



Riziculture irriguée et changement climatique
*Approfondissements méthodologiques pour la finance climat
et la contribution aux trajectoires long terme AFOLU bas
carbone et résiliente*

Livrable 1.1 – Synthèse bibliographique



Février 2023



Sommaire

Sigles et acronymes	2
Préambule	3
1. Principaux systèmes de riziculture irriguée.....	4
1.1. Justification de l'étude	4
1.1.1. Systèmes rizicoles et zones agroécologiques.....	4
1.1.2. Riziculture irriguée dans le monde	6
1.1.3. La place de la riziculture dans les émissions/absorptions de GES mondiales	7
1.2. Typologies existantes	8
1.3. Riziculture irriguée– pratiques culturales.....	11
1.3.1. Gestion de l'eau.....	11
1.3.2. Fertilisation	11
1.3.3. Travail du sol et autres pratiques	12
2. Pratiques agricoles et impact sur les émissions/absorptions de GES.....	14
2.1. Quelques rappels sur l'effet de serre et les GES, notamment CO ₂ , CH ₄ et N ₂ O	14
2.2. Mécanismes d'émission/absorption de GES dans les rizières.....	15
2.2.1. Stockage du carbone dans le sol	15
2.2.2. Mécanismes d'émission/absorption de GES.....	16
2.2.3. Profil type des émissions/absorptions de GES	16
2.3. Comptabilisation des émissions de GES issues des rizières hors CO ₂	17
2.3.1. Méthodes et outils de comptabilisation des émissions et absorption de GES.....	17
2.3.2. Estimation des émissions de CH ₄	19
2.3.3. Estimation des émissions de N ₂ O	21
2.4. Emissions/absorption de CO ₂	22
2.4.1. Stockage du carbone du sol (SOC).....	22
2.4.2. Emissions dues au drainage de sols organiques	24
2.5. Gestion des incertitudes	24
3. Potentiel de réduction des différentes pratiques culturales	25
3.1. Emissions par type de système.....	25
3.2. Effet des pratiques culturales sur les émissions	26
3.2.1. Gestion de l'eau.....	27
3.2.2. Fertilisation	28
3.2.3. Travail du sol et autres pratiques	30
3.2.4. Système d'irrigation, réhabilitation/création de rizières	30

Liste des figures

Figure 1 : Classification des zones agroécologiques entre 40° de latitude Sud jusqu'à 53° Nord, aire de répartition du riz (GAEZ v4 Data Portal).....	4
Figure 2 : En haut - Transect fictif des différents types de rizicultures selon la topologie/maitrise de l'eau (TREBUIL et BARBIER, 2004) / En bas – Exemple de multiples systèmes de riziculture au sein d'un même bassin versant à Madagascar (GUEGAN et al, 2009)	5
Figure 3 : Nombre de cycles de riz par an par pays – RiceAtlas (LABORTE et al., 2017).....	7
Figure 4 : Emissions de CH ₄ issues des rizières, dont 90% proviennent d'Asie (EPULE et al., 2011) ..	8
Figure 5 : Principales zones rizicoles et systèmes de culture dans le monde (RAO et al. 2017) sur la base de (GRISP, 2013)	9
Figure 6 - Rôles du carbone, de l'azote et de l'eau dans la production, l'adaptation et l'atténuation (auteurs, 2022)	14
Figure 7 : estimations récentes des stocks de SOC pour les principaux écosystèmes terrestres (LIU et al., 2021).....	15
Figure 8 : Bilan EXACT d'AWMP (SalvaTerra, 2022 ; sur base des données AFD)	31

Sigles et acronymes

ACV	Analyse de cycle de vie
ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
AFD	Agence française de développement
AFEID	Association française pour l'eau agricole, une irrigation et un drainage durable
AFOLU	<i>Agriculture, Forestry and Other Land Use</i> (Agriculture, forêt et autres utilisations des terres)
AWD	<i>Alternate wetting and drying</i> (Irrigation intermittente)
AWMP	<i>Agriculture Water Management Project in the North-West (Projet de gestion des eaux agricoles dans le Nord-Ouest) au Ghana</i>
C	Carbone
CC	Changement climatique
CCNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
CDN	Contribution déterminée au niveau national
CH ₄	Méthane
CMA	Conférence des Parties servant de réunion des Parties à l'Accord de Paris
CO ₂	Dioxyde de carbone
DA	Données d'activités <i>ou Activity data en anglais</i>
EX-ACT	<i>Ex-Ante Carbon-balance Tool</i> (Outil de bilan carbone ex-ante)
FAO	Organisation pour l'alimentation et l'agriculture
FE	Facteur d'émission <i>ou Emission Factor en anglais</i>
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat

GRiSP	<i>Global Rice Science Partnership</i> (Partenariat mondial pour la science du riz)
GZAE	<i>Global Agro-Ecological Zoning</i> (Zonage agro-écologique mondial)
H ₂ O	Eau
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (voir GIEC)
IRRI	<i>International Rice Research Institute</i> (Institut international de recherche sur le riz)
K	Potassium
MO	Matière organique
N	Azote
NEXT	<i>Nationally Determined Contribution Expert Tool</i> (Outil d'expertise sur les contributions déterminées au niveau national)
N ₂ O	Protoxyde d'azote ou oxyde nitreux
P	Phosphore
PAIS	Projet d'appui à l'irrigation dans le Sud d'Haïti
PRG	Pouvoir de réchauffement global
SOC	<i>Soil Organic Carbon</i> (carbone organique du sol)
VC	<i>Value chain</i> (chaîne de valeur)
ZAE	Zone agroécologique

Préambule

SalvaTerra a été mandaté par l'Agence française de développement (AFD) et l'Association française pour l'eau agricole, une irrigation et un drainage durable (AFEID) pour mener à bien l'étude « **Riziculture irriguée et changement climatique : Approfondissements méthodologiques pour la finance climat et la contribution aux trajectoires long terme Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU) bas carbone et résiliente** ». Ce livrable 1.1 correspond à la tâche 1 « **Revue bibliographique pour caractérisation des systèmes de riziculture irriguée et lien avec le changement climatique** » telle que formulée dans les termes de référence de l'étude.

En première partie, les **principaux systèmes rizicoles** sont caractérisés sous le prisme des pratiques culturales et les **typologies de références** sont recensées.

La seconde partie présente les **émissions et absorptions de gaz à effet de serre (GES) par les systèmes rizicoles** et une analyse des **méthodes de comptabilisation des émissions/absorptions** pour la riziculture irriguée issues des lignes directrices du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).

Enfin, un **ordre de grandeur des émissions/absorptions de GES** des systèmes principaux, ainsi que le **potentiel d'atténuation** des pratiques plus vertueuses sont renseignés en troisième partie.

Par soucis de cohérence et de clarté, les éléments relatifs à l'adaptation au changement climatique (CC) des systèmes de riziculture irriguée seront présentés dans le livrable relatif à la tâche 4 « Analyse adaptation », en préambule à la description des méthodes et outils à mobiliser lors des étapes principales d'une étude de vulnérabilité d'un projet de riziculture irriguée.

1. Principaux systèmes de riziculture irriguée

1.1. Justification de l'étude

1.1.1. Systèmes rizicoles et zones agroécologiques

Le riz est cultivé dans plus de 100 pays répartis sur tous les continents et dans des conditions agroécologiques et socio-économiques variées. Il est implanté dans des zones situées aux deux extrêmes du spectre climatique en termes de précipitations (> 5 100 mm/an en Birmanie et < 100 mm/an en Arabie Saoudite), de températures (33°C au Pakistan et 17°C au Japon en moyenne annuelle) et d'altitudes (zones côtières en Asie du Sud-Est comme en zones de haute montagne > 2 600 m d'altitude dans l'Himalaya) (Global Rice Science Partnership - GRiSP, 2013)¹.

L'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) définit les zones agroécologiques (ZAE) comme des « Zones géographiques présentant des caractéristiques biophysiques homogènes de ressources naturelles, y compris le climat (par exemple, les précipitations, le rayonnement solaire), les sols (par exemple, le type de sol, le pH du sol) et le terrain (par exemple, l'exposition, la pente) comme déterminants des potentiels de production agricole pour des cultures données ». Plus d'une cinquantaine de ZAE ont été identifiées et spatialisées (visibles sur le portail *Global Agro-Ecological Zoning* version 4 - GAEZ v4)². Ci-dessous est extraite la carte des ZAE aux latitudes où le riz est cultivé.

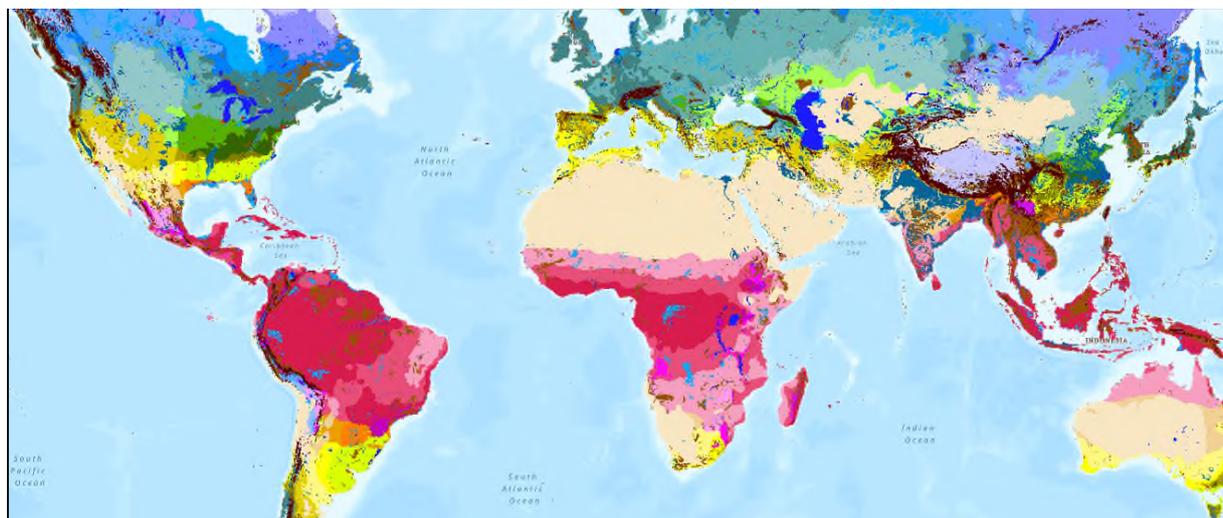


Figure 1 : Classification des zones agroécologiques entre 40° de latitude Sud jusqu'à 53° Nord, aire de répartition du riz (GAEZ v4 Data Portal)

Il est particulièrement important de noter la multiplicité des ZAE dans les pays producteurs de riz, et plus particulièrement ceux où se pratique la riziculture irriguée. On compte, par exemple, plus de huit ZAE différentes en Inde, deuxième pays producteur de riz au niveau mondial, chacune d'entre elle comprenant plusieurs types de systèmes rizicoles.

Par ailleurs, il est très fréquent d'observer la coexistence de différentes familles de systèmes rizicoles à l'échelle d'un même bassin versant, qui ne sont donc pas caractéristiques d'une zone agroécologique particulière, comme l'illustrent les figures ci-dessous (TREBUIL et BARBIER, 2004)³ (COULON et al., 2016)⁴.

1 GRiSP, 2013. Rice almanac, 4th edition. Los Baños (Philippines): International Rice Research Institute. 283 p.

2 <https://gaez.fao.org/>

3 Trebueil G., Barbier JM., 2004. Rizicultures asiatiques : Enjeux écologiques et économiques à l'aube du XXI^e siècle. Montpellier : s.n., pp. 1-10. Agropolis museum conférence-débat, Montpellier, France, 29 Septembre 2004

4 Coulon et al., 2016. Comment quantifier et réduire les impacts de la riziculture irriguée sur le changement climatique ? Note de synthèse COSTEA – riziculture et changement climatique. 8p.

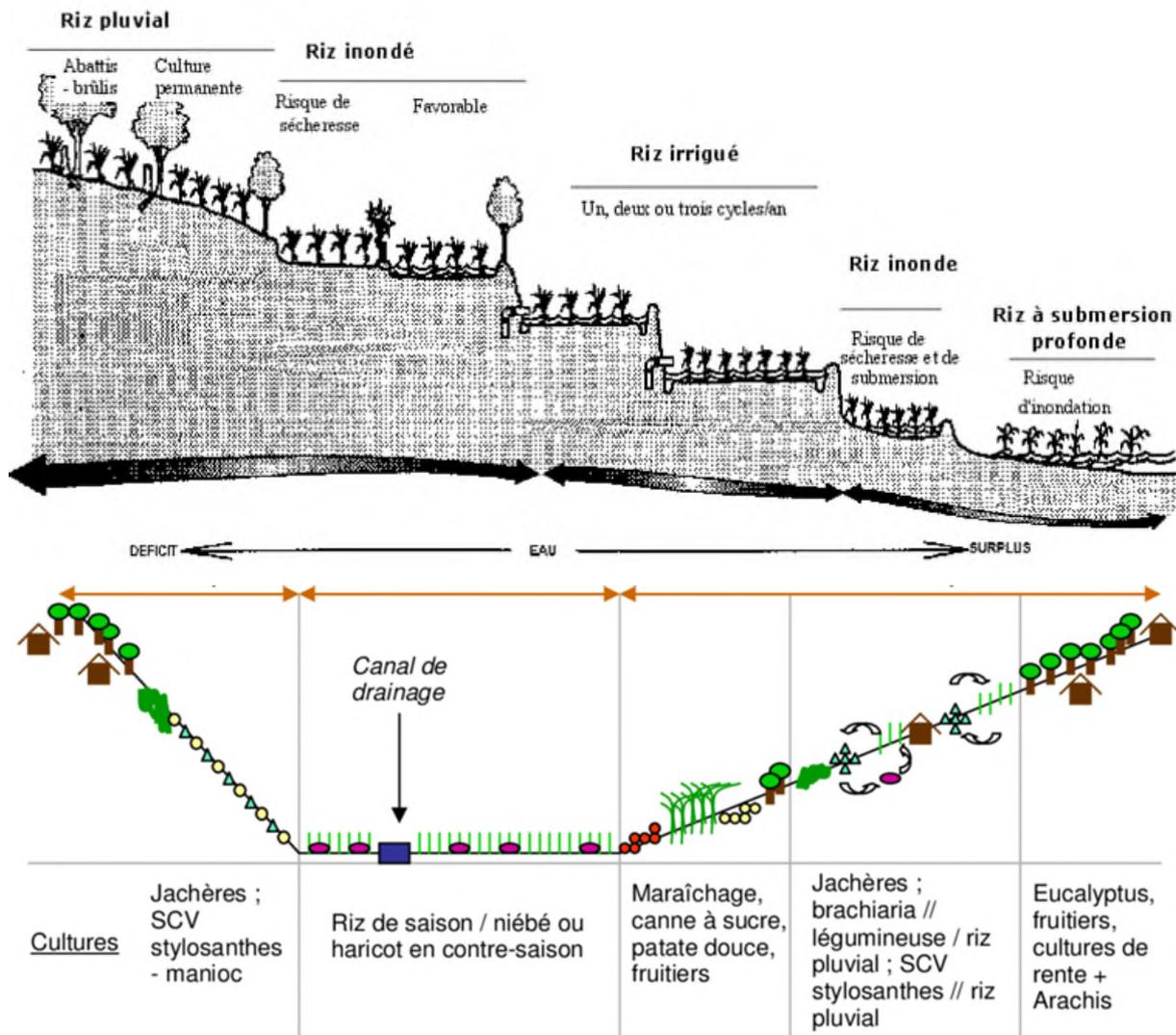


Figure 2 : En haut - Transect fictif des différents types de rizicultures selon la topologie/maitrise de l'eau (TREBUIL et BARBIER, 2004) / En bas – Exemple de multiples systèmes de riziculture au sein d'un même bassin versant à Madagascar (GUEGAN et al, 2009) ⁵

On comprend donc qu'il n'est pas possible de lier simplement un type de riziculture avec une ZAE donnée, ni un pays avec un système rizicole / une ZAE. En outre, s'il existe des typologies selon les conditions climatiques (tempérées, subtropicales et tropicales) comme celle de l'*International Rice Research Institute* (IRRI, 1984)⁶, la plupart des classifications des milieux rizicoles sont basées sur des caractéristiques hydrologiques qui reflètent mieux l'ensemble des pratiques culturales (Cf. **Partie 1.2**).

Pour s'affranchir de la nécessité de spatialiser les différents types de riziculture, nous proposons donc ici d'envisager les options d'atténuation par le prisme des pratiques culturales, qui forment « les briques » élémentaires des systèmes de production.

5 Guegan J., Pepin A., Penot E., Razafimandimby S., 2009. Caractérisation de la diversité des systèmes d'exploitation agricole du Sud-Est de Madagascar et typologie. Document de travail BV lac n° 26.

6 IRRI, 1984. Terminology for rice growing environments. 38p.

1.1.2. Riziculture irriguée dans le monde

La riziculture irriguée est pratiquée sur environ 93 millions d'hectares et génère environ 75% de la production mondiale de riz. Près de 90% du riz est produit en Asie, dont plus de 58 % sont produits dans des systèmes de culture irriguée intensive (GRiSP, 2013). En Afrique et en Amérique Latine, seulement 20% et 37 % des surfaces rizicoles sont irriguées respectivement. Globalement, la tendance est à l'augmentation des superficies de riz irrigué au cours du temps (DAWE et al., 2010)⁷. Les dernières données indiquent que la superficie mondiale récoltée de riz a augmenté de 11% entre 1990 et 2019, et la production totale a augmenté de 46%, passant de 519 Mt à 755 Mt (IPCC, 2022a)⁸.

Le commerce du riz n'a cessé de croître ces dernières décennies, et cinq pays (Inde, Thaïlande, Vietnam, Pakistan et États-Unis) concentrent 75% du volume total des exportations en 2017-2019. En tête des pays importateurs, la Chine est suivie par l'Arabie Saoudite, les États-Unis, les Philippines et l'Iran. Cependant, plusieurs articles récents affirment que la consommation de légumes et de viandes va augmenter au détriment de la consommation de céréales dans de nombreux pays en développement et particulièrement en Asie, entraînant par conséquent une diminution de la demande en riz (BAIRAGI et al., 2020⁹ ; MOTTALEB et al., 2018¹⁰).

Les projections réalisées par DURAND-MORAT et al. (2021)¹¹ sur la décennie 2020-2030 suggèrent en effet que la consommation par habitant dans de nombreux pays asiatiques diminuera au cours de la prochaine décennie, mais que la consommation totale augmentera en raison de la croissance démographique, sauf au Japon, en Corée du Sud et en Thaïlande. La consommation totale de riz devrait également augmenter fortement dans la plupart des pays africains, en raison de l'augmentation de la consommation par habitant, soutenue en partie par l'augmentation des revenus dans ces pays et par une forte croissance démographique (DURAND-MORAT et al., 2021). La production mondiale de riz devrait augmenter de 13% d'ici 2028 par rapport aux niveaux de 2019 (IPCC, 2022a).

Les rendements de la riziculture irriguée varient en général entre 3 et 9 t/ha/cycle pour les systèmes les plus productifs. Dans la plupart des pays producteurs, le nombre de cycles de culture par an dépend de la disponibilité en eau d'irrigation. Une irrigation complémentaire peut être appliquée pendant la saison humide et les cycles de contre-saison (saison sèche) dépendent entièrement de l'irrigation. Il est donc logique que la carte ci-dessous présentant le nombre de cycles de riz par an par pays recoupe en grande partie la typologie proposée par le GRiSP (Figure 5). Les pays présentant deux ou trois cycles consécutifs par an pratiquent la riziculture irriguée.

7 Dawe D., Pandey S., Nelson A., 2010. Emerging trends and spatial patterns of rice production. *Rice in the Global Economy. Strategic Research and Policy Issues for Food Security.* 15-35.

8 IPCC, 2022a. *Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* IPCC, Geneva, Switzerland, 1991 p

9 Bairagi S., Mohanty S., Baruah S., Thi T., 2020. Changing food consumption patterns in rural and urban Vietnam: Implications for a future food supply system. *Volume 64, Issue 3, July 2020, Pages 750-775.*

10 Mottaleb, K.A., Rahut D.B., Kruseman G., and Erenstein O.. 2018. Evolving food consumption patterns of rural and urban households in developing countries: A Bangladesh case. *British Food J.* 120(2):392–408. <https://doi.org/10.1108/BFJ-12-2016-0620>

11 Durand-Morat, A., & Bairagi, S. (2021). *International Rice Outlook: International Rice Baseline Projections 2020-2030. Research Reports and Research Bulletins.* Retrieved from <https://scholarworks.uark.edu/aaesrb/49>

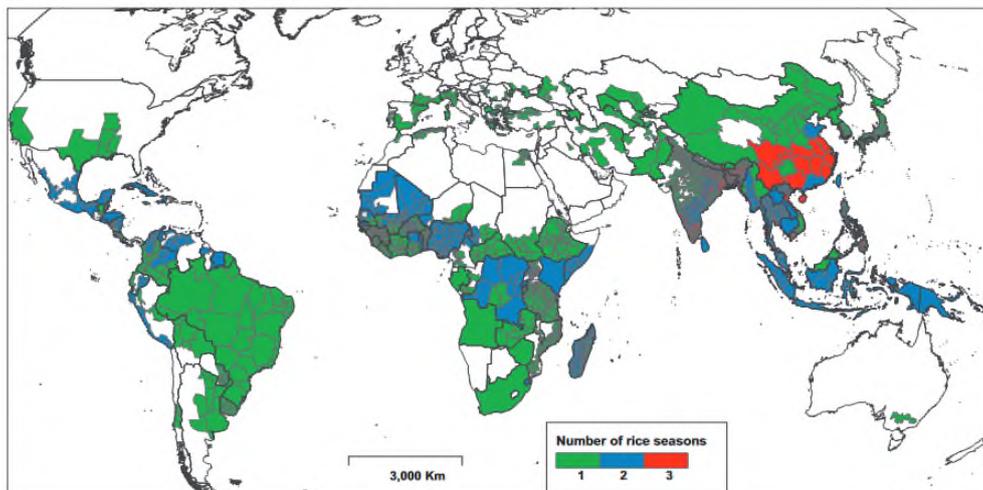


Figure 3 : Nombre de cycles de riz par an par pays – RiceAtlas (LABORTE et al., 2017)¹²

Les systèmes riz en rotation avec d'autres cultures sont également courant, par exemple le système très productif riz-blé dans les plaines du Gange qui représente entre 15 et 20 millions d'ha.

1.1.3. La place de la riziculture dans les émissions/absorptions de GES mondiales

D'après le GIEC, les émissions provenant des systèmes rizicoles sont responsables d'environ 24% des émissions du secteur agricole, et 89% d'entre elles proviennent d'Asie où l'inondation continue des rizières est encore très pratiquée (IPCC, 2022a). Le dernier rapport du 1er groupe de travail du GIEC (IPCC, 2022b)¹³ corrobore les constats fait au début des années 2000 sur l'importance des émissions de GES dues à la riziculture et il souligne également que les émissions globales de CH₄ dues à la riziculture ont légèrement augmenté sur la période 2008-2017 (31 Tg/an) par rapport à la période 2000-2009 (29 Tg/an).

Le riz irrigué représenterait globalement 70 à 80% des émissions de CH₄ de la riziculture (IPCC, 2007).

De façon générale, les pratiques rizicoles présentent une empreinte carbone bien plus élevée que celles des autres cultures céréalières. Ainsi, (LINQUIST et al., 2012)¹⁴ ont montré que le riz était cinq fois plus émetteur de GES (3,78 t_{eq}CO₂/ha/saison en moyenne) que le blé, et deux fois plus que le maïs.

12 Laborte A.G., Gutierrez MA., Balanza J.G., Saito K., Zwart S.J., Boschetti M., Murty M.V.R., Villano L., Aunario J.K., Reinke R., Koo J., Hijmans R.J., Nelson A., 2017. Data Descriptor: RiceAtlas, a spatial database of global rice calendars and production.

13 IPCC, 2022b. Climate Change: The Physical Science Basis. 2 409p

14 Linquist B., Jan van Groenigen K., Adviento-Borbe M.A., Pittelkow C., van Kessel C., 2012. An agronomic assessment of greenhouse gas emissions from major cereal crops. 18(1), 194–209. 16p

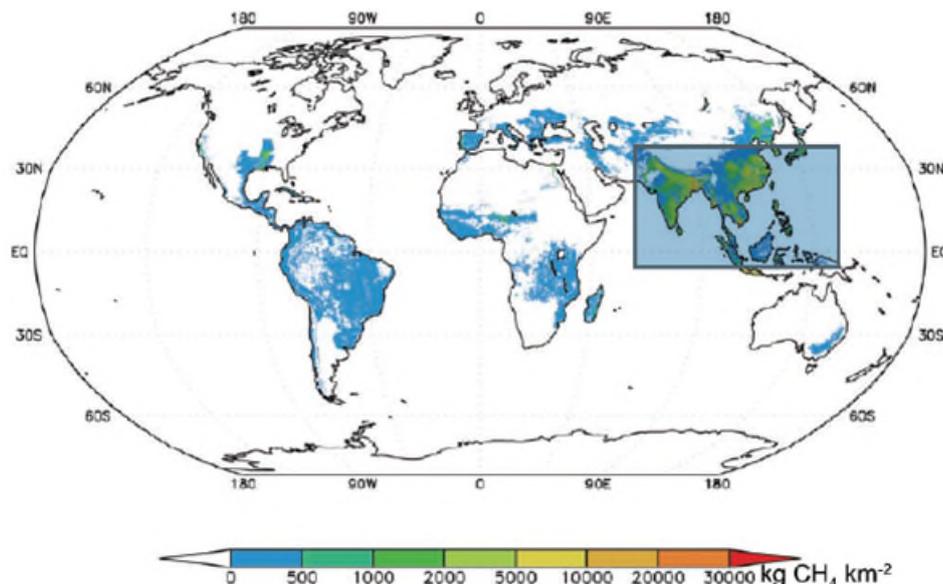


Figure 4 : Emissions de CH₄ issues des rizières, dont 90% proviennent d'Asie (EPULE et al., 2011)¹⁵

Il faut garder à l'esprit que ces données globales sont une agrégation d'estimations faites à l'échelle régionale qui présentent des incertitudes parfois importantes. De nombreuses études montrent de grandes variations d'intensité d'émissions selon les zones considérées, dépendant de facteurs spécifiques notamment la dégradation de la MO du sol, la gestion de l'eau, les types et la quantité d'engrais appliqués, la variété de riz et les pratiques culturales locales. Par exemple, en Asie du Sud-Est, les émissions de CH₄ varient de 0,5 à 41,8 mg/m²/h ou de 0,5 à 37 mg/m²/h en Asie du Sud et de l'Est. Il en va de même pour les émissions de N₂O (IPCC, 2022a). Ainsi, au niveau global, les émissions de CH₄ pourraient varier entre 20,8 à 170 Mt/an – soit 582 à 4 760 MteqCO₂/an (WANG et al., 2018)¹⁶.

1.2. Typologies existantes

Plusieurs typologies des systèmes de cultures de riz existent, parmi lesquelles celle de l'IRRI qui a le mérite d'être relativement exhaustive et facilement compréhensible. Cette typologie regroupe 18 systèmes rizicoles en quatre grandes familles : 1) riziculture en eau profonde, 2) riziculture inondée pluviale de plaine, 3) riziculture pluviale de plateau et 4) riziculture irriguée.

Le système « riziculture irriguée » a été scindé en trois sous-catégories (IRRI, 1984) :

- **Irrigué avec une température favorable** : « dans une zone irriguée avec une température favorable, la fourchette des températures est acceptable pour une croissance normale du riz pendant toute la période de croissance » (la plupart des zones irriguées des régions tropicales et subtropicales entrent dans cette catégorie).
- **Irrigué, basse température, zone tropicale** : « dans les zones tropicales, les basses températures affectent la croissance des cultures à un/plusieurs stade de croissance. Les variétés Indica sont le plus souvent cultivées. La tolérance au froid et la résistance à la pyriculariose sont les caractéristiques les plus importantes » (concerne les zones d'altitudes au Népal, en Inde, aux Philippines par exemple).
- **Irrigué, basse température, zone tempérée** : « les cultures de riz dans les zones tempérées sont généralement affectées par les basses températures aux stades du semis et de la floraison. Des variétés ont été sélectionnées pour leur tolérance au froid, leur stature courte et leur capacité à être

15 Epule T., Peng C., Mongoh M., 2011. Methane Emissions from Paddy Rice Fields: Strategies towards Achieving A Win-Win Sustainability Scenario between Rice Production and Methane Emission Reduction. 10p. doi:10.5539/jsd.v4n6p188

16 Wang J., Akiyama H., Yagi K., Yan X., 2018. Controlling variables and emission factors of methane from global rice fields. Atmospheric Chemistry and Physics. 18. 10419-10431. 10.5194/acp-18-10419-2018.

battues pour éviter les pertes par éclatement » (concerne notamment les cultures en Europe, aux Etats Unis, en Australie).

D'autres typologies existent, qui recoupent plus ou moins la typologie IRRI, telle celle élaborée par le GRiSP (2013), utilisée pour identifier et situer les systèmes rizicoles sur la carte ci-dessous.

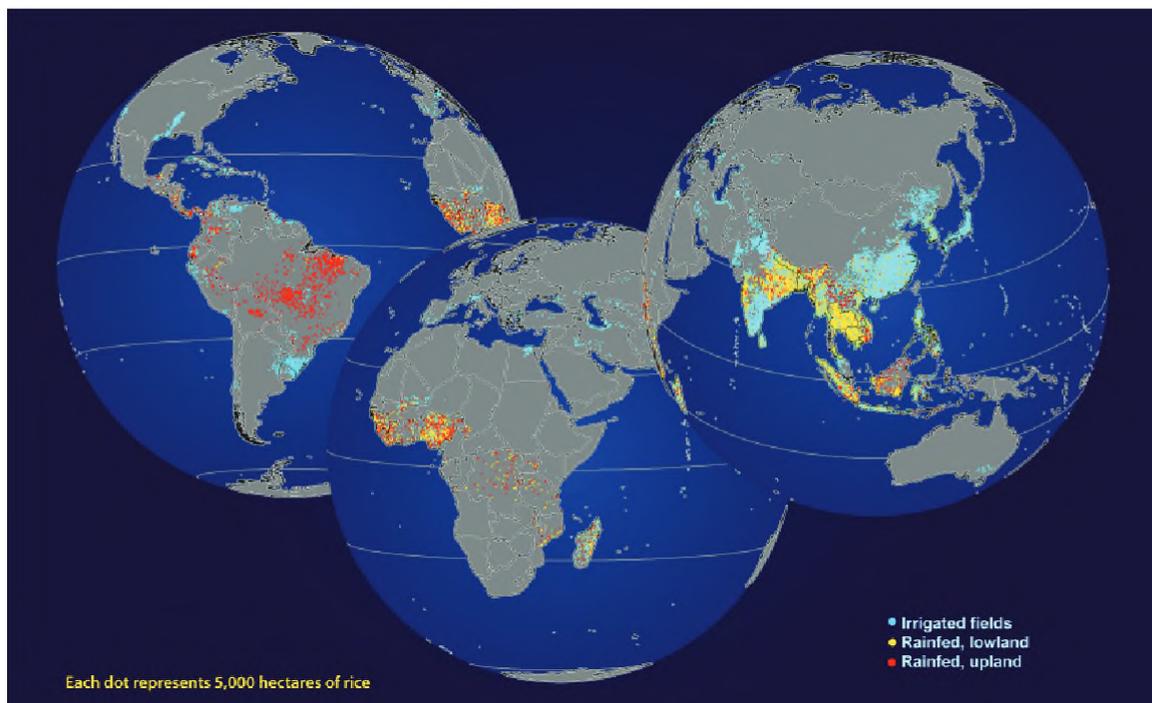


Figure 5 : Principales zones rizicoles et systèmes de culture dans le monde (RAO et al. 2017)¹⁷ sur la base de (GRiSP, 2013)

(RAO et al., 2017) affinent cette typologie en distinguant deux sous-catégories pour la riziculture irriguée, basées sur l'altitude :

- i) Riziculture de plateau : le riz est le plus souvent établi par semis direct dans des systèmes non fluviaux en condition aérobie (non inondée) et géré de manière intensive comme une culture de plateau.
- ii) Riziculture de bas-fond : la méthode la plus courante de mise en place de ce système de production est le repiquage. Le riz est également établi par semis direct sur terre humide ou en eau. Une lame d'eau de 5 à 10 centimètres est maintenue pendant la majeure partie du cycle de culture et une ou plusieurs cycles peuvent être pratiqués par an dans la mesure où l'approvisionnement en eau est assuré. Cette catégorie comprend des systèmes rizicoles irrigués en zone tempérée et tropicale.

Ces deux typologies se recoupent donc par leur catégorisation irrigué vs pluvial, mais elles diffèrent dans la sous-catégorisation des systèmes irrigués, avec une distinction faite respectivement par la température vs la topographie.

Une classification selon les modes de mise en culture est aussi proposée dans (RAO et al., 2017), distinguant le riz mis en place par repiquage ou par semi-direct (distinction de trois sous-systèmes - semis à sec, semis en conditions humides ou en eau). Le repiquage du riz induit un système intensif en eau et en main d'œuvre et nécessite une bonne maîtrise de l'eau. Ce système est considéré comme le plus émissif en termes de GES par les auteurs (RAO et al., 2017). A l'opposé du spectre, le semis direct à sec est le système le moins intensif en eau et a priori le moins émissif, surtout lorsqu'il est combiné avec un travail du sol et des apports en matière organique (MO) limités.

Il est difficile de faire correspondre cette typologie avec celles présentées plus haut dans la mesure où le mode d'implantation ne détermine pas la gestion de la lame d'eau au long du cycle de croissance du

¹⁷Rao A.N., Wani S.P., Ramesha M.S., Ladha J.K., 2017. Rice Production Systems (Chapter 8), in *Rice Production Worldwide*. By Chauhan B.S., Jabran K., Mahajan G. p185–205. doi:10.1007/978-3-319-47516-5_8

riz. Ainsi, une parcelle peut être gérée en inondation continue suite à un semis direct ou repiquage, et inversement. Le repiquage va souvent de pair avec l'inondation continue, mais il n'est pas rare que les producteurs effectuent par la suite plusieurs assècs pendant le cycle de croissance.

Finalement, il faut retenir que les systèmes rizicoles sont classés différemment selon le prisme par lesquels on choisit de les analyser (productivité, utilisation de l'eau, intensité en intrants, émissions de GES, etc.). Dans le cadre de cette étude, il nous importe de caractériser les systèmes rizicoles irrigués selon leur caractère plus ou moins émissif en GES, qui dépend en grande partie des pratiques culturales mises en œuvre.

Les **lignes directrices du GIEC** (IPCC, 2006)¹⁸ retiennent que le principal GES émis par la riziculture est le méthane (CH₄), dont le volume émis dépend d'abord du **régime hydrique** appliqué avant et pendant le cycle de culture, puis de la gestion des apports en MO, et enfin d'autres paramètres comme les rotations de cultures, les variétés, etc. (Cf. **Partie 2**). La typologie adoptée dans l'outil *Nationally Determined Contribution Expert Tool* (NEXT) développé par la FAO et visant à accompagner les pays dans l'élaboration de leurs contributions déterminées au niveau national (CDN) sur la base des lignes directrices du GIEC suit donc ce raisonnement. Elle propose sept grandes catégories de systèmes rizicoles, dont trois pour les systèmes irrigués :

C1 - Culture irriguée, inondation continue : les parcelles sont inondées pendant une période significative et le régime hydrique est entièrement contrôlé. Inondation continue : présence d'eau stagnante pendant toute la saison de croissance du riz, assèchement/drainage en fin de saison.

C2 - Culture irriguée partiellement inondée – une période sèche : les parcelles sont inondées pendant une période significative et le régime hydrique est entièrement contrôlé. Les parcelles sont aérées une seule fois pendant la saison de culture, à n'importe quel stade de croissance (or drainage de fin de saison). La période d'aération doit être d'au moins 3 jours.

C3 - Culture irriguée partiellement inondée – plusieurs périodes sèches : les parcelles sont inondées pendant une période significative et le régime hydrique est entièrement contrôlé. Plus d'une période d'aération pendant la saison de culture (or drainage de fin de saison). La période d'aération doit être d'au moins 3 jours.

Il est ensuite possible d'affiner selon le mode de gestion de l'eau avant mise en culture et les apports de MO (gestion des résidus, apports de fumure organique, etc.).

Quelle que soit la typologie considérée, un système rizicole est un agencement de pratiques culturales adaptées aux contraintes du milieu et dans un contexte particulier. Dans le cadre de cette étude, nous choisissons donc d'aborder les pratiques culturales sous le prisme de leur impact sur le climat. Dans la suite du document, nous nous attacherons à caractériser le plus finement possible les pratiques culturales appliquées aux systèmes de riz irrigué ayant un impact significatif en termes d'émissions/absorption de GES. Les autres pratiques seront mentionnées sans toutefois bénéficier du même niveau de détail.

Par ailleurs, il faut noter que sans être des « pratiques » à proprement parler, le choix des variétés de riz a un fort impact sur le rendement et sur les émissions de GES. Des milliers de **variétés de riz** sont cultivées au niveau mondial qui présentent des cycles plus ou moins long, des tolérances variables à la sécheresse, à la submersion, aux ravageurs, etc. Une part très importante de la recherche est consacrée à la création de **variétés améliorées** censées maintenir ou augmenter les rendements tout en présentant des capacités d'adaptation selon les milieux auxquels elles sont destinées. Un effort particulier a été porté à l'amélioration des variétés pour les systèmes pluviaux ou à faible intensité en eau. Plusieurs études montrent que les émissions de GES saisonnières varient selon le cultivar utilisé

18 IPCC, 2006. IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, IGES, Japan.

et sont notamment fonction de la biomasse développée par la plante (aérienne et souterraine), ainsi que la durée du cycle (SETYANTO et al., 2004)¹⁹ (WIN et al., 2022)²⁰.

1.3. Riziculture irriguée– pratiques culturelles

1.3.1. Gestion de l'eau

→ Gestion de l'eau avant la mise en culture

Un apport d'eau est souvent nécessaire pour la préparation du terrain humide (dans le cas du repiquage ou semis direct en conditions humides). Après la mise en boue, la parcelle est généralement laissée en jachère et généralement inondée pendant quelques jours avant implantation du riz. Selon le degré de maîtrise de l'eau, le délai de « trempage » peut être étendu à plusieurs semaines, voire deux mois.

Selon le nombre de cycles de riz irrigué, la disponibilité en eau et le degré de maîtrise de l'irrigation/drainage, les parcelles seront inondées plus ou moins longtemps avant la mise en culture et sur un ou plusieurs cycles au cours de l'année. Cela influe grandement sur la décomposition de la MO et les émissions associées.

→ Gestion de l'eau pendant le cycle de croissance

On distingue trois grands modes de gestion de l'eau pendant la période de culture, qui correspondent à la classification NEXT.

Gestion de l'eau	Description	Correspondance avec NEXT
Inondation continue	Maintien d'une lame d'eau pendant toute la durée du cycle de culture	C1
Drainage de mi-saison	Le drainage de mi-saison implique l'élimination de toute l'eau de surface au milieu ou à la fin du tallage pendant 10 à 14 jours, ce qui permet au sol de sécher, de se fissurer et de s'aérer.	C2
Irrigation intermittente (ou <i>Alternate wetting and drying – AWD</i>)	Drainage (> à 15cm sous le niveau du sol) et remise en eau périodique de la rizière, avec un nombre de jours sans irrigation variant de 1 à plus de 10 jours selon le type de sol, le climat, le stade de développement du riz etc. (Rice Knowledge Bank). Ce mode d'irrigation est répété pendant le cycle de croissance des cultures, sauf pendant la floraison, période au cours de laquelle une lame d'eau de 3 à 5 cm de profondeur est maintenue. Il existe plusieurs itinéraires techniques correspondant à l'AWD (variation du nombre de jours d'assecs, du niveau d'eau, etc.).	C3

NB : le terme d' « irrigation contrôlée » est parfois utilisée dans la littérature, sans toutefois qu'il y ait une définition claire des quantités/fréquences d'application de l'eau.

1.3.2. Fertilisation

En riziculture irriguée, les pratiques habituelles de fertilisation sont basées sur une utilisation combinée (i) d'apports organiques sous forme de fumure animale, de compost ou via l'incorporation des résidus de culture et (ii) d'engrais minéraux (N-P-K). La MO joue un rôle majeur dans la productivité du sol car elle représente le réservoir et la source dominante d'éléments nutritifs pour les plantes. En fonction du régime hydrique appliqué, de la gestion du sol, des types de sol etc., les modes de fertilisation peuvent avoir un impact très important sur les émissions de GES. Les efforts portent donc sur la détermination d'un optimum de gestion entre MO, fertilisation minérale, gestion de l'eau et du sol afin de limiter les émissions de GES et maximiser les rendements.

19 Setyanto P., Rosenani AB., Boer R., Fauziah CI., Khani MJ., 2004. The effect of rice cultivars on methane emission from irrigated rice field. 20 P. Setyanto et al. Indonesian Journal of Agricultural Science 5(1) 2004:20-31

20 Win EP., Win KK., Bellingrath-Kimura SD., Oo AZ., 2022. Influence of rice varieties, organic manure and water management on greenhouse gas emissions from paddy rice soils. PLOS ONE 17(1): e0263554. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0263554>

→ **Apports de matière organique**

La quantité de paille de riz exportée à la récolte dépend principalement de la hauteur de coupe et des variétés utilisées. La paille de riz se caractérise par une vitesse de décomposition lente. C'est pourquoi les producteurs évitent de l'incorporer dans le sol, en particulier dans les systèmes de culture intensive avec un intervalle de trois semaines. C'est le cas en Asie par exemple, où les pailles de riz sont traditionnellement exportées et utilisées pour le bétail ou à d'autres fins.

Selon les systèmes de culture, la paille de riz peut être 1) ramassée et exportée de la parcelle, 2) laissée en décomposition sur la parcelle, 3) brûlée in situ ou 4) incorporée au sol avant le prochain cycle de culture. Dans de plus rares cas, elle est compostée avant restitution au champ.

Lorsqu'elle est incorporée, sa vitesse de décomposition dépend des conditions d'humidité (aérobies/anaérobies) et du temps avant la prochaine mise en culture. Selon l'option de gestion retenue, la gestion des résidus aura des impacts plus ou moins importants sur le stockage du carbone dans le sol et les émissions de CH₄ et de N₂O (GUMMERT et al., 2020)²¹.

Des apports complémentaires de MO sous forme de compost ou de fumure sont souvent mis en place par les producteurs, particulièrement dans les pays où les engrais minéraux sont difficiles d'accès.

→ **Engrais minéraux**

Il est communément admis que l'augmentation des rendements en riz est corrélée avec l'utilisation croissante d'engrais azotés. Ainsi, on estime que l'augmentation (rendements plus que doublés) de la production de riz en Asie depuis 1965 peut être attribuée à l'utilisation d'engrais, principalement d'azote (DE DATTA et al., 1989)²² (TREBUIL, 2011)²³.

Pour donner un ordre de grandeur, les apports d'engrais azotés en Asie sont de l'ordre de 120 ± 40 kg/ha/cycle en moyenne, avec des quantités plus élevées dans le Sud de la Chine notamment, jusqu'à 250 kg/ha. En Afrique, les apports d'azotes étaient très limités (autour de 10 kg/ha) jusqu'à récemment. Il s'agit d'un des facteurs explicatifs des différences de rendements, avec la pauvreté des sols et divers facteurs d'ordres socio-économiques et biophysiques (TSUJIMOTO et al., 2019)²⁴.

1.3.3. Travail du sol et autres pratiques

Le **travail du sol** intervient principalement avant la mise en culture du riz irrigué. Un labour est traditionnellement effectué pour l'enfouissement de la fumure organique / résidus de culture si ceux-ci sont incorporés au sol. Il permet également l'aération du sol en surface et la création d'une semelle de labour qui limitera l'infiltration une fois la parcelle mise en eau.

Puis intervient la mise en boue ou *puddling*, souvent par hersage, qui permet de préparer le sol juste avant repiquage et de renforcer la semelle de labour. Enfin, un nivelage du terrain est réalisé pour garantir une bonne répartition de l'eau sur la parcelle.

En comparaison d'autres cultures annuelles, la présence d'une lame d'eau dans les parcelles de riz permet de limiter le développement d'adventices et donc le travail du sol pendant le cycle de culture, bien que des désherbages complémentaires légers soient tout de même souvent nécessaires.

A la faveur de la diffusion de l'agriculture de conservation, des pratiques de labour plus respectueuses du sol ont été introduites dans divers pays producteurs. Contrairement au travail du sol conventionnel qui favorise la dégradation de la MO et les émissions de GES, une perturbation réduite du sol (zéro-

21 Gummert M., Hung NV., Chivenge P., Douthwaite B., 2020. Sustainable Rice Straw Management. Springer Open ed., 10.1007/978-3-030-32373-8(), -. doi:10.1007/978-3-030-32373-8

22 De Datta, SK., Buresh, R.J., 1989. Integrated Nitrogen Management in Irrigated Rice. *Advances in Soil Science*, 143–169. doi:10.1007/978-1-4613-8847-0_4

23 Trebuil G., 2011. Rizicultures asiatiques : permanence d'une céréale essentielle sur un continent en mutation. *Chroniques sur l'Asie et le Pacifique 2002-2011*. CNRS Éditions via OpenEdition

24 Tsujimoto Y., Rakotoson T., Tanaka A., Saito K., 2019. Challenges and opportunities for improving N use efficiency for rice production in sub-Saharan Africa. *Plant Production Science*, (), 1–15. doi:10.1080/1343943X.2019.1617638

labour ou réduit) augmente la séquestration de la MO et la rétention de N (ZHAO et al., 2015)²⁵ (ALAM et al., 2018)²⁶, améliore la formation et la stabilité des agrégats du sol, conserve l'humidité du sol, etc. Cependant, l'effet des pratiques d'agriculture de conservation sur les émissions de CH₄, N₂O et CO₂ respectivement et le bilan global n'est pas encore très clairement établi, bien que des articles récents tendent à montrer des effets globalement positifs sur les rendements et sur l'empreinte carbone (JAHANGIR et al., 2022)²⁷.

D'autres pratiques peuvent avoir un impact sur les émissions de GES, bien qu'a priori plus marginal que pour les pratiques citées plus haut. Il s'agit notamment de :

Modes de semis - Plusieurs modes de mise en culture sont possibles sur les parcelles de riz irrigué : repiquage ou semis direct. La majeure partie du riz irrigué dans le monde et en particulier en Asie est implanté par repiquage et nécessite la présence d'une lame d'eau sur la parcelle. Ce système fournit un rendement élevé et stable mais il est intensif en main d'œuvre et nécessite une grande quantité d'eau d'irrigation (1 500 à 2 000 mm) ainsi qu'une inondation continue de la parcelle, a minima sur les premiers stades de développement de la plante. Le semis direct, qui s'effectue sur sol humide ou sec, est présenté comme une alternative intéressante pour diminuer les besoins en eau, la quantité de travail, les émissions de GES, etc. (RAHMAN, 2019)²⁸.

Biochar - Bien que relativement peu d'étude sur le long terme existe à ce jour, les récentes publications montrent que l'application de biochar augmente le rendement du riz et améliore l'efficacité d'utilisation de l'azote de 11% et 12%, respectivement (LIU et al, 2022)²⁹.

Gestion des maladies, ravageurs et adventices - De nombreux organismes sont responsables de dommages sur le riz et peuvent causer une perte économique importante : les arthropodes (insectes et acariens), les pathogènes (bactéries, champignons et virus), les mollusques (escargots), les vertébrés (rongeurs et oiseaux) et les adventices notamment (GRiSP, 2013).

L'utilisation de pesticides/herbicides joue un rôle très important pour sécuriser la production de riz irrigué mais n'est pas sans conséquences sur l'environnement. TANG et al., (2020)³⁰ montrent que l'impact en termes de GES peut être plus ou moins important selon les pratiques locales, et particulièrement la période de rétention d'eau après application des pesticides.

D'autres types d'intrants spécifiquement destinés à limiter la nitrification ou la production de méthane sont parfois utilisés : inhibiteurs de nitrification et d'uréase, phosphogypse, inhibiteur de méthane, etc. (MENG et al., 2020)³¹ (CHO et al., 2022)³².

25 Zhao X., Liu S., Pu C., Zhang X., Xue J., Zhang R., Wang Y., Lal R., Zhang H., Chen F., 2016. Methane and nitrous oxide emissions under no-till farming in China: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 22(4), 1372–1384. doi:10.1111/gcb.13185

26 Alam, M.K., Bell, R.W., Haque, M.E., Kader, M.A., 2018. Minimal soil disturbance and increased residue retention increase soil carbon in rice-based cropping systems on the Eastern Gangetic Plain. *Soil and Tillage Research*, 183(), 28–41. doi:10.1016/j.still.2018.05.009

27 Jahangir MMR., Bell RW., Uddin S., Ferdous J., Nasreen SS., Haque ME., Satter MA., Zaman M., Ding W., Jahiruddin M., Müller C., 2022. Conservation Agriculture With Optimum Fertilizer Nitrogen Rate Reduces GWP for Rice Cultivation in Floodplain Soils. *Front. Environ. Sci.* 10:853655. doi: 10.3389/fenvs.2022.853655

28 Rahman MM., 2019. Potential benefits of dry seeded rice culture: a review. *Fundamental and Applied Agriculture* 4(2): 744–758. doi: 10.5455/faa.16534

29 Liu Y., Li H., Hu T., Mahmoud A., Li J., Zhu R., Jiao X., Jing P., 2022. A quantitative review of the effects of biochar application on rice yield and nitrogen use efficiency in paddy fields: A meta-analysis. *Science of The Total Environment*, Volume 830, 2022, 154792, ISSN 0048-9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154792>.

30 Tang L., Hayashi K., Inao K., Birkved M., Bruun S., Kohyama K., Shimura M., 2020. Developing a management-oriented simulation model of pesticide emissions for use in the life cycle assessment of paddy rice cultivation. *Science of The Total Environment*, 716(), 137034–. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137034

31 Meng X., Li Y., Yao H., Wang J., Dai F., Wu Y., Chapman S., 2020. Nitrification and urease inhibitors improve rice nitrogen uptake and prevent denitrification in alkaline paddy soil. *Applied Soil Ecology* Volume 154, October 2020, 103665. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103665>

32 Cho SR., Verma PP., Das S., Kim GW., Lim JY., Kim PJ., 2022. A new approach to suppress methane emissions from rice cropping systems using ethephon. *Sci Total Environ.* 15;804:150159. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150159. Epub 2021 Sep 7. PMID: 34509846.

2. Pratiques agricoles et impact sur les émissions/absorptions de GES

2.1. Quelques rappels sur l'effet de serre et les GES, notamment CO₂, CH₄ et N₂O

L'effet de serre naturel est dû à l'accumulation de GES naturels émis par des phénomènes naturels (évaporation de l'eau des océans, évapotranspiration de l'eau de la végétation, irrptions volcaniques, etc.). Le principal GES naturel est la vapeur d'eau (H₂O).

L'effet de serre anthropique est dû à l'accumulation de GES anthropiques dont les trois principaux sont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O). Ils sont responsables respectivement de 76%, 16% et 6% de l'effet de serre anthropique, et donc pris globalement, de 98% de l'effet de serre anthropique.

Le CH₄ et le N₂O ont un pouvoir de réchauffement global (PRG) à 100 ans respectivement 28 et 265 fois supérieur à celui du CO₂ (IPCC, 2014)³³. En effet, les différents GES anthropiques ont un impact plus ou moins important sur le climat et plus ou moins long dans le temps (« durée de vie » dans l'atmosphère). Afin de pouvoir comparer les impacts des différents GES les uns avec les autres, les émissions sont souvent exprimées en t_{eq}CO₂. Ainsi, 1 t de CH₄ équivaut à 28 t_{eq}CO₂.

L'atténuation et l'adaptation au changement climatique (CC) sont en lien étroit avec les principaux cycles de la matière en agriculture : la photosynthèse, la respiration et l'évapotranspiration ; Le cycle de l'eau ; Le cycle de la MO ; Le cycle du carbone ; Le cycle de l'azote ; Les GES d'origine humaine.

De tous ces cycles, on peut retenir les rôles cruciaux de trois éléments - le carbone (C), l'azote (N) et l'eau (H₂O) –dans la production agricole et l'adaptation au changement climatique, d'une part ; dans l'atténuation du changement climatique, d'autre part :

<p style="text-align: center;"><u>Carbone (C) :</u></p> <p>Indispensable à la photosynthèse / principal élément constitutif des végétaux Indispensable à la création d'humus et la fertilisation des sols CO₂ = 1^{er} GES (76%) : combustion de végétaux, oxydation du carbone des sols, etc. CH₄ = 2nd GES (16%) : combustion de végétaux (incomplète, sur front de flamme), fermentation sans air / anaérobie (riziculture, émissions entériques des animaux)</p> <p style="text-align: center;"><u>Azote (N) :</u></p> <p>Un des principaux éléments nutritifs des plantes (avec le phosphore P et le potassium K) Indispensable à la création d'humus et la fertilisation des sols (rapport C/N variant de 50-150 pour la paille à environ 10 pour l'humus) N₂O = 3^{ème} GES (6%) : fermentation à l'air / aérobie (drainage des zones humides, émissions du fumier, dénitrification des engrais chimiques azotés)</p> <p style="text-align: center;"><u>Eau (H₂O) :</u></p> <p>Indispensable à la photosynthèse / principal élément constitutif des végétaux Pluies de plus en plus erratiques, dans le temps et l'espace : baisse de la fonction puits de carbone des végétaux, ce qui diminue leur capacité d'atténuation du changement climatique Evapotranspiration plus forte avec la hausse des températures : baisse de la fonction puits de carbone des végétaux, ce qui là encore diminue leur capacité d'atténuation</p>

Figure 6 - Rôles du carbone, de l'azote et de l'eau dans la production, l'adaptation et l'atténuation (auteurs, 2022)

33 IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.

2.2. Mécanismes d'émission/absorption de GES dans les rizières

La production de riz favorise la séquestration du carbone dans le sol, mais est responsable d'émissions massives de trois des principaux GES que sont le CH₄, le N₂O et dans une moindre mesure le CO₂.

2.2.1. Stockage du carbone dans le sol

Un certain nombre de facteurs naturels influencent la quantité de MO dans un sol. La transformation de la MO du sol est un processus dynamique influencé par le climat (température, humidité, saturation en eau, etc.), le type de sol (texture, topographie, salinité, etc.), la végétation, etc. Le carbone organique du sol (SOC) est également très sensible aux usages du sol et pratiques de gestion mises en œuvre (irrigation, gestion des résidus, fertilisation, travail du sol, etc.).

Les sols inondés pendant de longues périodes ont tendance à stocker du carbone du fait de leur activité biologique intense. Le carbone du sol est distribué avec un gradient de concentration décroissant depuis la surface. La majeure partie du stock de carbone se trouve dans les 30 cm supérieurs du sol. A priori, une modification modérée du régime hydrique type système AWD a peu d'incidence sur les pools de SOC (XU et al., 2017)³⁴

On estime que les sols des rizières irriguées contiennent les plus grands stocks de SOC parmi les terres cultivées, bien qu'ils varient énormément selon les propriétés des sols et les systèmes de culture, et qu'une incertitude importante demeure. La teneur moyenne en SOC est de 14-15 g/kg dans les 20-25 cm supérieurs du sol pour les systèmes de riziculture irriguée (avec deux ou trois cycles successifs) en Asie, ce qui équivaut à un stockage estimé à 45 t/ha (GRiSP, 2013).

A titre d'illustration, une étude de QIN et al. (2013)³⁵ en Chine a montré que la couche supérieure du sol (0-30 cm) des rizières en Chine stocke environ 30% de SOC en plus (45 t/ha) que les sols correspondants au niveau des plateaux (35 t/ha). Une étude globale plus récente de LIU et al. (2021)³⁶ estime que les sols des rizières (0-100 cm) contiennent 18 milliards de tonnes de SOC dans le monde entier, soit environ 1,2% de la réserve mondiale de SOC, correspondant à 14% de la réserve totale de SOC dans les terres cultivées. Le tableau tiré de cette publication permet d'estimer les ordres de grandeurs dans les principaux écosystèmes terrestres.

Type d'écosystème	Moyenne de stock de SOC [0-30cm] (t/ha)	Moyenne de stock de SOC [0-100cm] (t/ha)
Tout type de sol	45	98
Terres cultivées	41	89
Mangrove	130	283
Forêt	87	189
Pâturages	38	82
Zone humide	107	233
Rizières	51 [49-53]	108 [103-113]

Figure 7 : estimations récentes des stocks de SOC pour les principaux écosystèmes terrestres (LIU et al., 2021)

34 Xu, Y., Zhan, M., Cao, C., Ge J., Ye R., Tian S., Cai M., 2017. Effects of irrigation management during the rice growing season on soil organic carbon pools. *Plant Soil* 421, 337–351 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3467-7>

35 Qin, Z., Huang, Y. & Zhuang, Q., 2013. Soil organic carbon sequestration potential of cropland in China. *Glob. Biogeochem. Cycles* 27, 711–722

36 Liu, Y., Ge, T., van Groenigen, K.J. et al., 2021. Rice paddy soils are a quantitatively important carbon store according to a global synthesis. *Commun Earth Environ* 2, 154. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00229-0>

LIU et al. soulignent cependant que bien que le stockage du SOC dans les rizières soit important à considérer du point de vue de la fertilité et non négligeable, ces effets sur le climat sont généralement annulés par l'augmentation des émissions de CH₄ et de N₂O.

2.2.2. Mécanismes d'émission/absorption de GES

CH₄ : le méthane est principalement produit par les bactéries méthanogènes, dont l'activité est favorisée par des conditions anaérobies, c'est-à-dire lors des périodes d'inondation des rizières. Après processus méthanogènes, le CH₄ est transmis à l'atmosphère via (i) diffusion du gaz dissous à travers les interfaces eau-air et sol-eau, (ii) libération de bulles de gaz, après travail du sol ou mouvement de la faune du sol et (iii) transport via les racines des plantes (LE MER et ROGER, 2001)³⁷.

N₂O : les pratiques de fertilisation par des engrais chimiques et les conditions d'humidité du sol sont les principaux facteurs déterminant les émissions de N₂O. Le N₂O est généré par les processus de nitrification et de dénitrification par les bactéries du sol pendant la production de nitrate d'ammonium. De récentes études montrent que d'autres processus de production de N₂O sont à l'œuvre par la plante elle-même, mais ceux-ci sont encore mal connus (TIMILSINA et al., 2020)³⁸.

CO₂ : les principales sources de CO₂ liés à la culture du riz sont l'utilisation d'engrais azotés (consommation d'énergie fossile pour la fabrication et le transport), le travail du sol (oxydation du SOC), le brûlis des résidus de culture et la respiration. Comme les sols inondés ne permettent pas une bonne oxydation du carbone (condition anaérobie), les émissions sont moindres pendant les périodes de mise en eau. La construction d'infrastructures hydroagricoles génère aussi des émissions de CO₂ (oxydation du SOC lors des fouilles, fabrication et transport de matériaux).

2.2.3. Profil type des émissions/absorptions de GES

Pour donner un ordre de grandeur, le CH₄ représente environ 65% des émissions totales du riz de bas-fond en conditions d'inondation continue. Les 35% restants peuvent être attribués principalement au N₂O provenant des engrais azotés et, dans une moindre mesure, de l'azote des résidus de culture. Les émissions de CO₂ du riz, bien qu'importantes, sont considérées comme neutres du fait de la photosynthèse (selon les lignes directrices 2006 du GIEC, si l'on exclut les émissions de CO₂ issues des aménagements hydroagricoles et de l'oxydation du SOC).

L'introduction de cycles d'inondation et d'assecs induit une augmentation des émissions de N₂O (conditions aérobies) mais diminue celles de CH₄. Il s'agit donc de trouver le meilleur compromis possible pour limiter les émissions de CH₄ et de N₂O, et cela se joue sur 1) la gestion de la lame d'eau, et 2) gestion de culture et particulièrement la fertilisation. Selon les modes de gestion appliqués, la riziculture irriguée ne contribue donc pas au même niveau aux émissions de GES.

Par ailleurs, un grand nombre d'études ont montré des variations spatiales dans les émissions de CH₄ des rizières inondées en continu, selon la composition du sol, l'aération, le taux de compaction, l'humidité, le pH, la MO, l'azote disponible, le rapport C/N, ainsi qu'avec des changements dans la gestion du sol, la rotation des cultures et le climat. Il est donc difficile de donner un profil d'émission par type de système.

37 Le Mer J. et Rocher P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. *European Journal of Soil Biology* Volume 37, Issue 1, January–March 2001, Pages 25-50.

38 Timilsina A., Bizimana F., Pandey B., Yadav RKP, Dong W., Hu C. Nitrous Oxide Emissions from Paddies: Understanding the Role of Rice Plants. *Plants* (Basel). 2020 Feb 2;9(2):180. doi: 10.3390/plants9020180. PMID: 32024218; PMCID: PMC7076488.

2.3. Comptabilisation des émissions de GES issues des rizières hors CO₂

2.3.1. Méthodes et outils de comptabilisation des émissions et absorption de GES

Afin de faire face aux problématiques environnementales, une multitude de méthodes et d'outils plus ou moins robustes ont été mis au point afin de comptabiliser les émissions/absorption des produits agricoles. Il y a deux grands types d'approches pour réaliser des bilans GES :

- **Bilan de GES du GIEC** - Méthode dite des « sources et puits », qui vise à estimer les émissions/absorptions où et quand elles se produisent (pas de considération de l'amont/aval de la chaîne de valeur). Les émissions sont exprimées en tCO_{2eq} par unité de surface et par an. Il s'agit d'un cadre consensuel pour réaliser les inventaires de GES à l'échelle nationale en garantissant la comparabilité entre les pays et en évitant les doubles comptages. C'est l'approche utilisée pour comptabiliser les résultats atteints par les pays engagés dans des CDN et dans l'Accord de Paris (Chaire ELSA-PACT, 2021a)³⁹.
- **Analyse de cycle de vie (ACV)** – Permet d'évaluer les impacts environnementaux et sociaux d'un produit sur l'ensemble de sa chaîne de valeur, de l'extraction des matières premières jusqu'à sa fin de vie. Il faut noter que le bilan carbone est une déclinaison « monocritère » de l'ACV, qui évalue les émissions de GES par rapport à une quantité produite, c'est-à-dire que les résultats s'expriment en tCO_{2eq}/kg dans le cas du riz (Chaire ELSA-PACT, 2021b⁴⁰). Il faut noter que les méthodes présentées ici peuvent être utilisées à différentes échelles (nationale, régionale, territoriale, projet). Ces méthodes intègrent souvent des données du GIEC, mais agrègent aussi beaucoup d'autres données, sans parfois que les modèles/hypothèses utilisés soient explicités de façon transparente.

Dans le cadre de cette étude, on se réfère principalement à la méthode du GIEC qui propose une analyse des émissions par unité de surface, ce qui permet de bien prendre en compte les changements d'usages des terres et l'ampleur des cultures en termes d'occupation du sol.

Documents de référence et principes directeurs

La Conférence des Parties servant de réunion des Parties à l'Accord de Paris (CMA) est chargée d'approuver les textes et méthodologies pour l'élaboration des inventaires de GES nationaux.

A ce jour, les lignes directrices faisant référence dans le cadre de transparence pour l'action et le soutien visé à l'article 13 de l'Accord de Paris (CCNUCC, 2020)⁴¹ sont les Lignes directrices de 2006 (IPCC, 2006) ainsi que le « *Supplément 2013 aux Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de GES : zones humides* » (IPCC, 2014)⁴², ce qui laisse de côté la « *Révision 2019 des Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de GES* » (Révision 2019) (IPCC, 2019)⁴³, tant que celles-ci n'ont pas été officiellement approuvées par la CMA. Lorsque cela est pertinent, nous indiquerons les différences principales entre les deux documents.

39 Chaire ELSA-PACT, 2021. Panorama des méthodes d'évaluation environnementales. Portfolio. Bilan GES du GIEC. M19-VA-28/05/21.

40 Chaire ELSA-PACT, 2021. Panorama des méthodes d'évaluation environnementales. Portfolio. Analyse du cycle de vie. M07-V1-18/05/21

41 Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques, 2020. Manuel technique à l'attention des pays en développement Parties à la convention vers un cadre de transparence renforcée dans le cadre de l'Accord de Paris. 75p.

42 IPCC 2014, 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands, Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. and Troxler, T.G. (eds). Published: IPCC, Switzerland.

43 IPCC, 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. In: Buendia, E., Guendehou, S., Limmeechokchai, B., Pipatti, R., Rojas, Y., Sturgiss, R., Tanabe, K., Wirth, T., Romano, D., Witi, J., Garg, A., Weitz, M., Cai, B., Ottinger, A., Dong, H., MacDonald, J., Ogle, M., Rocha, M.T., Sanchez, M.J., Bartram, M. and Towprayoon, S., Eds., Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU), préparé par le Programme pour les inventaires nationaux des gaz à effet de serre 4, 110 p.

Les lignes directrices du GIEC sont fondées sur cinq principes clefs :

- **Transparence** - Hypothèses et méthodologies sont clairement expliquées et documentées de manière appropriée ;
- **Exactitude** - Les estimations ne sont ni surestimées ni sous-estimées, les incertitudes sont réduites autant que possible ;
- **Cohérence** – les mêmes définitions et méthodologies sont utilisées dans le temps et dans l'espace ;
- **Comparabilité** – Les inventaires suivent les méthodologies et formats fournis par le GIEC et approuvés par la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC),
- **Exhaustivité** - Les estimations incluent toutes les catégories, gaz et réservoirs convenus pour toutes les zones géographiques pertinentes.

Ces principes permettent d'harmoniser les pratiques et de limiter les risques de divergence des méthodes et des données utilisées pour les inventaires de GES entre les pays.

Méthode générale

Les estimations reposent sur le croisement de deux données de base (IPCC, 2006) :

- **Données d'activité (DA)** : Données sur l'ampleur d'une activité humaine entraînant des émissions ou des absorptions au cours d'une période donnée. Dans le secteur AFOLU, il s'agit principalement des données sur la superficie des différentes utilisations des terres et changements d'utilisation des terres, exprimés en ha/an.
- **Facteurs d'émission (FE)** : Emissions de CO₂, ainsi que les émissions de CH₄ (par exemple, dues à la combustion de la biomasse ou à la fermentation anaérobie) et les émissions de N₂O (par exemple, dues à la fermentation aérobie), exprimées en t_{eq}CO₂/ha. Pour la riziculture, le calcul du facteur d'émission dépend des pratiques culturales (inondation avant plantation et pendant le développement de la plante, travail du sol, amendements, etc.) (voir section 2.2.2 infra).

En multipliant ces valeurs, on obtient les émissions/absorptions de GES (exprimées en t_{eq}CO₂/ha/an).

Des valeurs par défaut des FE (dites valeurs de tier 1) sont fournies dans les lignes directrices du GIEC. Elles sont toujours exprimées avec une "incertitude globale". L'incertitude d'une variable fait référence à la méconnaissance de sa valeur réelle. Elle peut être causée à la fois par des erreurs aléatoires, qui affectent la "précision", et par des erreurs systématiques (ou biais), qui affectent sa "justesse". L'incertitude est utilisée pour décrire la dispersion de la valeur, c'est-à-dire la fourchette dans laquelle se situe la valeur exacte.

Concernant la riziculture, les méthodes d'estimation des FE, et leurs valeurs par défaut, ainsi que les différentes approches en termes d'estimation des DA, sont présentées dans les Lignes directrices du GIEC de 2006, sauf pour le cas particulier de la riziculture sur des sols organiques tropicaux drainés, qui est abordée dans le chapitre 2 du supplément des Lignes directrices du GIEC sur les zones humides de 2014 (IPCC, 2014).

Les outils de comptabilisation des émissions/absorptions

La FAO a piloté la conception de plusieurs outils afin d'établir les bilans d'émissions/absorptions de GES : *Ex-Ante Carbon-balance Tool* (EX-ACT) et son pendant pour les chaînes de valeurs *EX-ACT Value Chain* (EX-ACT VC) d'une part, et plus récemment NEXT.

EX-ACT est un outil d'évaluation visant à estimer le bilan carbone ex-ante des projets, des programmes ou des politiques de développement agricole et forestier. Le bilan GES est estimé par rapport à un scénario de référence, dans lequel la mise en œuvre du projet n'aurait pas lieu (FAO, 2016)⁴⁴.

Également outil de bilan de GES, NEXT vise plutôt à fournir des résultats qui répondent directement aux dispositions du Cadre de transparence renforcée de l'Accord de Paris et qui soutiennent

44 FAO, 2016. Guide rapide pour l'utilisation de l'outil Ex-Ante Carbon-balance Tool (EX-ACT) pour les secteurs agricoles et forestiers. 22p

l'élaboration des Contributions déterminées au niveau national (CDN) des pays-Parties. Il s'agit d'un outil de pilotage ciblant l'échelle nationale plutôt que l'échelle locale (type projet de terrain).

Contrairement à EX-ACT, NEXT inclus uniquement ce qui concerne les changements d'usage du secteur AFOLU (hors infrastructures, inputs, etc.). NEXT permet d'estimer plus finement les émissions année par année, contrairement à EX-ACT qui ne permettait pas de proposer des scénarios de gestion des émissions précis. En outre, les PRG utilisés ont été actualisés selon les dernières préconisations du GIEC, notamment le PRG du méthane qui passe de 25 à 28. Ces outils feront l'objet d'un livrable ultérieur dans le cadre de cette étude.

2.3.2. Estimation des émissions de CH₄

Pour les inventaires de GES nationaux issus de la riziculture, le GIEC propose une méthodologie pour estimer les émissions de CH₄, principal GES émis par les rizières (**CH₄ Riz**, en Gg CH₄/an). L'équation générale consiste à croiser un FE journalier (**FE**, en kg CH₄/ha/jr) avec la durée des cycles de culture (**t**, en jours) et les données de surfaces cultivées par an (**S**, en ha/an) correspondant aux différents écosystèmes, régimes hydriques, types et quantités d'amendements organiques, et autres conditions dans lesquelles les émissions de CH₄ peuvent varier (i, j et k), telle que :

$$CH_{4\text{ Riz}} = \sum_{i,j,k} (FE_{i,j,k} \cdot t_{i,j,k} \cdot S_{i,j,k} \cdot 10^{-6})$$

D'après le GIEC, « La quantité annuelle de CH₄ émise depuis une superficie de rizières donnée dépend du **nombre de cultures et de leur durée**, des **régimes hydriques avant et pendant la période de culture**, et des **amendements des sols organiques et inorganiques** » (Neue et Sass, 1994 ; Minami, 1995). Les types de sols, la température et le cultivar de riz affectent aussi les émissions de CH₄. »

Cela se traduit par l'utilisation de FE journaliers (et non saisonniers) permettant de séparer les saisons culturales et les périodes de jachère de manière plus flexible, et l'addition de facteurs d'échelonnement pour les régimes hydriques avant la période de culture et prise en compte du moment de l'incorporation de la paille.

Le FE journalier pour des conditions données est donc basé sur un FE de base, « corrigé » par des facteurs d'échelonnement selon les régimes hydriques appliqués avant et pendant la culture, ainsi que la quantité d'amendement organique et le type de sol/cultivar utilisé. Il est obtenu via l'équation suivante (IPCC, 2006) :

$$FE_i = FE_c \cdot FEch_w \cdot FEch_p \cdot FEch_o \cdot FEch_{s,r}$$

Avec

FE_i = facteur d'émissions ajusté quotidien pour une superficie récoltée donnée

FE_c = facteur d'émissions de base pour des **champs inondés en permanence** sans amendements organiques

FEch_w = facteur d'échelonnement permettant de prendre en compte les différences entre les régimes hydriques **pendant la période de culture**

FEch_p = facteur d'échelonnement permettant de prendre en compte les différences entre les régimes hydriques **avant la période de culture**

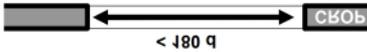
FEch_o = facteur d'échelonnement qui devrait varier en fonction du type et de la **quantité d'amendement organique appliqué**.

FEch_{s,r} = facteur d'échelonnement pour les **types de sols**, de **cultivars** de riz, etc., en fonction des disponibilités

Il est intéressant de noter que le GIEC a revu la méthodologie en 2019 avec principalement deux changements : (i) un découplage de l'équation entre Tier 1 - pas de prise en compte des types de sols et des cultivars et Tier 2 – intégration de deux facteurs d'échelonnement distincts pour sols et cultivars ; (ii) des modifications des valeurs par défauts des FE/FEch.

Dans les lignes directrices de 2006, le GIEC estime le FE de méthane de base, **FEC** pour une **rizière de référence** (pas de submersion 180j avant mise en culture, submersion continue pendant la durée du cycle de production, pas d'apports en matières organiques) à **1,3 [0,80-2,20] kg CH₄/ha/j**. Dans les Révisions 2019, ce même facteur de base est de **1,19 [0,80-1,76] kg CH₄/ha/j**.

Des valeurs par défaut sont disponibles pour chacun des FEch, selon les pratiques :

FE	Agrégé		Désagrégé		
	Valeur par défaut	Incertitude	Régime hydrique	Valeur par défaut	Incertitude
FE_{ch_w} Régime hydrique pendant la période de culture	0,78	0,62 – 0,98	Inondation continue	1	0,79-1,26
			Drainage simple	0,60	0,46 – 0,80
			Drainage multiple	0,52	0,41 – 0,66
FE_{ch_p} Régime hydrique avant la période de culture	1,22	1,07 – 1,40	Non inondé pré-saison < 180jrs 	1	0,88 – 1,14
			Non inondé pré-saison > 180jrs 	0,68	0,58 – 0,80
			Inondé en pré-saison >30 jrs 	1,90	1,65 - 2,18

Pour le **FE_{ch_o}**, les amendements contenant plus de carbone facilement décomposable émettent plus de CH₄, et les émissions augmentent avec les doses d'amendement organique, tous types confondus. **FE_{ch_o}** est donc modulable selon le(s) type(s) d'amendement(s) considérés selon la formule :

$$FEch_o = \left(1 + \sum_i TxAO_i \cdot FCAO_i \right)^{0,59}$$

Avec $TxAO_i$ = taux d'application de l'amendement organique i , en poids sec pour la paille et en poids frais pour les autres, t/ha

$FCAO_i$ = facteur de conversion de l'amendement organique i (par rapport à son impact relatif sur la paille appliquée peu de temps après la culture)

$FCAO_i$ est donné pour chaque type d'amendement organique considéré :

Amendement organique	FCAO	Incertitude
Paille incorporée peu avant la culture (<30 jours)	1	0,97 – 1,04
Paille incorporée longtemps avant la culture (>30 jours)	0,29	0,20 – 0,40
Compost	0,05	0,01 – 0,08
Fumier de ferme	0,14	0,07 – 0,20
Engrais vert	0,50	0,30 – 0,60

L'approche Tier 1 est réservée aux pays pour lesquels le riz n'est pas une catégorie clé et qui ne disposent pas de données spécifiques. L'approche Tier 2 est la plus communément visée. A ce jour, très peu de pays ont atteint le niveau d'exigence Tier 3 basée sur la modélisation pour estimer les émissions de CH₄ provenant de la riziculture dans leurs rapports d'inventaire de GES nationaux. C'est le cas de la Chine, des États-Unis, du Japon et de l'Inde.

Emissions dues au drainage de sols organiques

La riziculture sur tourbière nécessite la prise en compte de FE spécifiques. Le drainage abaisse le niveau de la nappe phréatique, expose à l'oxydation les couches de sol organique autrefois saturées qui dégagent du CO₂. Les émissions issues des tourbières drainées dépendent de la température et du climat. Afin de se rendre compte des ordres de grandeurs dont il est question, l'exemple du Projet d'appui à l'irrigation dans le Sud d'Haïti (PAIS), financé par l'AFD est éclairant : le drainage de 500 ha de terres hydromorphes génère un delta avec/sans projet de +25 985 t_{eq}CO₂/an, soit 52 t_{eq}CO₂/ha/an sur 20 ans (SalvaTerra, 2022)⁴⁵.

Le drainage modifie les facteurs environnementaux tels que la température du sol, le potentiel de réduction et d'oxydation, et la quantité de MO facilement décomposable. Il entraîne une réduction de l'activité des méthanogènes et donc limite les émissions de CH₄. Cependant, la création d'un réseau de canaux pour le drainage est responsable d'émissions de CH₄ qu'il convient d'estimer (IPCC, 2014).

La formule ci-après est utilisée :

$$CH_{4_organic} = \sum_{c,n,p} \left(A_{c,n,p} \cdot \left((1 - Frac_{ditch}) \cdot EF_{CH_4_landc,n} + Frac_{ditch} \cdot EF_{CH_4_ditchc,p} \right) \right)$$

Avec $CH_{4_organic}$ = perte annuelle de CH₄ par les sols organiques drainés, kg CH₄/an

$A_{c,n,p}$ = superficie des sols organiques drainés dans une catégorie d'utilisation des terres dans la zone climatique c, état nutritif n et le type de sol p, ha

$EF_{CH_4_landc,n}$ = FE pour les émissions directes de CH₄ des sols organiques drainés, par zone climatique c et l'état nutritionnel n. Pour la riziculture, $EF_{CH_4_landc,n}$ est estimé à 143.5 [63,2 – 223,7] kg CH₄/ha/an pour le Tier 1.

$EF_{CH_4_ditchc,p}$ = FE pour les émissions de CH₄ provenant des fossés de drainage, par zone climatique c et type de sol p, kg CH₄/ha/an

$Frac_{ditch}$ = fraction de la surface totale de sol organique drainé qui est occupée par des fossés (où les "fossés" sont considérés comme toute zone de canaux artificiels creusés dans la tourbière).

2.3.3. Estimation des émissions de N₂O

Le GIEC propose une comptabilisation des émissions directes de N₂O issues des rizières selon l'équation suivante (IPCC, 2006) :

$$N_2O-N_{N\text{ Entrées}} = F_{SN} \cdot F_{ON} \cdot F_{RR} \cdot F_{MOS} \cdot FE_{1RI}$$

Avec

$N_2O-N_{N\text{ Entrées}}$ = émissions annuelles directes de N₂O–N imputables aux entrées de N sur les sols gérés, kg N₂O–N /an

FE_{1RI} pour les rizières inondées, kg N₂O–N/kg N

F_{SN} = quantité annuelle de N d'**engrais synthétique** appliqué aux sols, kg N/an

F_{ON} = quantité annuelle de **fumier animal, compost, boues d'égouts et autres ajouts de N organiques** appliquée aux sols, kg N/an

F_{RR} = quantité annuelle de N retourné aux sols dans les **résidus de récoltes** (aériens et souterrains), y compris les cultures fixatrices d'azote et dues au renouvellement des fourrages/pâturages, kg N/an

45 SalvaTerra, 2022. Riziculture irriguée et changement climatique - Approfondissements méthodologiques pour la finance climat et la contribution aux trajectoires long terme AFOLU bas carbone et résiliente. Livrable 2 – Typologie des projets de riziculture irriguée financés par l'AFD. 42p.

F_{Mos} = quantité annuelle de N minéralisé dans les sols minéraux associée aux pertes de C des sols de la MO des sols en raison de changements d'affectation des terres ou de gestion, kg N/an

D'après les Lignes directrices 2006 du GIEC, la valeur par défaut de FE_{1RI} est estimée à 0,003 [0,000 – 0,006], qui s'applique en cas d'inondation continue et intermittente.

Ce FE a été mis à jour et découpé selon le régime hydrique dans les Révisions 2019 afin de mieux refléter l'augmentation des émissions en cas de drainage simple ou multiple :

FE	Agrégé		Désagrégé		
	Valeur par défaut	Incertitude	Régime hydrique	Valeur par défaut	Incertitude
FE _{1RI}	0.004	0.000 – 0.029	Inondation continue	0,003	0, 000 – 0,010
			Drainages (1 ou plusieurs, incl. AWD)	0,005	0,000 – 0,016

Emissions de N₂O dues au drainage de sols organiques

Les émissions directes issues des sols organiques drainés sont obtenues en multipliant la surface drainée (ha) par le FE par défaut correspondant, donné dans le Supplément zones humides (IPCC, 2014), qui pour le riz est estimé à **0,4 [-0,1 – 0,8]** kg N₂O-N/ha/an. NB : conversion des émissions N₂O-N en N₂O en multipliant par un facteur 44/28.

2.4. Emissions/absorption de CO₂

2.4.1. Stockage du carbone du sol (SOC)

Le stockage du carbone correspond à l'augmentation du stock de carbone au fil du temps. Un changement dans le régime des entrées ou des sorties de C, s'il est maintenu, fera évoluer le stock de carbone vers un équilibre après un temps théoriquement infini (le stock d'équilibre étant modélisé mathématiquement par une asymptote).

Nous définissons le stockage maximal associé à cette évolution comme la différence entre le stock d'équilibre futur et le stock initial. Il est donc défini pour un sol donné, sous un climat donné, et un changement de gestion donné. Les gains de C étant très lents, le GIEC (IPCC, 2019a)⁴⁶ fait par défaut les hypothèses suivantes :

- 1) Au fil du temps, le stock SOC atteint une valeur stable, moyennée dans l'espace, spécifique au sol, au climat, à l'utilisation des terres et aux pratiques de gestion.
- 2) La variation du stock de SOC pendant la transition vers un nouvel équilibre SOC se produit de manière linéaire sur une période de 20 ans.

Les principales pratiques de gestion connues pour avoir un impact sur les stocks de SOC dans les terres cultivées sont les suivantes : la gestion des résidus, la gestion du travail du sol, la gestion des engrais (engrais minéraux et amendements organiques), le choix de la culture et l'intensité de la gestion des cultures (par exemple, la culture continue par rapport aux rotations de cultures avec des périodes de jachère nue), la gestion de l'irrigation, et les systèmes mixtes avec des cultures et des pâturages ou du foin en séquences rotatives (IPCC, 2019b)⁴⁷.

46 IPCC, 2019a. *Revised GHG Inventory Guidelines – Volume 4 AFOLU - Chapter 2: Generic Methodologies for Multiple Land-Use Categories*. 96p

47 IPCC, 2019b. *Revised GHG Inventory Guidelines – Volume 4 AFOLU - Chapter 5: Cropland*. 102p

Pour donner une idée des quantités de C pouvant être stockées, (MINANSNY et al., 2017)⁴⁸ ont comparé différentes techniques de gestion des cultures dans 20 pays (à différentes latitudes) et ont trouvé, selon la pratique considérée, l'augmentation moyenne suivante de C (NB : x 3. 67 pour convertir les tC en $t_{eq}CO_2$) : reboisement (~ 0,6 tC/ha/an), conversion en pâturage (~ 0,5 tC/ha/an), amendements organiques (~ 0,5 tC/ha/an), incorporation de résidus (~ 0,35 tC/ha/an), absence de labour ou labour réduit (~ 0,3 tC/ha/an) et rotation des cultures (~ 0,2 tC/ha/an). Ces données ne sont pas spécifiques au riz mais donnent une idée de l'impact de chaque pratique sur le C du sol. Pour le riz irrigué, les pratiques ayant le plus d'impact sur l'accumulation du SOC sont l'incorporation des pailles, l'usage de biofertilisants et amendements organiques, de fertilisation NPK, zéro-labour ou labour minimum (GHIMIRE et al., 2017⁴⁹ ; OECHAIYAPHUM et al., 2020⁵⁰).

Les lignes directrices du GIEC se concentrent sur le SOC car c'est la forme de carbone qui sera le plus largement impactée par l'utilisation et la gestion des terres. Les stocks de SOC changent lorsque les entrées de C (par la gestion des cultures, la décomposition, etc.) ne compensent pas les sorties de C (érosion, transformation en CO_2 , etc.) (IPCC, 2019a). L'équation de référence pour estimer la variation annuelle des stocks de SOC est la suivante (équation 2.24) :

$$\Delta C_{Soils} = \Delta C_{Mineral} - L_{organic} + \Delta C_{inorganic}$$

Avec : la variation annuelle des stocks de carbone dans les sols (C_{Soils}) égale à la variation annuelle des stocks de carbone organique dans les sols minéraux ($C_{Mineral}$) moins la perte annuelle de carbone des sols organiques drainés plus la variation annuelle des stocks de carbone inorganique des sols ($C_{inorganic}$).

Sachant que $C_{inorganic}$ est supposé être égal à 0, sauf si l'on utilise le Tier 3, l'équation est souvent réduite à :

$$\Delta C_{Soils} = \Delta C_{Mineral} - L_{organic}$$

Comme défini par le GIEC, les terres cultivées comprennent toutes les cultures annuelles et pérennes, y compris le riz (chapitre 5). L'équation générale est la suivante :

$$\Delta C_{Mineral} = \frac{SOC_0 - SOC_{(0-T)}}{D}$$

$$SOC_{Mineral} = \sum_{C, s, i} (SOC_{REF, c, s, i} \cdot F_{LUc, s, i} \cdot F_{MG, c, s, i} \cdot F_{lc, s, i} \cdot A_{c, s, i})$$

Avec :

$C_{Mineral}$ = variation annuelle des stocks de C organique dans les sols minéraux, tonnes C par an-1.

SOC_0 = stock de C organique du sol minéral ($SOC_{Mineral}$) au cours de la dernière année d'une période d'inventaire, tonnes C

48 Minasny B., Malone BP., McBratney AB., Angers DA., Arrouays D., Chambers A., Chaplot V., Chen, ZS., Cheng K., Das BS., Field DJ., Gimona A., Hedley CB., Hong SY., Mandal B., Marchant, BP., Martin M., McConkey BG., Mulder VL., O'Rourke S., Richer-de-Forges AC., Odeh I., Padarian J., Paustian K., Pan G., Poggio L., Savin I., Stolbovoy V., Stockmann U., Sulaeman Y., Tsui CC., Vågen, TG., van Wesemael B., Winowiecki L., 2017. Soil carbon 4 per mille. Geoderma 292, 59–86. 28p.

49 Ghimire R., Lamichhane S., Acharya BS., Bista P., Sainju UM., 2017. Tillage, crop residue, and nutrient management effects on soil organic carbon in rice-based cropping systems: A review. Journal of Integrative Agriculture, Volume 16, Issue 1, 2017, Pages 1-15, ISSN 2095-3119, [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61337-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61337-0).

50 Oechaiyaphum K., Ullah H., Shrestha RP., Datta A., 2020. Impact of long-term agricultural management practices on soil organic carbon and soil fertility of paddy fields in Northeastern Thailand. Geoderma Regional, Volume 22, 2020, e00307, ISSN 2352-0094, <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00307>

$SOC(0 - T)$ = stock de carbone organique du sol minéral au début de la période d'inventaire, tonnes C

T = nombre d'années au cours d'une période d'inventaire unique, an

D = dépendance temporelle des facteurs de variation du stock de carbone organique du sol minéral, qui est la période par défaut pour la transition entre les valeurs d'équilibre du SOC, en années. Généralement 20 ans, mais dépend des hypothèses faites dans le calcul des facteurs FLU, FMG et FI. Si T dépasse D , utiliser la valeur de T pour obtenir un taux de variation annuel sur la période d'inventaire ($0-T$ ans).

c = représente les zones climatiques incluses dans l'inventaire

s = représente les types de sol inclus dans l'inventaire

i = représente l'ensemble des systèmes de gestion inclus dans l'inventaire.

$SOC_{Mineral}$ = stock total de C organique du sol minéral à un moment donné, en tonnes C

$SOC_{REFc, s, i}$ = stock de carbone organique du sol pour les sols minéraux dans l'état de référence, tonnes C ha⁻¹

$FLU_{c, s, i}$ = facteur de variation du stock pour les systèmes ou sous-systèmes d'utilisation des sols organiques des sols minéraux pour une utilisation particulière des sols, sans dimension

$FMG_{c, s, i}$ = facteur de variation des stocks de carbone organique du sol minéral pour le régime de gestion, sans dimension

$FI_{c, s, i}$ = facteur de variation du stock de carbone organique du sol minéral pour l'apport d'amendements organiques, sans dimension

$A_{c, s, i}$ = superficie de la strate à estimer, ha

Le riz est considéré comme une culture annuelle de long terme (> 20 ans) sur terres humides, pouvant inclure des doubles cultures avec des cultures non inondées. Pour le Tier 1, F_{LU} par défaut est fixé à 1,10 (±50%). Les facteurs de travail du sol et d'entrées ne sont pas utilisés (IPCC, 2006).

2.4.2. Emissions dues au drainage de sols organiques

On considère que la perte en SOC a lieu immédiatement après drainage de la tourbière. Les facteurs les plus importants à prendre en compte pour évaluer les émissions à partir des sols drainés sont en premier lieu l'usage des sols et la zone climatique. D'autres facteurs tels que la fertilité et le niveau de drainage influent sur les émissions et peuvent être pris en compte pour les méthodes Tier 2 et plus. Pour le riz en zone tropical par exemple, les émissions de CO₂ sont obtenues en multipliant les surfaces concernées par un FE de 9,4 [-0,2 - 20] tCO₂/ha/an.

2.5. Gestion des incertitudes

Les incertitudes sont présentes dans les jeux de données utilisés, qu'il s'agisse des valeurs par défaut du GIEC (Tier 1) ou des données spécifiques (Tier 2 et 3). Elles peuvent être liées à l'utilisation d'approximations/extrapolation, à des erreurs d'échantillonnage ou de mesure, etc. Les *bonnes pratiques* incitent à chercher à minimiser l'incertitude des émissions/absorptions comptabilisées, qu'elles soient émises ou évitées et donner des indications sur la nature et l'ampleur de ces incertitudes associées.

Les valeurs pas défaut du GIEC comportent toutes une incertitude associée, mais dès lors que des données spécifiques sont utilisées, les incertitudes peuvent être très complexes à déterminer. C'est particulièrement le cas pour des pratiques complexes comme la gestion des résidus par exemple, qui dépendent de beaucoup de paramètres. L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME, 2014)⁵¹ propose le tableau suivant pour donner un ordre de grandeur des incertitudes associées aux émissions/absorptions selon le type de données de base :

51 ADEME, 2014. Réalisation d'un bilan des émissions de gaz à effet de serre. Guide sectoriel 2014.

Type de données	Description	Fourchette d'incertitude
Données primaires	Données observées, prélevées à partir des systèmes d'information et relevés physiques	5% à 20%
Données secondaires ou échantillonnage de bonne représentativité	Données génériques ou données moyennes provenant de sources publiées	15% à 40%
Données extrapolées ou échantillonnage de représentativité moyenne	Données primaires ou secondaires liées à une activité similaire qui sont adaptées ou personnalisées à une nouvelle situation	20% à 50%
Données approchées ou échantillonnage de faible représentativité	Données primaires ou secondaires liées à une activité semblable qui peut être utilisée en lieu et place de données représentatives. Ces données existantes sont directement utilisées sans adaptation.	30% à 50%

Dans la plupart des cas, les incertitudes ne sont pas traitées par les outils de calcul des émissions de GES.

EX-ACT donne un pourcentage d'incertitude agrégé dans l'onglet Results, cependant le calcul sous-jacent n'est pas visible aux utilisateurs. Le détail de la prise en compte des incertitudes est accessible dans le guide technique de EX-ACT (notamment les incertitudes associées aux données par défaut du GIEC pour le Tier 1) (FAO, 2022)⁵². NEXT n'intègre pas les incertitudes (SCHIETTECATTE et al., 2022⁵³).

Le GIEC propose des méthodes de calculs pour décrire la façon dont l'incertitude de chaque paramètre individuel dans une équation contribue à l'incertitude totale par la propagation des incertitudes. Si l'incertitude suit une courbe de Gauss (distribution normale), on peut appliquer les formules suivantes :

Pour les multiplications de facteurs : $U_{total} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}$

Pour les additions/soustractions de facteurs : $U_{total} = \frac{\sqrt{(U_1 \cdot x_1)^2 + (U_2 \cdot x_2)^2 + \dots + (U_n \cdot x_n)^2}}{|x_1 + x_2 + \dots + x_n|}$

Avec U_{total} : incertitude finale du produit ou de la somme d'émissions

U_n le pourcentage associé à la donnée ou au FE

x_n les émissions additionnées

Lorsque les incertitudes ne suivent pas une distribution gaussienne comme c'est le cas de la plupart des FE en riziculture, il faut faire appel à des méthodes de calculs spécifiques au cas par cas.

3. Potentiel de réduction des différentes pratiques culturelles

3.1. Emissions par type de système

Un système de riziculture irrigué peut être défini comme le croisement de plusieurs pratiques culturelles dans des conditions données (pratique de gestion de l'eau x pratiques de fertilisation x pratiques de travail du sol x etc.). Les émissions de GES dépendent en grande partie des pratiques mises en œuvre et des effets combinés de ces pratiques. Il est donc impossible de caractériser chaque système en termes d'émissions puisqu'il en existe autant que de contextes agro-climatiques et de pratiques associées.

Par ailleurs, les FE du GIEC ne permettent pas de caractériser très finement les différents systèmes existants. Par exemple, une grande diversité de techniques culturelles sont couvertes par la catégorie

52 FAO. 2022. Ex-Ante Carbon-balance Tool | EX-ACT – Guidelines. Second edition – Tool version 9. Rome.

<https://doi.org/10.4060/cc0142en>

53 Schiettecatte, L-S., Audebert, P., Umulisa, V., Dionisio, D. and Bernoux, M., 2022. Technical guide for the Nationally Determined Contribution Expert Tool (NEXT). <https://doi.org/10.4060/cc0568en>

« riziculture irriguée partiellement inondée – plusieurs périodes sèches » (variations importantes du nombre de jours d'assecs, de la hauteur de la nappe d'eau dans le sol, etc.). Le FE unique proposé par le GIEC donne seulement une idée des ordres de grandeur des émissions associées.

A titre d'exemple, nous avons caractérisé quelques systèmes de riziculture en appliquant les FE du GIEC (Tier 1), pour des cycles de culture de 120 jours :

Pratiques	Emissions de CH ₄ (pour un cycle de culture)
Système type « Riz-Riz-Riz » sans MO <ul style="list-style-type: none"> • <i>Inondation continue</i> • <i>Inondé en pré-saison >30 jrs</i> • <i>Pas d'apports de MO (pailles exportées)</i> 	8,3 t _{eq} CO ₂ /ha
Système type « Riz-Riz-Riz » avec incorporation MO <ul style="list-style-type: none"> • <i>Inondation continue</i> • <i>Inondé en pré-saison >30 jrs</i> • <i>Incorporation des pailles peu avant la saison</i> 	12,5 t _{eq} CO ₂ /ha
Situation de référence GIEC, sans MO <ul style="list-style-type: none"> • <i>Inondation continue</i> • <i>Pas de submersion 180 jrs avant mise en culture</i> • <i>Pas d'apports de MO (pailles exportées)</i> 	4,4 t _{eq} CO ₂ /ha
Système type Système de Riziculture Intensive (SRI)⁵⁴ <ul style="list-style-type: none"> • Drainages multiples • Pas de submersion 180 jrs avant mise en culture • Pailles incorporées avant culture + 10 t/ha de compost 	2,9 t _{eq} CO ₂ /ha

Ces quelques exemples illustrent bien que les principaux postes d'émissions sont relatifs à la gestion de l'eau et aux apports en MO.

D'autres systèmes comme par exemple le « *ratoon cropping* » (seconde récolte sur les chaumes déjà récoltés une première fois, pratiquée aux Etats-Unis notamment) ne sont pas couverts par les valeurs par défaut du GIEC. Des FE spécifiques ont donc été développés (LINQUIST et al, 2018)⁵⁵.

3.2. Effet des pratiques culturelles sur les émissions

Au niveau mondial, tous les efforts convergent pour concilier l'objectif de réduction des émissions de GES avec le maintien voire l'augmentation du rendement du riz et des superficies irriguées, notamment en modifiant les méthodes d'irrigation, les pratiques de travail du sol, la fertilisation, la réhabilitation et création de périmètres irrigués, etc.

En outre, certaines pratiques de gestion ont des effets opposés sur les émissions de CH₄ et de N₂O. A titre d'exemple, l'irrigation intermittente, souvent citée comme l'une des pratiques clé pour diminuer l'empreinte écologique du riz irrigué, a tendance à augmenter les émissions de N₂O. Il s'agit donc de trouver le meilleur compromis possible afin de diminuer les émissions de CH₄ sans trop augmenter les émissions de N₂O. A priori, l'AWD ne s'accompagne pas d'une augmentation de l'utilisation de produits

54 Le Système de Riziculture Intensive (ou SRI), a été mis au point à Madagascar en 1983 par le Père Henri de Laulanié. Il s'agit d'une conjonction de pratiques fondées sur l'introduction de périodes d'assecs, une modification de la période et la densité de plantation et l'apport de matière organique.

Plus de détails sur la fiche FAO, 2012. Système de riziculture intensive. <https://www.fao.org/3/CA3559FR/ca3559fr.pdf>

55 Linquist BA., Marcos M. Adviento-Barbe MA., Anders M., Harrell D., Linscombe S., Reba ML., Runkle BRK., Tarpley L., Thomson A., 2018. Greenhouse Gas Emissions and Management Practices that Affect Emissions in US Rice. J. Environ. Qual. 47:395–409 (2018) doi:10.2134/jeq2017.11.0445

phytosanitaires voire dans certains cas diminue les risques d'attaques de ravageurs et maladies (BIGORNIA, 2016⁵⁶). Il est important de noter cependant que l'impact de l'AWD sur l'utilisation de produits phytosanitaires peut varier selon les régions et les conditions climatiques.

Les effets des différentes pratiques de gestion sur le rendement du riz et les émissions de GES ont été largement documentés à l'échelle locale, régionale, nationale et mondiale. Cependant ces travaux sont difficilement comparables entre eux car

- Ils ne prennent pas tous en compte l'ensemble des émissions (CH₄, N₂O) et les effets sur le SOC ;
- Les unités de mesures sont souvent différentes (émissions par unités de surface ou par unités de rendement, taux d'émissions par saison, par cycle ou par an) ;
- Ils étudient une conjonction de pratiques ou des pratiques séparément sans toujours spécifier les autres paramètres de gestion. Il est donc difficile de donner une fourchette d'émissions par pratique au niveau global.

Afin de donner une idée des effets des différentes pratiques sur les émissions de GES, on s'appuiera principalement sur les méta-analyses multi pays produites sur le sujet, notamment celle de LINQUIST et al. (2012) pour les pratiques de fertilisation, CARRIJO et al (2017)⁵⁷, LINQUIST et al. (2018) et ZHAO et al. (2019)⁵⁸ concernant les régimes hydriques et les pratiques culturales. Il faut noter que les impacts des pratiques sur les émissions de GES sont toujours exprimés en % par rapport à une situation de référence dans la littérature. Les chiffres en valeurs absolues par pratique ne sont pas disponibles au niveau global.

3.2.1. Gestion de l'eau

Les ordres de grandeurs ci-dessous sont exprimés en % de réduction d'émissions par rapport à un système de référence [**inondation continue / pas de submersion 180j avant mise en culture / pas d'apports en matières organiques**] avec un facteur d'émission journalier de **1,3 [0,80-2,20] kg CH₄ ha/jour** (soit **36,4 [22,4-61,6] kg CO₂**, sachant que le pouvoir de réchauffement global du CH₄ est 28 fois supérieur à celui du CO₂) avec un intervalle de confiance de 95%.

⁵⁶ Bigornia, J.S.R, Sparks, A.H., Sander, B.O., 2016. Impact of alternate wetting and drying (AWD) on rice pest and the environment. Philippine Journal of Crop Science, V42.

⁵⁷ Carrijo DR., Lundy ME., Linquist BA. 2017. Rice yields and water use under alternate wetting and drying irrigation: A meta-analysis. Field Crops Research, 203(), 173–180. doi:10.1016/j.fcr.2016.12.002

⁵⁸ Zhao X., Pu C., Ma ST., Liu SL., Xue JF., Wang X., Wang YQ., Li SS., Lal R., Chen R., Zhang HL., 2019. Management-induced greenhouse gases emission mitigation in global rice production.

Régimes hydriques	Effet sur les émissions de GES	Impact sur les émissions de GES
Drainage de mi-saison	L'ampleur de la réduction de CH ₄ émis varie selon le moment et l'importance de l'assèchement du sol. Les différentes études estiment entre 38% et 66% de réduction des émissions globales (émissions de N ₂ O négligeables) par rapport à la situation de référence (PERRY et al., 2022) ⁵⁹ .	[REDUCTION] Moyenne
AWD	<p>Selon l'IRRI (2016)⁶⁰, l'AWD permet une réduction de 48% des émissions de CH₄ en moyenne. La plupart des études font état de réduction d'émissions de CH₄ entre 48% à 93% par rapport à une rizière de référence en inondation continue (YAN et al., 2005)⁶¹ (QIN et al., 2010)⁶² (LINQUIST et al., 2018).</p> <p>Variation des réductions d'émissions de CH₄ selon le type de AWD appliqué de 41 à 73% selon les intensités/fréquences d'assecs (BALAINE et al., 2019)⁶³</p> <p>Variation des réductions d'émissions de CH₄ selon les types de sols / zones climatiques considérées - entre 25% et 37% de réduction de CH₄ (TIROL-PADRE et al. 2018)⁶⁴.</p> <p>Attention : augmentation des émissions de N₂O et réduction du SOC proportionnelle aux nombres de jours d'assecs. Cependant, malgré les augmentations, le bilan net reste meilleur en régime AWD qu'en conditions inondées ou avec un seul drainage.</p>	[REDUCTION] Forte

3.2.2. Fertilisation

Gestion des résidus

La gestion des résidus a un impact important sur les émissions de GES, principalement sur les émissions de CH₄ en inondation continue. Ainsi, on considère que l'incorporation tardive des pailles en système inondé en continu est la pratique la plus émissive en termes de CH₄. Par ailleurs, l'incorporation des résidus joue un rôle important dans le cycle du carbone, en permettant d'accroître la séquestration du SOC.

Ainsi, les pratiques de brulage ou export des pailles permettront de limiter les émissions de CH₄, mais réduiront également drastiquement la séquestration de SOC. L'incorporation des résidus peut être une pratique vertueuse en termes d'émissions et de séquestration, mais elle dépend des pratiques de gestion de l'eau et du sol associées.

Relativement peu de publications générales traitent finement les résultats des pratiques de gestion des résidus selon les régimes hydriques appliqués. Les résultats des publications spécifiques à des contextes/pays donnés sont très variables. Nous avons extrait ci-dessous des ordres de grandeurs des réductions d'émissions possibles selon les différentes options de gestion. Dans la plupart des cas, les

59 Perry H., Carrijo D., Linquist B., 2022. Single midseason drainage events decrease global warming potential without sacrificing grain yield in flooded rice systems.

60 International Rice Research Institute, 2016. Overview of AWD. http://books.irri.org/AWD_brochure.pdf

61 Yan X., Yagi K., Akiyama H., Akimoto H., 2005. Statistical analysis of the major variables controlling methane emission from rice fields. , 11(7), 1131–1141. doi:10.1111/j.1365-2486.2005.00976.x

62 Qin, Y., Liu, S., Guo, Y. 2010. Methane and nitrous oxide emissions from organic and conventional rice cropping systems in Southeast China. Biol Fert Soil 46, 825–834 (2010). <https://doi.org/10.1007/s00374-010-0493-5>

63 Balaine N., Carrijo D. R., Adviento-Barbe M.A., Linquist B., 2019. Greenhouse Gases from Irrigated Rice Systems under Varying Severity of Alternate-Wetting and Drying Irrigation. Soil & Water Management & Conservation. Soil Science Society of America Journal. 83:1533–1541. doi:10.2136/sssaj2019.04.0113. 9p.

64 Tirol-Padre et al., 2018. Site specific feasibility of AWD as a Greenhouse Gas mitigation option in irrigated rice fields in South East Asia.

recommandations vont dans le sens d'une incorporation des résidus en système d'irrigation intermittente car cela limite les émissions tout en maintenant voire augmentant les rendements.

Pratiques		Effet sur les émissions de GES	Impact sur les émissions de GES	
Gestion des résidus de culture	Inondation continue	Export	Réduction de 45% des émissions de CH₄ par rapport à incorporation tardive (WANG et al., 2016) ⁶⁵ mais également réduction du stock de SOC.	[REDUCTION] Moyenne
		Intégration des résidus au moins 30 jours avant inondation	Réduction des émissions de CH₄ jusqu'à 80% par rapport à une incorporation tardive (ALLEN, 2020) ⁶⁶ . Amélioration du stockage de SOC.	[REDUCTION] Forte
	Drainage / Irrigation intermittente	Brûlage	Réduction des émissions de CH₄ de 27% à 47% par rapport à un export total des résidus en conditions inondées (HUNG et al., 2022) ⁶⁷ Augmentation des émissions de N ₂ O	[REDUCTION] Moyenne
		Intégration	Réduction des émissions de CH₄ de 36% à 45% par rapport à un export total des résidus en conditions inondées (HUNG et al., 2022) Augmentation des émissions de N ₂ O	[REDUCTION] Moyenne

65 Wang W., Wu X., Chen A., Xie X., Wang Y., Yin C., 2016. Mitigating effects of ex situ application of rice straw on CH₄ and N₂O emissions from paddy-upland coexisting system. Sci Rep 6:37402

66 Allen J., Pascual K.S., Van Trinh M., Van Thach T., Sander B.O., 2020. Rice Straw Management Effects On Greenhouse Gas Emissions and Mitigation Options. M. Gummert et al. (eds.), Sustainable Rice Straw Management.

67 Hung, D.T., Banfield, C.C., Dorodnikov, M., 2022. Improved water and rice residue managements reduce greenhouse gas emissions from paddy soil and increase rice yields. Paddy Water Environ 20, 93–105 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10333-021-00877-0>

Autres pratiques de fertilisation

Pratiques	Effet sur les émissions de GES	Impact sur les émissions de GES
Apports MO (fumier/compost)	Augmentation de 60,4% des émissions de CH ₄ par rapport à une situation sans apports organiques (ZHAO et al., 2019). Mais Augmentation du SOC	[AUGMENTATION] Forte
Fertilisation azotée	Augmentation de 9% des émissions de CH₄ par rapport à une situation sans apports d'engrais azotés. Augmentation de 167% des émissions de N₂O par rapport à une situation sans apports (ZHAO et al., 2019).	[AUGMENTATION] Forte
Biochar	Pas d'impact sur les émissions de CH ₄	-

3.2.3. Travail du sol et autres pratiques

Nous reporterons ici les pratiques ayant un impact significatif sur les émissions de GES. Ainsi, le travail du sol est une pratique importante à considérer. En conditions aérobies, il est démontré que le travail du sol stimule la minéralisation et l'oxydation de la MO, ce qui entraîne une réduction du SOC et une augmentation des émissions de N₂O, même lorsque les résidus sont exportés (ALLEN, 2020). Selon le régime hydrique adopté, il est donc conseillé d'éviter au maximum un travail du sol en profondeur.

Pratiques	Réduction par rapport à situation de référence	Potentiel de réduction des GES
Zero-labour / Sans résidus	Réduction de 30% des émissions de CH₄ comparé à un labour sans intégration de résidus (ZHAO et al., 2016). Les émissions de N ₂ O dépendent du type de sol et de la gestion des résidus associée : L'intégration de résidus en systèmes de NT génère par exemple une augmentation des émissions de N₂O . L'intérêt du zéro-labour dépend donc largement de la gestion de la lame d'eau et des résidus. Dans certains cas, le bénéfice en termes d'émissions de CH ₄ est contrebalancé par de fortes émissions de N ₂ O.	[REDUCTION] Faible
Nouvelles variétés de riz	Diminution de 23,7% des émissions de CH ₄ par rapport aux variétés traditionnelles (P<0,05) (ZHAO et al., 2019)	[REDUCTION] Faible
Intrants - Inhibiteurs de nitrification et d'uréase, inhibiteur de méthane, phosphogypse, etc.	Diminution de 16,6% (P<0,05) par rapport à une situation sans intrants (ZHAO et al., 2019)	[REDUCTION] Faible

3.2.4. Système d'irrigation, réhabilitation/création de rizières

La mise en place de systèmes d'irrigation peut également générer des émissions de GES, principalement CO₂, dans le cas d'aménagements hydroagricoles lourds qui sont considérés comme un changement d'usage du sol par le GIEC. Ainsi, on considère qu'il y a émission instantanée de SOC sur les surfaces concernées par la mise en place de drains, de canaux, de réservoirs etc. Ces opérations sont souvent mécanisées et il convient également de considérer les émissions dues à l'utilisation d'énergies fossiles. Cependant, ces postes d'émissions sont la plupart du temps négligeables au regard des émissions liées aux pratiques culturales.

Réhabilitation / création de périmètres irrigués pour la culture du riz

L'analyse des projets financés par l'AFD montre que la création d'aménagements hydro-agricoles concerne environ la moitié des projets financés (SalvaTerra, 2022). Cependant, les surfaces créées sont généralement très réduites par rapport aux surfaces réhabilitées : par ex, 27 ha créés et 508 ha réhabilités pour le Projet d'amélioration de la sécurité alimentaire par la relance de l'irrigué dans le Gorgol et le Guidimakha – Phase 1 (ASARIGG1) en Mauritanie (*Ibid*).

Pour un seul de ces projets, *Agriculture Water Management Project in the North-West* (Projet de gestion des eaux agricoles dans le Nord-Ouest) au Ghana, il s'agit d'un aménagement de grande ampleur avec la création de nouveaux barrages, qui génèrent des émissions importantes. Le projet comprend trois forages avec 19 ha en tout (3% de la surface totale du projet), deux périmètres réhabilités avec 35 ha en tout (6%), trois barrages réhabilités avec 280 ha en tout (49%) et cinq nouveaux barrages avec 242 ha en tout (42%).

A titre d'exemple, un extrait du bilan EX-ACT du projet est présenté ci-dessous :

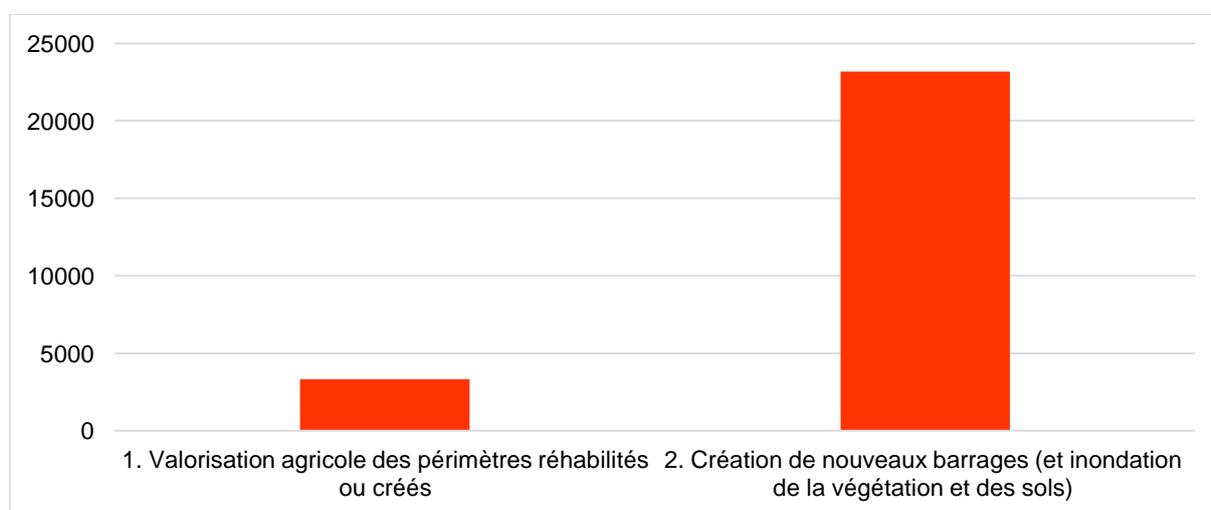


Figure 8 : Bilan EXACT d'AWMP (SalvaTerra, 2022 ; sur base des données AFD)

Sur des zones irriguées existantes, l'introduction ou l'extension de la riziculture irriguée est en général synonyme d'une augmentation des émissions par unités de surface. Cependant, il faut garder à l'esprit que les émissions de GES dépendent énormément du temps d'inondation des parcelles et donc que le bilan global ne sera pas équivalent selon les régimes hydriques adoptés (cf. parties 3.2.1 supra).

Ainsi, dans le cas du projet *Irrigated Agriculture Inclusive Development Project* (Projet de développement inclusif de l'agriculture irriguée – IADP) en Birmanie (SalvaTerra, 2022), l'extension de 6% (+ 1 750 ha) des surfaces cultivées en riz pendant la mousson et 36% (+ 7 580 ha) des surfaces cultivées en saison sèche entraîne l'augmentation des émissions de 7 716 t_{eq}CO₂/an. Il en est de même pour le projet AWMP, où la mise en valeur agricole des terres génère 3 333 t_{eq}CO₂/an.



Février 2023

SAS SalvaTerra
6 rue de Panama
75018 Paris I France
Tél : +33 (0)6 66 49 95 31
Email : info@salvaterra.fr
Web : www.salvaterra.fr

