible écart-type implique un certain degré de cohérence des émissions de méthane dans les zones de cultures, malgré les variations potentielles des techniques agricoles, de l'utilisation des terres et des facteurs météorologiques.

La portée temporelle de la collecte de données, qui s'étend de novembre 2021 à avril 2023, fournit des informations précieuses sur les tendances saisonnières et annuelles des concentrations de méthane au niveau des terres cultivées du Sénégal. En englobant plusieurs saisons de croissance et cycles météorologiques, cet ensemble de données aide à comprendre la relation complexe entre les pratiques agricoles et les émissions de méthane. Les variations observées soulignent l'importance d'une surveillance et d'une analyse continues pour élaborer des approches agricoles durables et des stratégies de réduction des émissions, et ainsi contribuer à un avenir plus respectueux de l'environnement pour le Sénégal et la communauté mondiale.

3.2. Vue d'ensemble par zone agroécologique

Figure 2 : Dynamique des concentrations de méthane dans les zones agroécologiques du Sénégal



La Figure 2 illustre les variations des concentrations de méthane atmosphérique au cours des différentes saisons dans diverses zones agroécologiques du Sénégal. Ces données mettent en lumière les interactions complexes entre les processus naturels et les activités humaines qui contribuent aux niveaux de méthane dans l'atmosphère.

Pendant la saison sèche, qui s'étend sur une grande partie de l'année au Sénégal, les concentrations de méthane dans l'atmosphère présentent un profil relativement cohérent, fluctuant à l'intérieur d'une fourchette étroite de 1 900 à 1 910 parties par milliard en volume (ppbv). Cette constance pourrait être attribuée à un équilibre entre les sources et les puits d'émission de méthane pendant cette période.

Alors que le pays s'achemine vers la période des semailles, une tendance notable se dessine. Les concentrations de méthane commencent à diminuer dans l'ensemble de la région. Cette réduction est probablement influencée par des facteurs tels que la diminution de l'activité microbienne dans les zones humides et les sols en raison des conditions plus sèches, ce qui limite la production de méthane. La diminution de la décomposition de la matière organique dans ces conditions pourrait également contribuer à cette baisse.

Cependant, un changement se produit entre les périodes de semailles et de croissance. Les concentrations de méthane dans l'atmosphère recommencent à augmenter. Cette augmentation pourrait être liée à diverses activités anthropiques dans les différentes zones agroécologiques du Sénégal. Les contributions distinctes des différentes régions aux émissions de méthane deviennent évidentes au cours de cette phase.

Dans la zone agricole, qui englobe des régions telles que le delta et la vallée du fleuve Sénégal, les émissions de méthane sont largement associées à des pratiques agricoles spécifiques. La culture du riz dans ces régions est connue pour produire du méthane en raison des conditions anaérobies qui règnent dans les rizières inondées. De même, la culture de l'arachide dans le Bassin Arachidier et la culture de divers produits alimentaires et autres légumes dans les zones du Littoral et des Niayes contribuent aux émissions de méthane provenant des activités agricoles.

En revanche, les zones sylvopastorales du Ferlo et les zones agrosylvopastorales du centre-est et du sud-est pratiquent essentiellement l'élevage bovin. Le méthane est libéré lors de la digestion des ruminants par un processus appelé fermentation entérique. Cela entraîne dans ces régions des émissions continues de méthane qui influencent les concentrations atmosphériques.

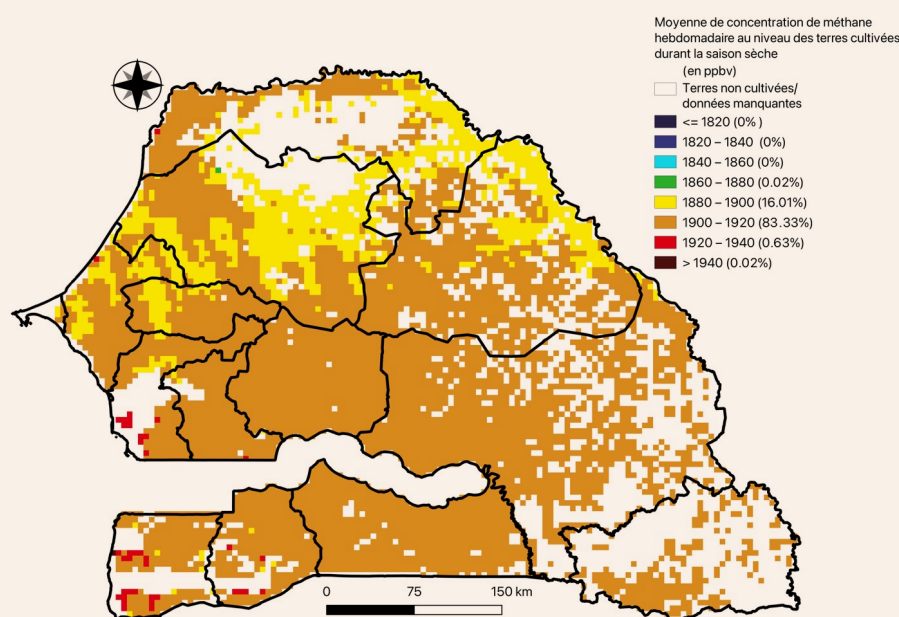
À l'approche de la période des récoltes, les émissions de méthane des zones agricoles continuent d'augmenter, probablement en raison de l'intensification de l'activité agricole et de la libération des gaz stockés dans les sols et les zones humides. Cependant, une tendance paradoxale est observée dans les zones sylvo pastorales. Malgré les émissions continues de méthane dues au pâturage du bétail, la réduction des activités agricoles pendant la période de récolte, attribuée aux pratiques forestières, entraîne une diminution de la production de méthane. Cela souligne le rôle des changements d'utilisation des sols dans la dynamique du méthane.

En conclusion, l'interaction complexe entre les processus naturels et les activités humaines façonne la dynamique des concentrations de méthane atmosphérique dans les diverses zones agroécologiques du Sénégal. La compréhension de ces modèles est cruciale pour une atténuation efficace du changement climatique et une planification durable de l'utilisation des sols.

3.3. Distribution spatiale des émissions

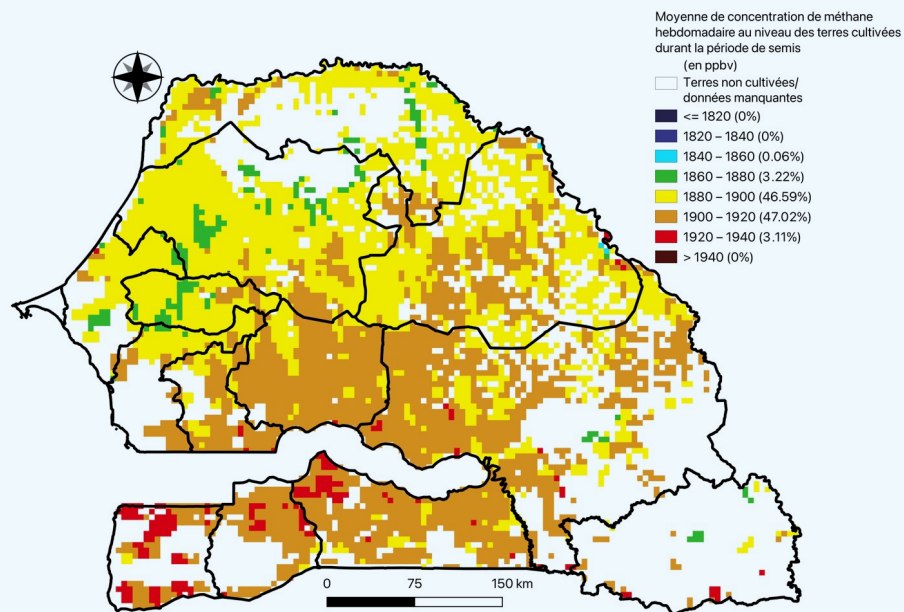
Figure 3 : Concentration de méthane au niveau des terres cultivées pendant la saison agricole au Sénégal

Figure 3.1. Concentrations moyennes hebdomadaires de méthane au niveau des terres cultivées au Sénégal pendant la saison sèche.



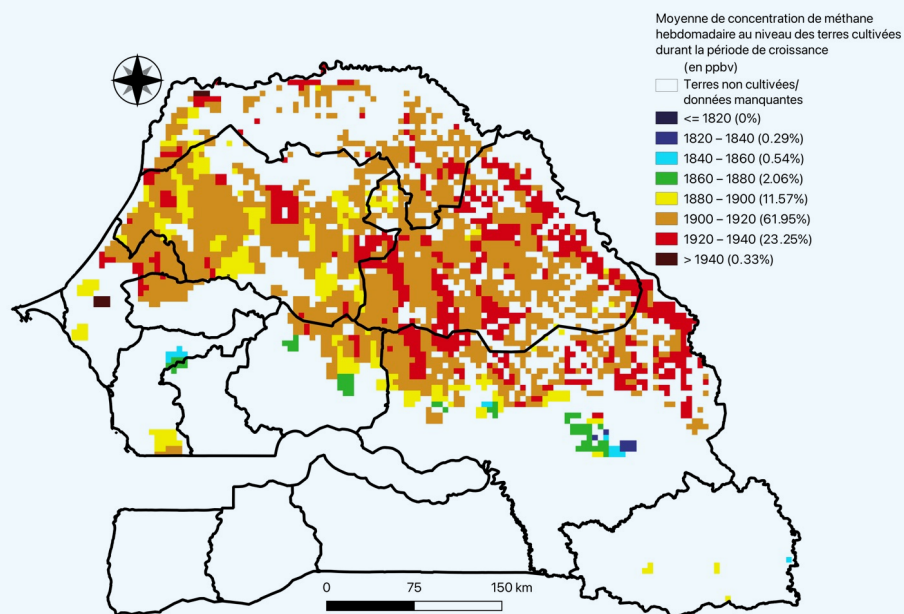
Source des données : Copernicus Sentinel-5P (traité par l'ASE), 2021, TROPOMI Niveau 2 Méthane Total Produits de la colonne. Version 02. Agence spatiale européenne. <https://doi.org/10.5270/S5P-3lcdqiv>; Traitement des données et cartographie : les auteurs.

Figure 3.2. Concentrations moyennes hebdomadaires de méthane au niveau des terres cultivées au Sénégal pendant la saison des semences.



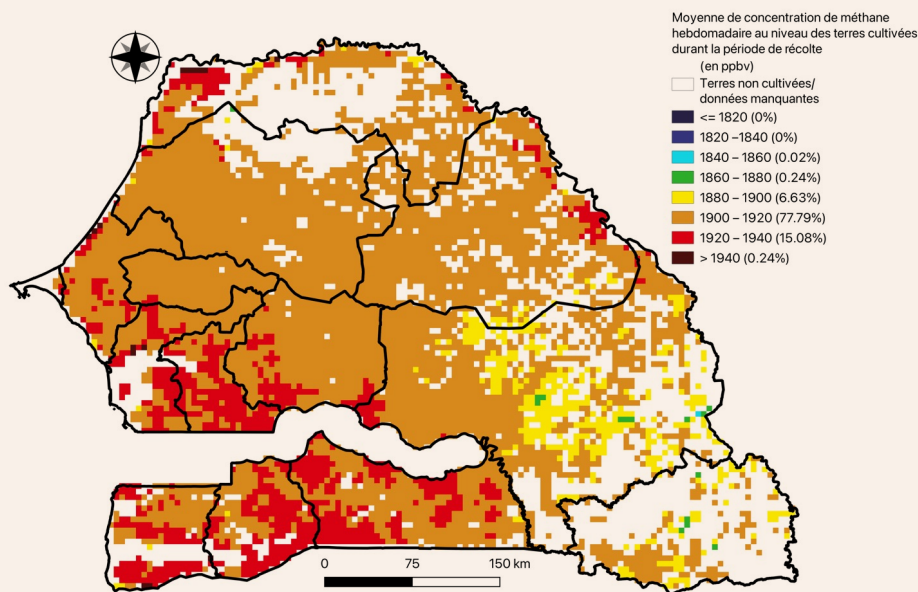
Source des données : Copernicus Sentinel-5P (traité par l'ASE), 2021, TROPOMI Niveau 2 Méthane Total Produits de la colonne. Version 02. Agence spatiale européenne. <https://doi.org/10.5270/S5P-3lcdqiv>; Traitement des données et cartographie : les auteurs.

Figure 3.3. Concentrations moyennes hebdomadaires de méthane au niveau des terres cultivées au Sénégal pendant la période de croissance.



Source des données : Copernicus Sentinel-5P (traité par l'ASE), 2021, TROPOMI Niveau 2 Méthane Total Produits de la colonne. Version 02. Agence spatiale européenne. <https://doi.org/10.5270/S5P-3lcdqiv>; Traitement des données et cartographie : les auteurs.

Figure 3.4. Concentrations moyennes hebdomadaires de méthane au niveau des terres cultivées au Sénégal pendant la période de récolte.



Source des données : Copernicus Sentinel-5P (traité par l'ASE), 2021, TROPOMI Niveau 2 Méthane Total Produits de la colonne. Version 02. Agence spatiale européenne. <https://doi.org/10.5270/S5P-3lcdqiv>; Traitement des données et cartographie : les auteurs.

Les Figures 3.1, 3.2, 3.3 et 3.4 montrent que les terres cultivées du Sénégal révèlent différentes variations de la concentration de méthane lorsqu'elles traversent des phases distinctes de la saison sèche et de la saison des cultures : semailles, croissance et récolte. Ces fluctuations des niveaux de méthane donnent des indications précieuses sur l'interaction complexe entre les pratiques agricoles et les émissions dynamiques de méthane dans l'atmosphère.

De la saison sèche à la saison des semailles

Lors du passage de la saison sèche à la saison des semailles, nous observons une baisse significative de la concentration de méthane. Cette diminution notable peut être attribuée à une combinaison de facteurs, notamment l'évolution des conditions météorologiques et des pratiques agricoles. Par exemple, en abandonnant le brûlage des chaumes et en adoptant d'autres techniques de gestion des résidus – telles que le labourage, le paillage ou l'incorporation des résidus de culture dans le sol – il est possible de réduire les émissions de méthane. Le brûlage des chaumes libère du méthane en raison d'une combustion incomplète dans des conditions de manque d'oxygène, ce qui crée un lien direct entre cette pratique et les niveaux élevés de méthane. En outre, la transition vers la saison des semailles apporte des conditions plus favorables à la croissance des plantes, ce qui implique une humidité accrue du sol et des températures modérées. Rafalska et al. (2023) ont montré que l'absorption de méthane dans les sols des prairies peut varier de -57,7 % à +6,1 % en cas d'augmentation des précipitations, de -37,3 % à +85,3 % en cas de températures élevées, et de +0,87 % à +92,4 % en cas de diminution des précipitations.

D'un point de vue géographique, des changements de couleur significatifs des concentrations de méthane sont évidents dans les différentes régions. La couleur jaune, qui indique une concentration moyenne de méthane, s'étend notamment de 30 %, à partir d'une couverture initiale de 16 % centrée sur la région de Louga à Louga, Saint-Louis, Matam et Thiès. Cette expansion englobe principalement la partie aride du nord du pays.

À l'inverse, la couleur brune, qui indique une forte concentration de méthane, subit une réduction substantielle. Elle passe d'une couverture antérieure de 83 %, soit la quasi-totalité des terres cultivées, à 47 %. Ce changement est maintenant concentré dans les régions du sud, où la saison des pluies commence plus tôt que dans d'autres parties du pays. Cette transformation suggère une diminution des zones émettant des niveaux élevés de méthane, que l'on peut attribuer à l'évolution des pratiques agricoles. Parallèlement, la couleur rouge reste toujours négligeable (0,6 %), ce qui signifie que les émissions de méthane ont été minimales au cours des deux périodes. Ces variations géographiques offrent des indications précieuses sur l'évolution du paysage des émissions de méthane, en corrélation avec l'évolution de la dynamique agricole régionale.

De la période de semailles à la période de croissance

La transition entre la saison des semailles et la saison de croissance révèle des changements subtils dans les pourcentages de couleur, ce qui donne des indications précieuses sur l'évolution des schémas d'émission de méthane. Les activités agricoles jouent un rôle essentiel dans l'évolution des émissions de méthane, influencées par des facteurs tels que les méthodes de préparation du sol, le choix des engrais, la gestion de l'eau et les types de cultures. Les engrais, essentiels à l'agriculture moderne, ont un impact complexe sur les émissions de méthane. En effet, le choix entre les engrais azotés et les engrais organiques influe considérablement sur les émissions de méthane en modifiant les conditions du sol et la dynamique microbienne. Les engrais azotés, essentiels à la productivité, modifient les conditions du sol, favorisant le développement des micro-organismes producteurs de méthane et augmentant ainsi les émissions (Pittelkow et al. 2013). Les stratégies de gestion de l'eau, telles que l'inondation des rizières, créent des conditions optimales pour le développement des microbes producteurs de méthane (Xu et al. 2022).

La couleur jaune subit une baisse substantielle de 35 %, passant d'une couverture de 46 % (la partie nord du pays, principalement) à 11 %. Cette réduction suggère une baisse du nombre de régions émettant des concentrations moyennes de méthane, peut-être en raison d'une augmentation des émissions initiales liées à la croissance.

En revanche, la couleur brune connaît une augmentation notable, passant de 47 % à 61 % de la superficie couverte. Ce changement signifie une transition dans le paysage des terres cultivées vers des régions caractérisées par des émissions de méthane plus élevées, comme l'indique la couleur brune. Cette augmentation met en évidence une évolution prononcée vers des zones présentant des concentrations élevées de méthane et correspond à des processus agricoles contribuant à l'intensification des émissions. La concentration de méthane augmente notamment entre la saison des semailles et la saison de croissance. De même, la couleur rouge connaît un bond significatif, passant de 3 % à 23 %. Cette évolution vers des émissions rougeâtres prédomine dans le nord-est du pays, où les rizières sont prédominantes et contribuent de manière significative aux émissions de méthane. Il s'agit d'une transition des zones à faible concentration vers des zones à très forte concentration de méthane, potentiellement influencée par l'interaction complexe entre la photosynthèse, l'absorption de nutriments et le développement de la biomasse.


De la saison de croissance à la saison de récolte

La transition entre la saison de croissance et la saison de récolte continue de révéler des changements complexes dans les pourcentages de couleur, mettant en lumière l'évolution du paysage des émissions de méthane. La période des activités de récolte et de post-récolte représente une phase charnière dans les cycles agricoles et exerce une influence substantielle sur les émissions de méthane. À la fin de la saison de croissance, les pratiques agricoles changent, ce qui modifie les schémas d'émission de méthane. L'acte de récolte implique le prélèvement des cultures matures des champs, ce qui risque de perturber la structure du sol et de créer des poches d'environnement privées d'oxygène. Il a été démontré que les changements de température du sol, souvent liés à une réduction de l'ombrage, ont un impact sur les émissions de méthane (Zerva et Mencuccini 2005). La densité apparente du sol peut jouer un rôle dans les émissions, à la suite de la perturbation et du compactage du sol, en particulier à cause des équipements de récolte mécanisés (Yashiro et al. 2008 ; Mojeremane et al. 2012). Ces conditions favorisent les activités microbiennes anaérobies, ce qui entraîne la production de méthane.

En outre, les transformations subies par les résidus de culture pendant la récolte les rendent plus accessibles à la dégradation microbienne, contribuant ainsi à des émissions supplémentaires de méthane. Les pratiques post-récolte, qui englobent la gestion des résidus, le transport et le stockage, jouent également un rôle dans la dynamique des émissions de méthane. Des méthodes inefficaces de gestion des résidus, telles que le brûlage ou le fait de les laisser à découvert, peuvent accélérer les émissions de méthane. De même, le transport et le stockage des récoltes en milieu anaérobie peuvent entraîner des émissions de méthane provenant de la décomposition de la matière organique.

La distribution spatiale de la couleur jaune diminue progressivement de 5 points en pourcentage, passant de 11 % à 6 % de la zone couverte, désormais principalement située dans le sud-est du pays, plus précisément dans la région de Tambacounda. Cette diminution laisse présager une nouvelle réduction des zones émettant de faibles concentrations de méthane, probablement en raison d'une diminution de la photosynthèse et d'une réduction de l'activité des cultures. La concentration de méthane reste relativement stable ou connaît une légère augmentation entre la saison de croissance et la saison de récolte.

Parallèlement, la couleur brune reste dominante, avec une augmentation significative de 61 % à 77 %, couvrant désormais la quasi-totalité des terres cultivées. Cette expansion signifie une évolution vers des régions caractérisées par des concentrations élevées de méthane, potentiellement attribuées aux pratiques post-récolte et à l'enlèvement des cultures. En revanche, la couleur rouge, qui représente les très fortes concentrations de méthane, diminue de



23 % à 15 %. Ces zones de forte concentration de méthane sont maintenant principalement situées dans le Bassin Arachidier et dans la partie nord-ouest du pays, qui sont les principales zones de culture du Sénégal. Ce changement met en évidence une transition des zones à très forte concentration de méthane vers des zones à concentration moyenne, reflétant l'aboutissement du cycle de vie de la culture et l'influence de certaines interventions agricoles spécifiques.

De la saison des récoltes à la saison sèche

Le passage de la phase post-récolte à la saison sèche entraîne des changements dans la dynamique des émissions de méthane. Les activités post-récolte, telles que la gestion des résidus et le défrichage des champs, peuvent influencer les schémas d'émission de méthane. Avec le début de la saison sèche, caractérisée par une diminution des précipitations et des changements des niveaux d'humidité du sol, les conditions de production et les émissions de méthane peuvent évoluer. La diminution de l'humidité du sol pendant cette période peut potentiellement limiter la disponibilité d'environnements anaérobies nécessaires à l'activité microbienne productrice de méthane (Conrad 1996 ; Segers 1998). Par conséquent, les émissions de méthane pendant la saison sèche peuvent diminuer par rapport à la phase post-récolte.

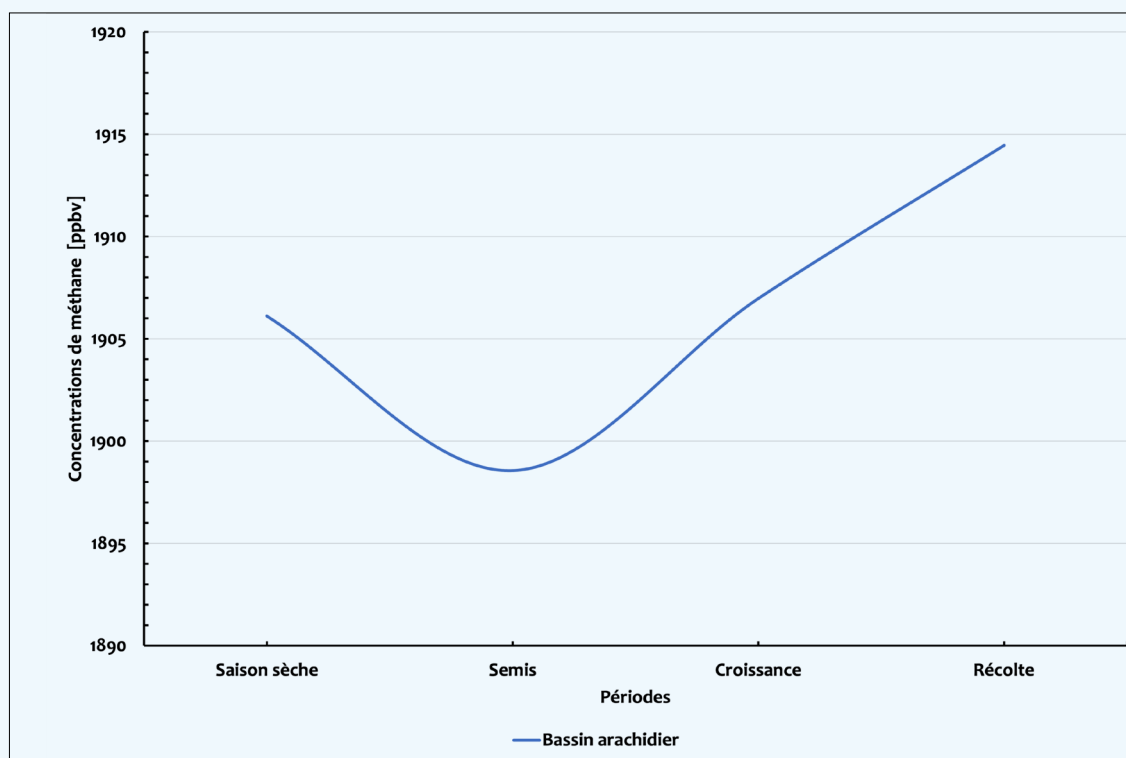
Un changement géographique devient évident lorsque l'on compare la saison des récoltes à la saison sèche ; la comparaison révèle un modèle distinct qui représente des changements dans la dynamique de la concentration de méthane. La couleur jaune, qui symbolise une faible concentration de méthane, montre une augmentation constante de 5 %. Cette transition implique un déplacement du sud-est vers le nord du pays, ce qui implique une réduction des émissions au cours de ce déplacement.

À l'inverse, la couleur brune, qui domine à 77 % pendant la période des récoltes, connaît une augmentation marginale à 83 % pendant la saison sèche. La couleur rouge, représentative d'une forte concentration de méthane et concentrée principalement dans la région nord-ouest du pays, connaît quant à elle une baisse significative, passant de 15 % pendant la saison des récoltes à seulement 0,6 % pendant la saison sèche. Ce changement géographique observé dans la concentration de méthane au fil des saisons donne des indications précieuses sur l'évolution de la dynamique des émissions, tout en mettant en lumière leur lien avec des facteurs agricoles et environnementaux spécifiques.

3.4. Variations saisonnières des émissions

Au niveau des terres cultivées, le méthane est généralement produit lors de la décomposition microbienne de la matière organique dans des conditions anaérobies (sans oxygène) (Conrad 2020). Ce processus, connu sous le nom de méthanogenèse, se produit très souvent dans les zones humides où les sols inondés sont privés de dioxygène. Il produit du méthane anthropique qui s'échappe dans l'atmosphère à partir de l'environnement anaérobie et contribue ainsi aux concentrations totales de méthane dans l'atmosphère.

Figure 4 : Concentration de méthane au niveau des terres cultivées pendant le cycle du maïs, du mil et du sorgho



La Figure 4 présente une analyse complète, mettant en évidence des modèles complexes de concentration de méthane intrinsèques aux phases cycliques de la culture du maïs, du mil et du sorgho. Cette exposition empirique, basée sur une analyse méticuleuse des données, englobe des étapes et des régions distinctes et se termine par des observations significatives.

Les schémas saisonniers des concentrations de méthane atmosphérique dans les régions où le maïs, le mil et le sorgho sont cultivés présentent des caractéristiques distinctes par rapport à des plantes comme le riz qui sont cultivées dans des conditions d'inondation. Les émissions de méthane ont tendance à être plus faibles pour ces cultures céréalières, mais elles sont tout de même influencées par une série de facteurs, notamment le climat, les états du sol et les pratiques agricoles.

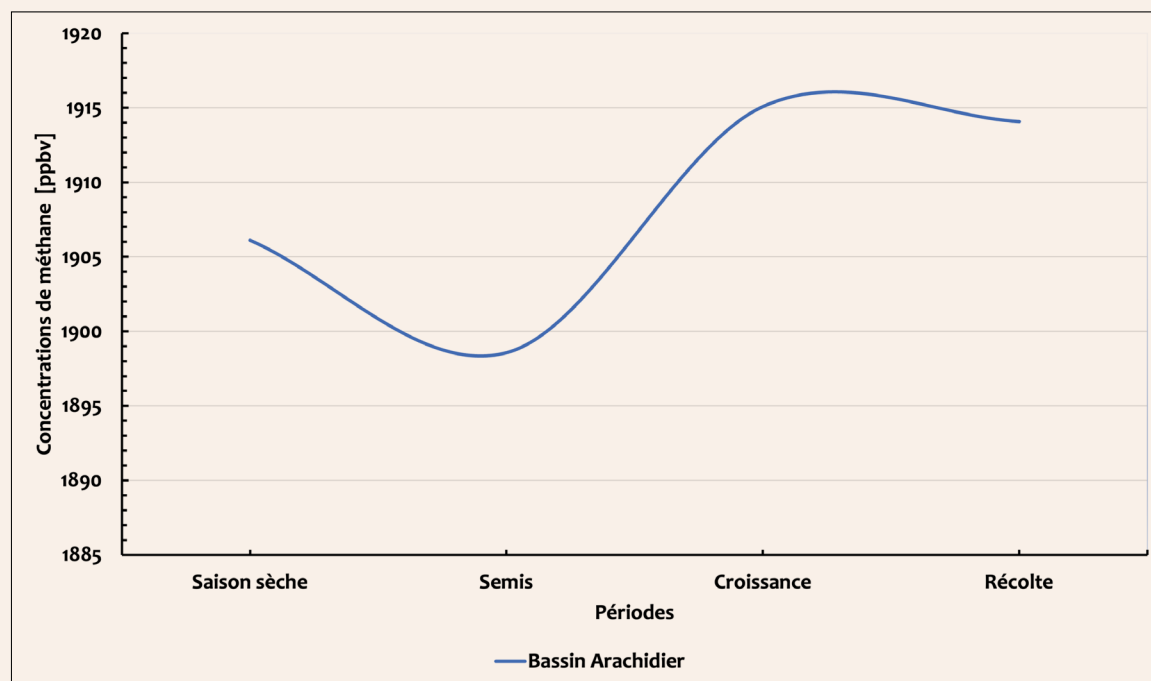
Pendant la saison sèche, les émissions de méthane restent généralement faibles. La diminution des précipitations entraîne une baisse de l'humidité du sol, ce qui se traduit par des conditions plus aérobies (riches en oxygène). Comme les sols plus secs sont moins propices à la production de méthane, sa concentration atmosphérique moyenne pendant cette période est d'environ 1 906,12 ppbv.

Lorsque la saison des semailles commence et que le maïs, le mil et le sorgho sont plantés, les émissions de méthane restent faibles. L'acte de semer lui-même ne libère généralement pas de quantités significatives de méthane dans l'atmosphère. Par conséquent, la concentration moyenne de méthane dans l'atmosphère diminue légèrement pour atteindre environ 1 898,56 ppbv pendant cette phase.

Pendant la période de croissance de ces cultures, la teneur en eau du sol augmente généralement en raison des précipitations naturelles ou de l'irrigation. Par conséquent, les concentrations de méthane connaissent une augmentation modérée, atteignant environ 1 906,97 ppbv. Cette augmentation correspond à l'activité microbienne accrue qui peut se produire avec des niveaux d'humidité plus élevés.

Il est intéressant de noter que la récolte du maïs, du mil et du sorgho n'est pas associée à des émissions significatives de méthane. Ces cultures ne créent généralement pas de conditions anaérobies pendant le processus de récolte. Malgré cela, la concentration moyenne de méthane dans l'atmosphère continue d'augmenter, atteignant environ 1 914,45 ppbv.

Figure 5 : Concentration de méthane au niveau des terres cultivées pendant le cycle de culture de l'arachide au Sénégal



Les tendances saisonnières des concentrations de méthane atmosphérique au niveau des zones de culture de l'arachide présentent des caractéristiques distinctes par rapport aux zones où l'on cultive le riz. L'arachide, cultivée sur des terres non inondées, a tendance à produire moins d'émissions de méthane. La concentration de méthane dans l'atmosphère des zones de culture de l'arachide suit des schémas influencés par les variations climatiques saisonnières et les pratiques agricoles.

Pendant la saison sèche, lorsque le sol a tendance à être plus sec et plus aérobie, les émissions de méthane sont généralement faibles. En effet, les sols secs sont moins propices à la production de méthane. Dans le Bassin Arachidier, la concentration atmosphérique moyenne de méthane est de 1 906,12 ppbv pendant la saison sèche, ce qui reflète les émissions minimales dans ces conditions.

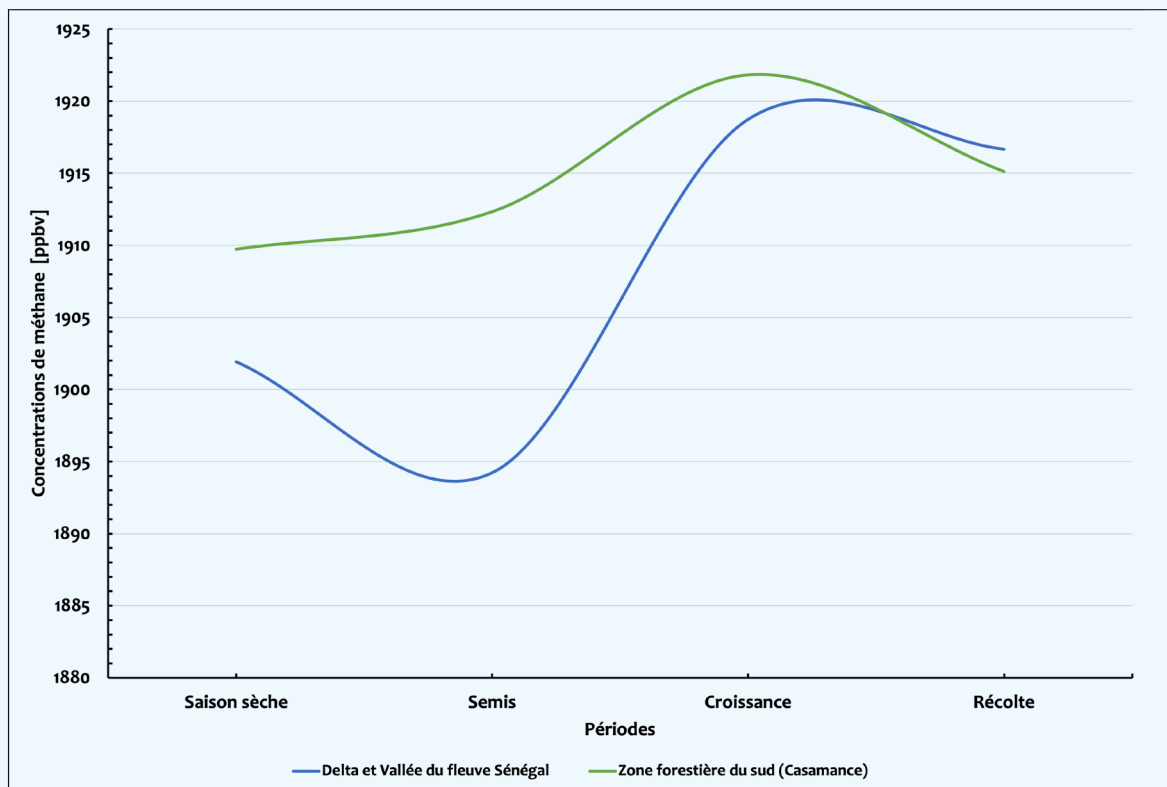
Lorsque la saison des semences commence et que les arachides sont plantées, les concentrations de méthane restent faibles, comme pendant la saison sèche, la concentration moyenne de méthane dans l'atmosphère tombant à 1 898,56 ppbv. Les opérations de semis ne libèrent généralement pas de quantités importantes de méthane dans l'atmosphère, ce qui contribue à maintenir les émissions à un faible niveau au cours de cette phase.

Au fur et à mesure que les plants d'arachide poussent et que l'humidité du sol augmente en raison des précipitations naturelles ou de l'irrigation, les concentrations de méthane augmentent légèrement. La concentration moyenne de méthane dans l'atmosphère atteint environ 1 915,08 ppbv, ce qui reflète l'influence de l'humidité sur l'activité microbienne et la production de méthane.

La récolte des arachides en elle-même n'est pas associée à des émissions significatives de méthane. Comme pour les autres étapes, les concentrations moyennes de méthane dans l'atmosphère diminuent pendant la période de récolte, atteignant environ 1 914,08 ppbv.

En résumé, les variations saisonnières des concentrations atmosphériques de méthane au niveau des zones de culture de l'arachide sont influencées par l'absence de conditions d'inondation et par la nature unique des pratiques de cette culture. Cela démontre l'interaction complexe entre les pratiques agricoles, les conditions du sol et les émissions de méthane dans ces régions.

Figure 6 : Concentration de méthane au niveau des terres cultivées pendant la saison du riz



La Figure 6 fournit une représentation globale des niveaux de concentration de méthane observés pendant les saisons de culture du riz dans diverses régions.

La concentration atmosphérique de méthane présente des schémas saisonniers intrigants qui correspondent aux différentes phases de la culture du riz. Ces fluctuations sont particulièrement prononcées dans les zones de culture du riz. Au fur et à mesure du cycle, la concentration de méthane dans l’atmosphère subit des changements notables, ce qui met en évidence la relation dynamique entre la croissance du riz et les émissions de méthane.

Pendant la saison sèche, caractérisée par des rizières non inondées et des terres en jachère, les émissions de méthane restent relativement faibles, comme en témoignent les concentrations de méthane d’environ 1 901,92 ppbv dans la vallée du fleuve Sénégal et 1 909,73 ppbv dans la zone forestière méridionale (Casamance). L’absence d’eau stagnante limite les conditions anaérobies nécessaires au développement des microbes producteurs de méthane, ce qui se traduit par des émissions minimales de méthane pendant cette période.

Avec le début de la saison des semailles, un changement se produit lors des premières inondations des rizières. L’introduction de conditions anaérobies dans le sol peut déclencher la production de méthane. Cependant, dans les premiers stades de l’inondation, les émissions de méthane restent modérées, augmentant jusqu’à environ 1 912,33 ppbv dans la zone forestière du sud (Casamance) et diminuant légèrement jusqu’à 1 894,22 ppbv dans la vallée du fleuve Sénégal.

Au fur et à mesure que les plants de riz continuent de pousser et que les champs restent inondés, les concentrations de méthane augmentent progressivement. Cette tendance est attribuée à la décomposition continue de la matière organique dans le sol gorgé d’eau, y compris les racines et les résidus des plantes. Ces éléments constituent une source constante de carbone pour les microbes producteurs de méthane, ce qui favorise la production du méthane. La combinaison de ces facteurs entraîne des pics de concentration de méthane dans l’atmosphère, atteignant environ 1 921,82 ppbv dans la zone forestière du sud (Casamance) et 1 918,73 ppbv dans la vallée du fleuve Sénégal.

Il faut noter que le processus de récolte du riz lui-même ne contribue pas de manière significative aux émissions de méthane, contrairement aux pratiques de gestion des champs qui suivent la récolte, qui jouent un rôle significatif. Souvent, les champs sont drainés ou asséchés après la récolte, ce qui introduit des conditions plus aérobies et réduit par conséquent les émissions de méthane. Dans la zone forestière du sud (Casamance), les concentrations atmosphériques de méthane diminuent jusqu’à environ 1 915,12 ppbv, et dans la vallée du fleuve Sénégal, elles diminuent jusqu’à environ 1 916,66 ppbv.

4. Discussion sur les options d'atténuation

La mise en œuvre de méthodes d'atténuation visant à réduire les émissions de méthane dans le secteur agricole du Sénégal nécessite un effort de collaboration pour intégrer des techniques agricoles améliorées et des pratiques de gestion durable de l'eau. En adoptant des méthodes agroécologiques, telles que l'agriculture de conservation, l'agroforesterie et la rotation des cultures, il est possible d'améliorer la santé des sols et d'atténuer les émissions de méthane grâce à la modification de l'activité microbienne dans les zones agricoles.

L'adoption de types de cultures résistantes à la sécheresse et au climat peut réduire efficacement la dépendance à l'égard des méthodes d'irrigation qui consomment d'importantes quantités d'eau. Cela permet de minimiser les émissions de méthane provenant des sols gorgés d'eau, tout en améliorant le rendement des cultures.

L'utilisation de méthodes d'irrigation efficaces, telles que les systèmes de goutte-à-goutte ou d'aspersion, et l'adoption de stratégies de préservation de l'eau, telles que l'alternance de l'humidification et de l'assèchement, peuvent réduire les émissions de méthane provenant des terres cultivées sous irrigation tout en répondant au problème de la pénurie d'eau. En outre, la promotion d'initiatives communautaires de gestion de l'eau et l'assistance pour la restauration des terres dégradées peuvent améliorer la capacité des sols à retenir l'humidité. Ces mesures permettront alors de minimiser les pratiques d'irrigation excessives et de réduire, par conséquent, les émissions de méthane.

Grâce à l'intégration stratégique de pratiques agricoles améliorées et de méthodes de gestion durable de l'eau, le Sénégal peut se mettre sur une trajectoire caractérisée par une capacité de résilience face aux défis liés au climat et par un plus grand engagement en faveur de la gestion de l'environnement au sein de son secteur agricole.

Références

- Bergamaschi, P., C. Frankenberg, J.F. Meirink, M. Krol, F. Dentener, T. Wagner, U. Platt, et al. 2007. "Satellite cartography of atmospheric methane from SCIAMACHY on board ENVISAT: 2. Evaluation based on inverse model simulations." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112, issue D2.
- Conrad, R. 1996. "Soil microorganisms as controllers of atmospheric trace gases (H₂, CO, CH₄, OCS, N₂O, and NO)." *Microbiological Reviews* 60, no.4: 609-640.
- Conrad, R. 2020. "Methane Production in Soil Environments-Anaerobic Biogeochemistry and Microbial Life between Flooding and Desiccation." *Microorganisms* 8 no.6: 881.
- Smith, P., D. Reay, and J. Smith. 2021. "Agricultural methane emissions and the potential for mitigation." *Phil. Trans. R. Soc. A*. 3792020045120200451. <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0451>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2023. *FAO au Sénégal*. Accessed 13 November 2023. <http://www.fao.org/senegal/en/>
- Palmer P., L. Feng, M.F. Lunt, R.J. Parker, H. Bösch, X. Lan, A. Lorente, and T. Borsdorff. 2021. "The added value of satellite observations of methane for understanding the contemporary methane budget". *Phil. Trans. R. Soc. A*. 379. <http://doi.org/10.1098/rsta.2021.0106>
- Bin-feng, S., Z. Hong, L. Yi-zhong, L. Fei, and W. Xiao-ke. 2016. "The effects of nitrogen fertilizer application on methane and nitrous oxide emission/uptake in Chinese croplands". *Journal of Integrative Agriculture*, 15: 440-450. 10.1016/S2095-3119(15)61063-2
- Kuze, A., H. Suto, M. Nakajima, and T. Hamazaki. 2009. "Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring." *Applied Optics* 48, no.35: 6716-6733.
- Ly, R., A. Ndoye, M. Dia, and K. Dia. 2023. *Guidelines for Measuring Changes in Greenhouse Gases, Land Uses, and Climate Parameters using Satellite Remote Sensing Data*. CACCI Field Notes, No. 05. Kigali : AKADEMIYA2063. <https://doi.org/10.54067/caccifn.05>
- Mojeremane, W., R.M. Rees, and M. Mencuccini. 2012. "The effects of site preparation practices on carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes from a peaty gley soil." *Forestry: An International Journal of Forest Research*, Volume 85, Issue 1: 1-15. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpro49>

Myhre, G., D. Shindell, F.M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestedt, J. Huang, D. Koch, J.F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura, and H. Zhang . 2013. “Anthropogenic and natural radiative forcing.” In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by T.F. Stocker, D. Qin, G.K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley, 659-740. Cambridge and New York: Cambridge University Press.

Nisbet, E. G., M.R. Manning, E.J. Dlugokencky, R.E. Fisher, D. Lowry, S.E. Michel, et al. 2019. “Very strong atmospheric methane growth in the four years 2014–2017: Implications for the Paris Agreement.” *Global Biogeochemical Cycles* 33, no.3: 318-342.

Petersen, A. K., T. Warneke, C. Frankenberg, P. Bergamaschi, C. Gerbig, J. Notholt, M. Buchwitz, O. Schneising, and O. Schrems. 2010. “First ground-based FTIR observations of methane in the inner tropics over several years.” *Atmos. Chem. Phys.*, 10: 7231–7239. <https://doi.org/10.5194/acp-10-7231-2010>

Pittelkow, C.M., M.A. Adviento-Borbe, J. Hill, J. Six, C. van Kessel, and B.A. Linquist. 2013. “Yield-scaled global warming potential of annual N₂O and CH₄ emissions from continuously flooded rice systems in response to N input.” *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 177: 10-20.

Rafalska, A., A. Walkiewicz, B. Osborne, K. Klumpp, and A. Bieganski. 2023. “Variation in methane uptake by grassland soils in the context of climate change - A review of effects and mechanisms.” *Science of the Total Environment* 87, no.2: 162127.

Saunois, M., P. Bousquet, B. Poulter, A. Peregon, P. Ciais, J.G. Canadell, R.B. Jackson, et al. 2016. “The global methane budget 2000–2012.” *Earth System Science Data* 8, no.2: 697-751.

Saunois, M., A.R. Stavert, B. Poulter, P. Bousquet, J.G. Canadell, R.B. Jackson, P.A. Raymond, et al. 2020. “The Global Methane Budget 2000–2017.” *Earth System Science Data* 12, no.3: 1561-1623.

Segers, R. 1998. “Methane production and methane consumption: a review of processes underlying wetland methane fluxes.” *Biogeochemistry* 41 no.1: 23-51.

Banque mondiale. 2021. *Data: Senegal*. Accessed 13 November 2023. <https://data.worldbank.org/country/senegal>

Xu, P., W. Zhou, M. Jiang, I. Khan, W. Tongtao, M. Zhou, B. Zhu, and H. Ronggui. 2022. “Methane emission from rice cultivation regulated by soil hydrothermal condition and available carbon and nitrogen under a rice–wheat rotation system.” *Plant and Soil*. 480: 283–294.


Yashiro, Y., W.R. Kadir, T. Okuda, and H. Koizumi. 2008. “The effects of logging on soil greenhouse gas (CO₂, CH₄, N₂O) flux in a tropical rain forest, Peninsular Malaysia.” *Agricultural and Forest Meteorology* 148, no. 5: 799-806.

Rajendran, S., H. Park, J. Kim, S.J. Park, D. Shin, J.-H. Lee, Y.H. Song, N.-C. Paek, and C.M. Kim. 2023. “Methane Emission from Rice Fields: Necessity for Molecular Approach for Mitigation.” *Rice Science*, ISSN: 1672-6308. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2023.10.003>


Zerva, A., and M. Mencuccini. 2005. “Short-term effects of clearfelling on soil CO₂, CH₄, and N₂O fluxes in a Sitka spruce plantation.” *Soil Biology and Biochemistry* 37, no. 11: 2025-2036.








AKADEMIYA2063 est financée par l'Agence américaine pour le développement international (USAID), la Fondation Bill et Melinda Gates (BMGF), le ministère fédéral allemand de la coopération économique et du développement (BMZ), la Banque africaine de développement (BAD), le Bureau des affaires étrangères et du Commonwealth du Royaume-Uni (FCDO), le Centre mondial pour l'adaptation (GCA) et l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Les opinions exprimées dans cette publication ne reflètent pas nécessairement celles des donateurs.

 AKADEMIYA2063 | Kicukiro/Niboye KK 341 St 22 | 1855 Kigali-Rwanda

 +250 788 318 315 | +221 33 869 28 81

 kigali-contact@akademiya2063.org | dakar-contact@akademiya2063.org

 www.akademiya2063.org

    @AKADEMIYA2063

