RAPPORT FINAL

mars 2023

4 POUR 1000

LES SOLS POUR LA SÉCURITÉ ALIMENTAIRE ET LE CLIMAT

STOCKER DU CARBONE DANS LES SOLS AGRICOLES ET FORESTIERS ULTRAMARINS

État des lieux de l'applicabilité et recommandations pour l'adaptation des Méthodes Grandes Cultures et Carbon Agri du Label « Bas-Carbone » au territoire réunionnais

ADEME AGENCE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE
cirad LA RECHERCHE AGRONOMIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT
INRAE
IRD Institut de Recherche pour le Développement FRANCE
MINISTÈRE DE L'INTÉRIEUR ET DES OUTRE-MER Liberté Égalité Fraternité
MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA SOUVERAINETÉ ALIMENTAIRE Liberté Égalité Fraternité
TRAJECTOIRE OUTRE MER 5.0

Pilotes scientifiques de l'étude : Julien Demenois, Alain Albrecht, Vincent Blanfort, Jean-Marc Blazy

Experts scientifiques principaux : Ivonne Acosta-Alba, Angel Avadí, Anthony Benoist, Julien Demenois, Mathieu Vigne, Maëva Miralles-Bruneau, Antoine Versini

Coordination du projet : Julien Demenois

Contacts :
Julien Demenois : julien.demenois@cirad.fr
Alain Albrecht : alain.albrecht@ird.fr
Vincent Blanfort : vincent.blanfort@cirad.fr
Jean-Marc Blazy : jean-marc.blazy@inrae.fr

Contact scientifique de ce rapport :
Antoine Versini : antoine.versini@cirad.fr

Le présent document constitue la version provisoire d'une partie de la synthèse technique et scientifique de l'étude sollicitée par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), convention n°2003C0034.

Pour citer ce rapport :
Ivonne Acosta-Alba, Angel Avadí, Anthony Benoist, Julien Demenois, Mathieu Vigne, Maëva Miralles-Bruneau, Antoine Versini, 2022. **État des lieux de l'applicabilité et recommandations pour l'adaptation des Méthodes Grandes Cultures et Carbon Agri du Label « Bas-Carbone » au territoire réunionnais** dans le projet **« 4 pour 1 000 » Outre-mer : Stocker du carbone dans les sols agricoles et forestiers ultra-marins : état des connaissances et synergies avec la Trajectoire 5.0 à La Guadeloupe, La Martinique, en Guyane, à La Réunion, à Mayotte, à Saint-Martin et à Saint-Barthélemy**. ADEME, Cirad, INRAE, IRD, 44 p + annexes.
https://agritrop.cirad.fr/604368/

Index

Index 3
Liste des Tableaux 5
Liste de Figures 7
Glossaire 8
1. Description de la commande ADEME 9
2. Rappel de principes généraux du Label « Bas-Carbone » 10
2.1. Cadre normatif et définitions principales 10
2.2. Réduction des émissions : cœur du label 10
2.3. Méthodes de comptabilisation 10
3. Considérations générales pour la transposition des Méthodes LBC à l'Outre-mer 12
3.1. Bénéfices attendus dans le contexte de l'Outre-mer 12
3.2. Critères d'éligibilité des projets en Outre-mer 13
3.3. Périmètre d'application et de comptabilisation dans l'Outre-mer 14
3.3.1. Activités et limites des systèmes 14
3.3.2. Émissions couvertes par les deux Méthodes 15
3.4. Leviers de réduction des émissions ou de stockage de carbone dans le sol 15
3.4.1. Synthèse d'adaptabilité des leviers des deux méthodes 15
3.4.2. Leviers de réduction des émissions pour la canne à sucre à La Réunion 17
3.4.3. Leviers de réduction des émissions pour l'élevage à La Réunion 21
3.5. Durée du projet 25
3.6. Scénario de référence 25
3.7. Proposition de consortiums pour la rédaction de méthodes canne à sucre et élevage à La Réunion 26
4. Analyse critique de l'estimation des émissions des gaz à effet de serre 27
4.1. Processus biophysiques à prendre en considération 27
4.2. Variabilité des facteurs d'émissions dans le contexte réunionnais 27
4.3. Calcul et modélisation des réductions des émissions 31
4.4. Références et données nécessaires pour le RE et suivi du projet 33
4.5. Outils de diagnostic 34
5. Analyse critique de l'estimation du stockage de carbone dans les sols 37
5.1. Prise en compte du stockage de C dans les sols par les méthodes Grandes Cultures et Carbon Agri 37
5.2. Modèles de simulation testés en conditions ultramarines : Morgwanik, AMG et RothC 37
5.3. Présentation du jeu de données réunionnais 38

5.4. Constitution d'une base tropicale d'estimation des entrées dans le sol du C des cultures 38
5.5. Performance des trois modèles 39
6. Recommandations opérationnelles 42
7. Références 43
8. Annexes 45
8.1. Réductions d'Émissions potentiels et leviers communs aux deux méthodes LBC GC et Carbon Agri 45
8.2. Réductions d'Émissions potentiels et leviers qui pourraient s'articuler entre les deux méthodes LBC GC et Carbon Agri 46
8.3. Réductions d'Émissions potentiels et leviers exclusifs à la méthode Carbon Agri 46

Liste des Tableaux

Tableau 1 Surface agricole et surface totale des Départements Outre-mer 12

Tableau 2 Types de production occupant la SAU des Départements d'Outre-mer 13

Tableau 3 Critères d'éligibilité des méthodes Label « Bas-Carbone » Grandes Cultures et Carbon Agri 13

Tableau 4 Cultures concernées par le Label « Bas-Carbone » Grandes Cultures (LBC GC) 14

Tableau 7. Synthèse de la transposabilité des leviers de réductions des émissions de la méthode du Label « Bas-Carbone » Grandes Cultures. 16

Tableau 8 Transposabilité du levier du LBC GC à La Réunion pour la canne à sucre : Réduire la dose d'azote minéral apportée sur le système de culture 17

Tableau 9 Transposabilité du levier du LBC GC à La Réunion pour la canne à sucre : Améliorer l'efficacité de l'azote apporté et valorisé par la plante en limitant les pertes 18

Tableau 10 Transposabilité du levier du LBC GC à La Réunion pour la canne à sucre : Introduction des légumineuses ou autres cultures 18

Tableau 11 Transposabilité du levier du LBC GC à La Réunion pour la canne à sucre : Diminution des émissions de GES associées aux combustibles fossiles 19

Tableau 12 Transposabilité du levier du LBC GC à La Réunion pour la canne à sucre : stockage de carbone dans le sol 19

Tableau 13 Transposabilité du levier du LBC GC à La Réunion pour la canne à sucre : diminution des émissions de GES en aval de l'exploitation 20

Tableau 15 Transposabilité du levier présenté dans Carbon Agri : Réduire la dose d'azote minéral apportée sur le système de culture 21

Tableau 16 Transposabilité du levier du Carbon Agri à La Réunion pour la prairie : Améliorer l'efficacité de l'azote apporté et valorisé par la plante en limitant les pertes 21

Tableau 17 Transposabilité du levier du Carbon Agri à La Réunion pour la prairie : Introduire des légumineuses fixatrices d'azote dans la rotation 22

Tableau 18 • Transposabilité du levier du Carbon Agri à La Réunion pour la prairie Diminution des émissions de GES associées aux combustibles fossiles 22

Tableau 19 Transposabilité du levier du Carbon Agri à La Réunion pour prairie : Améliorer l'efficacité de l'azote apporté et valorisé par la plante en limitant les pertes 22

Tableau 20 Transposabilité du levier du Carbon Agri à La Réunion pour la prairie: Le stockage de carbone dans le sol 23

Tableau 21 Transposabilité du levier du Carbon Agri à La Réunion pour la prairie : Gestion des infrastructures agro écologiques 23

Tableau 22 Transposabilité du levier du Carbon Agri à La Réunion pour la prairie: Gestion des déjections animales 23

Tableau 23 Transposabilité du levier du Carbon Agri à La Réunion pour la prairie : Gestion du troupeau 24

Tableau 24 Transposabilité du levier du Carbon Agri à La Réunion pour la prairie : Alimentation du troupeau 24

Tableau 26 Comparatif des mesures des émissions azotées et l'application des facteurs d'émissions par les méthode IPCC (Tier 1), Agribalyse et (Indigo-N) *Incluent NH_3 et NOx, sans distinction 30

Tableau 27 Calculs des réductions d'émission de Gaz à Effet de Serre en amont de l'exploitation 31

Tableau 28 Calculs des réductions d'émission de Gaz à Effet de Serre pour le poste Fertilisation et le chaulage 32

Tableau 29 Calculs des réductions d'émission de Gaz à Effet de Serre des combustibles en amont (fabrication) et sur l'utilisation de l'exploitation 32

Tableau 30 Calculs des réductions d'émission de Gaz à Effet de Serre en aval de l'exploitation 33

Tableau 31 Données et paramètres nécessaires pour le calcul et validation des RE 34

Tableau 32 Synthèse des outils disponibles pour l'évaluation du bilan carbone des exploitations agricoles et d'élevage 36

Tableau 38 Réductions d'Émissions potentiels et leviers communs aux deux méthodes LBC GC et Carbon Agri 46

Tableau 39 Réductions d'Émissions potentiels et leviers qui pourraient s'articuler entre les deux méthodes LBC GC et Carbon Agri 46

Tableau 40 Réductions d'Émissions potentiels et leviers exclusifs à la méthode Carbon Agri46

Liste de Figures

Figure 1 Périmètres des activités des méthodes LBC Grandes Cultures et Carbon Agri 14
Figure 2 Périmètre des réduction des émissions couvertes selon les méthodes LBC GC et Carbon Agri 15
Figure 3 Carte type des contexte climatiques correspondant au catégories de l'IPCC 28
Figure 4 Force prédictive des trois modèles sur l'ensemble du jeu de données réunionnais. 39
Figure 5 Erreur des trois modèles au cours du temps sur l'ensemble du jeu de données réunionnais. 39
Figure 6 Force prédictive de Morgwanik par défaut (A), en forçant les entrées de C par les cultures (B), en forçant les entrées de C par les MAFOR (C). 40
Figure 7 Contribution des fertilisants organiques au stockage de C dans les 15 premiers centimètres du sol pour trois sites de prairie (LYC : arénosol, SED & SIC : andosols). Les apports de lisier bovin sont représentés en vert et de compost de fumier bovin en jaune. Les points représentent des mesures et les courbes des simulations avec AMG. 40
Figure 8 Qualité de prédiction du taux d'évolution du carbone des sols avec les modèles MorGwanik, AMG et RothC et avec l'approche IPCC pour des modalités minérales (en rouge) et organiques (en vert) de fertilisation. 41

Glossaire

Ces définitions proviennent de l'arrêté ministériel du 28 novembre 2018 et ses mises à jour, définissant le référentiel du Label « Bas-Carbone »

Additionnalité : Les leviers ou actions mis en place doivent s'additionner à une situation de référence, si les pratiques sont déjà optimisées, il n'y a pas de différentiel donc pas de labellisation.

Émissions directes : Émissions qui ont lieu sur l'exploitation.

Émissions indirectes : Émissions qui ont lieu en amont ou en aval de l'exploitation ou lors de la fabrication des intrants ou transport.

Réductions d'émissions : Ce terme désigne indifféremment des quantités de gaz à effet de serre (GES) dont l'émission a été évitée ou des quantités de GES séquestrées.

Scénario de référence spécifique: Le scénario de référence est établi spécifiquement pour un projet, dont il permet de décrire précisément les effets. La construction du scénario de référence et la démonstration de l'additionnalité sont alors conduites en suivant les spécifications de la méthode.

Scénario de référence générique : Dans le cas où il n'est pas possible d'établir un scénario de référence spécifique à un projet, le scénario de référence est établi de façon générique pour un type de projets (selon les moyennes ou tendances locales, régionales ou nationales).

1. Description de la commande ADEME

Le présent travail a été mené dans le cadre de l'Etude « 4 pour 1000 » Outre Mer - Stocker du carbone dans les sols agricoles et forestiers ultra-marins - État des connaissances et synergies avec la Trajectoire 5.0 à La Guadeloupe, La Martinique, en Guyane, à La Réunion, à Mayotte, à Saint-Martin et à Saint-Barthélemy. Le projet est financé par l'ADEME, coordonné par le Cirad et mené avec l'INRAE et l'IRD. L'objectif général du projet est de contribuer à la mise en œuvre, par les acteurs agricoles et forestiers des territoires ultra-marins, de pratiques agricoles et forestières contribuant à l'atténuation et à l'adaptation aux effets du changement climatique et aux objectifs de la Trajectoire 5.0 à travers le stockage de carbone dans les sols.

L'Etude « 4 pour 1000 » Outre-mer s'attache à synthétiser les données existantes sur l'état des stocks de carbone dans les sols, l'effet des changements d'usages des terres et des pratiques agricoles et forestières sur ces stocks et à identifier les tendances d'évolution de ces stocks dans les contextes socio-économiques et politiques des différents territoires ultra-marins.

Dans ce contexte, la question de la mise en œuvre des pratiques favorables au stockage de carbone dans les sols par les agriculteurs, les éleveurs ou les forestiers tient une place importante. Les dispositifs d'incitation économique sont vus comme un outil pouvant favoriser la mise en œuvre de pratiques bénéfiques au stockage de carbone dans le sol. De tels dispositifs incitatifs peuvent notamment cibler la certification de produits élaborés conformément à cahier des charges incluant de telles pratiques, ou bien viser la certification de crédit carbone via le stockage de carbone dans le sol (Demenois et al. 2022).

En France métropolitaine, les 2 types de dispositifs, volontaires, existent. Le Label « Bas-Carbone » (LBC), mis en place par le ministère de la Transition Écologique fin 2018, a notamment pour objectifs de contribuer aux engagements climat de la France en participant au financement de projets positifs pour le climat et de faciliter la mise en relation des porteurs de projet et des financeurs en signalant les entreprises souhaitant financer des projets en particulier dans les secteurs agricoles ou forestiers. La certification de projets par le Label « Bas-Carbone » s'appuie sur la mise en œuvre d'une méthodologie permettant d'évaluer l'impact climatique du projet et ses co-bénéfices. A ce jour, 6 méthodologies existent pour le secteur agricole[1] (7 en cours d'évaluation) et 3 existent dans le secteur forestier (4 en cours d'évaluation) mais aucune n'est applicable en l'état dans les territoires ultra-marins.

L'objectif de cette étude est ainsi d'analyser les modalités de transposition des méthodologies du Label « Bas-Carbone » dans le contexte des territoires ultra-marins. Le travail s'est focalisé sur 2 méthodologies applicables en métropole : la méthode relative aux grandes cultures développée par Arvalis et celle relative à l'élevage bovin développée par l'IDELE. Le choix s'est porté sur ces 2 méthodes, celles-ci pouvant potentiellement intéresser une part importante de la surface agricole utile des territoires ultra-marins (canne à sucre pour les grandes cultures et prairies pour l'élevage). Le focus géographique a été mis sur La Réunion mais les recommandations formulées se veulent extrapolables au-delà de ce territoire. A noter qu'un travail d'extension à l'Outre-mer de l'application d'une méthodologie forestière est en cours par l'Office National des Forêts (ONF) et le Centre National de la Propriété Forestière (CNPF).

[1] Méthodes existantes octobre 2022 : Grandes Cultures, Élevages bovins et grandes cultures (Carbon Agri), Arboriculture plantation de verger, Haies Version 2, SOBAC'ECOTMM – Gestion des intrants, Ecométhane. Méthodes en cours d'évaluation Légumineuses, Carbon Agri V2 (ovins et caprins), Porcs, Viticulture, Plantes à parfum et Microméthanisation.

2. Rappel de principes généraux du Label « Bas-Carbone »

2.1. Cadre normatif et définitions principales

Dans l'objectif de réduire les émissions nationales, le ministère de la Transition écologique a créé en 2018, le Label « Bas-Carbone ». Ce label cherche à « *favoriser l'émergence de projets additionnels de réductions d'émissions de gaz à effet de serre (GES) par la mise en place d'un cadre de suivi, de notification et de vérification des émissions de GES* ». La diminution des émissions de gaz à effet se ferait par la valorisation des réductions d'émissions (RE) additionnelles réalisées par toute personne morale ou physique, dans divers secteurs d'activités par rapport à un scénario de référence. Ces RE sont dites, additionnelles car elles doivent aller au-delà des pratiques courantes et de la réglementation en cours. De même, le projet qui décrit les changements des activités évaluées, est dit additionnel, seulement si la labellisation du projet est la seule voie qui permet l'adoption des changements envisagés. Après être vérifiées et reconnues, les RE sont inscrites dans le registre dédié et peuvent être attribuées à une entreprise finançant le projet et souhaitant compenser ses émissions sur une base volontaire.

2.2. Réduction des émissions : cœur du label

Dans l'arrêté ministériel du LBC, les RE désignent indifféremment des émissions de gaz à effet de serre (GES) évitées ou des quantités de GES séquestrées. Les RE sont de deux types selon leur nature : directes et indirectes. Les ***RE directes*** correspondent à l'évitement d'émissions qui auraient été générées par des sources couvertes par le périmètre du Projet ou à la « *séquestration d'émissions par des puits sur ce périmètre* »[2]. Les RE directes peuvent comporter des réductions effectuées et des réductions anticipées. Les RE anticipées sont vérifiées et reconnues en amont ou pendant leur réalisation, par comparaison à un scénario de référence, alors que les RE effectuées sont des réductions d'émissions dont la vérification et la reconnaissance ont lieu après leur réalisation.

Les ***RE indirectes*** sont les réductions d'émissions liées à la production de l'énergie importée par les activités ou les réductions d'émissions liées en amont ou en aval, de la chaîne de valeur complète des activités couvertes[3].

2.3. Méthodes de comptabilisation

Les règles de suivi et de comptabilisation des émissions des projets et les règles de calcul des réductions sont détaillées dans des méthodes qui doivent être approuvées et certifiées par Ministère de la Transition Écologique (Direction générale de l'énergie et du climat et le groupe Scientifique et technique du LBC)[4]. Leur structure (décrite dans la section B de l'Annexe de l'arrêté) doit décrire chacun des éléments suivants :

1. Le champ d'application et le type de projets concernés
2. Les critères de labellisation d'un projet et les informations spécifiques (supplémentaires à celles prévues au présent arrêté) à fournir dans le cadre de la procédure de labellisation :
    - Le bénéfice attendu des projets pour l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre, la nature des réductions d'émissions et les mécanismes qui conduisent à celles-ci ;
    - les critères d'éligibilité des projets ;
    - le scénario de référence ;

[2] Elles sont communément appelées « émissions du scope 1 ».
[3] Elles correspondent aux émissions communément appelées « émissions du scope 2 ou du scope 3 ».
[4] En liaison avec tout autre service de l'Etat ou experts compétents.

- les éventuels rabais à appliquer et la façon dont ils s'articulent entre eux ;
- les critères permettant de démontrer l'additionnalité du projet, y compris les modalités d'appréciation et de prise en compte de l'effet d'aubaine ;
- la méthode d'évaluation des réductions d'émissions, en cohérence avec les méthodes reconnues et les normes existantes ; elle précise la nature des données utilisées et notamment, le cas échéant, les valeurs par défaut ;
- le type de réductions d'émissions (réductions d'émissions directes, effectuées ou anticipées, et réductions indirectes) auquel sont affectées les sources de réductions d'émissions, y compris dans le cas des réductions anticipées, les « trajectoires vraisemblables » ;
- les caractéristiques du projet à suivre pendant sa durée de validité (paramètres, unité, fréquence de suivi, source à utiliser, valeur appliquée, procédure de mesure) ;
- une grille d'évaluation des impacts potentiels des projets et des co-bénéfices potentiels des projets, qui sont les éventuels impacts positifs des projets sur d'autres enjeux que la réduction des émissions de GES (environnementaux, sociaux ou économiques).

Comme mentionné précédemment, il n'existe pas, pour le moment, des méthodes adaptées au contexte ultra-marin. Deux méthodes, Label « Bas-Carbone » Grandes Cultures (LBC GC) et Carbon Agri ont été choisies pour explorer leur potentielle transposabilité sur le territoire de La Réunion. Le LBC GC serait appliqué à la canne à sucre et Carbon Agri à l'élevage bovin et les prairies. Les principaux points des méthodes sont analysés dans les sections suivantes.

3. Considérations générales pour la transposition des Méthodes LBC à l'Outre-mer

Dans cette section, le potentiel de transposabilité du cadre de fonctionnement des deux méthodes est exploré: les bénéfices attendus, les critères d'éligibilité, le périmètre des projets et les modes de comptabilisation, les leviers de réduction d'émissions de GES et de stockage de carbone dans les sols, la durée du projet, les scénarios de référence ainsi qu'une proposition de consortium pour la rédaction de méthodes LBC réunionnaises.

3.1. Bénéfices attendus dans le contexte de l'Outre-mer

La France a émis en 2021 plus de 418 millions de tonnes de gaz à effet de serre, en équivalent CO_2 (CITEPA, 2022), avec des engagements à atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050. D'après l'inventaire national des GES (CCNUCC et CEE-NU) établi par le CITEPA, les émissions GES territoires situés en Outre-mer sont passées entre 1990 à 2019, de 10 743 kt CO_2eq/an à 20 504 kt CO_2eq /an, soit une augmentation de 91% (Citepa, décembre 2021 - Format Outre-mer). Cet inventaire des GES, ne tient pas compte des émissions importées, ce qui pourrait alourdir ce bilan. La création du LBC Outre-mer pourrait aider à limiter cette augmentation, voire à participer à la compensation des émissions de GES d'autres secteurs et accompagner la promotion des pratiques moins émettrices qui permettent les RE.

Pour analyser les possibilités de transposabilité des méthodes LBC, il est important de rappeler le contexte particulier d'Outre-mer et les différences importantes entre ces territoires. Outre la distance qui impose un approvisionnement des intrants et une exportation des produits plus difficiles, l'utilisation du sol et la proportion des surfaces agricoles sont distinctes au territoire métropolitain. La superficie totale des DOM est de 8,9 millions d'hectares, soit 14% de la surface nationale et 1% de la SAU en France (Agreste, 2021a). D'après l'INSEE (2021), la part de la SAU dans le territoire en France métropolitaine représente 52%, alors que dans les départements d'Outre-mer (DOM), elle ne représente que 2% (Tableau 1). Les sols naturels (forêts, landes, cours d'eau, lacs, marais, mangroves) occupaient en 2018 près 60 % du territoire en Guadeloupe, en Martinique, à La Réunion, à Mayotte et 90% en Guyane (Agreste, 2021a).

Surface par département	Guadeloupe	Martinique	Guyane	La Réunion	Mayotte
Surface agricole utilisée du département (ha)	49 909	31 303	32 524	47 940	20 000
Surface totale du département (ha)	162 961	109 999	8 353 400	252 000	37 394
Surface agricole dans le département (%)	31%	28%	0.39%	19%	53%

Tableau 1 Surface agricole et surface totale des Départements Outre-mer

Les activités agricoles sont très différentes dans ces départements (Tableau 2). En Guadeloupe et à La Réunion les cultures industrielles couvrent 75% et 81% des terres arables (notamment occupées par la canne à sucre). En Martinique et en Guyane les cultures fruitières occupent près de 20% et les légumes près de 61% en Guyane et 34% Mayotte.

Types de production	Guadeloupe	Martinique	Guyane	La Réunion	Mayotte
Terres arables	35%	32%	40%	60%	86%
dont cultures industrielles	*75%*	*41%*	*1%*	*81%*	*1%*
dont légumes et tubercules	*11%*	*20%*	*61%*	*8%*	*34%*
dont jachères	*12%*	*34%*	*15%*	*3%*	*64%*
Surface toujours en herbe des exploitations (STH)	18%	23%	42%	22%	0%
Vergers, bananeraies	6%	19%	17%	6%	14%
Surface agricole utilisée des exploitations agricoles	60%	74%	100%	87%	100%

Tableau 2 Types de production occupant la SAU des Départements d'Outre-mer

La taille des exploitations est aussi un facteur important de différentiation. Avec une moyenne 69 ha en métropole contre 5 ha dans les DOM (Agreste, 2021a), la capacité d'investissement et de mécanisation ne sont pas les mêmes. Par ailleurs, les conditions socio-économiques et la disponibilité des services d'appui font que le suivi des pratiques est assez faible, tout comme la disponibilité des données. Le manque de références sur les besoins de cultures et le comportement de l'azote dans le sol en contexte tropical avait déjà été constaté, dans un projet qui s'intéressait aux performances énergétiques des exploitations agricoles dans les DOM (Laboubee et al., 2013). Ces mêmes auteurs, rappellent la difficulté et le peu de disponibilité de données qui permettent de raisonner les pratiques de fertilisation, tels que les résultats des analyses de sol, à cause des coûts élevés et l'absence des laboratoires (Laboubee et al., 2013).

3.2. Critères d'éligibilité des projets en Outre-mer

Cette partie précise les conditions d'éligibilité nécessaires à remplir par les porteurs de projet. Le Tableau 3 reprend ces exigences.

Grandes Cultures	Carbon Agri	Commentaires pour la transposition
Exploitation ayant un atelier de grandes cultures	L'éligibilité conditionnée au maintien ou à l'accroissement du stock de carbone	-
Outils certifié conforme (par un organisme de certification indépendant) pour les calculs de RE	Stocks de carbone initiaux et finaux seront, soit calculés via l'outil CAP'2ER®	Les limites prévisibles sont le manque d'experts et les coûts que la vérification engendre si l'auditeur vient d'ailleurs. Besoin d'identifier des modèles et outils adaptés
Respect de la normative environnementale : • Directive Nitrates (plafond 170 kgN / ha de SAU) • Conditionnalité de la PAC • Respect des quotas d'eau d'irrigation le cas échéant		La directive nitrates n'applique pas de seuils en Outre-mer. Un travail sur les réglementations en cours dans ces territoires pourrait permettre d'inclure les exigences dans ce contexte
RE émissions stockage + RE > 0		Peut être reprise

Tableau 3 Critères d'éligibilité des méthodes Label « Bas-Carbone » Grandes Cultures et Carbon Agri

3.3. Périmètre d'application et de comptabilisation dans l'Outre-mer

Dans les méthodes analysées, la section « Périmètre d'application » reprend la description des activités qui sont considérées et l'étendue des possibles RE à comptabiliser sur l'exploitation ainsi qu'en amont et en aval.

3.3.1. Activités et limites des systèmes

Le périmètre pour la canne à La Réunion comprend le système de culture mais pas de bâtiments de stockage, généralement absents des exploitations. Il serait intéressant d'explorer la possibilité d'adapter le LBC GC à d'autres cultures répandues dans les DOM qui présentent des besoins en stockage comme la banane ou les légumes. Les cultures actuellement couvertes par le LBC GC sont listées dans le Tableau 4.

<table>
<tr><th>Céréales</th><th>Protéagineux légumineuses à graines</th><th>Cultures industrielles mécanisées</th><th>Oléagineux</th><th>Cultures fourragères assolées</th><th>Autres</th></tr>
<tr><td>Blé tendre</td><td>Soja</td><td>Betterave</td><td>Colza</td><td rowspan="2">Prairie temporaire</td><td rowspan="5">Production de semences et de plants</td></tr>
<tr><td>Blé dur</td><td>Pois</td><td>Pomme-de-terre</td><td>Tournesol</td></tr>
<tr><td>Orge d'hiver</td><td>Féverole</td><td>Lin fibre</td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2">Luzerne</td></tr>
<tr><td>Orge de printemps</td><td>Lupin</td><td>Chanvre fibre</td></tr>
<tr><td>Maïs</td><td>Lentille</td><td rowspan="2">Légumes de plein champ</td><td>Lin oléagineux</td><td></td></tr>
<tr><td>Sorgho</td><td>Pois chiche</td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

Tableau 4 Cultures concernées par le Label « Bas-Carbone » Grandes Cultures (LBC GC)

Les activités comprises dans Carbon Agri pour l'Elevage sont les systèmes de culture, les bâtiments de stockage et l'atelier bovin : *« La présente méthode est destinée aux exploitations agricoles localisées en France comprenant au moins un atelier bovin (lait ou viande) ou un atelier de grandes cultures ».*

Dans les deux méthodes, il y a des éléments communs, comme l'atelier grandes cultures sont pris en compte, d'où l'importance de bien identifier le périmètre et les limites entre les deux (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

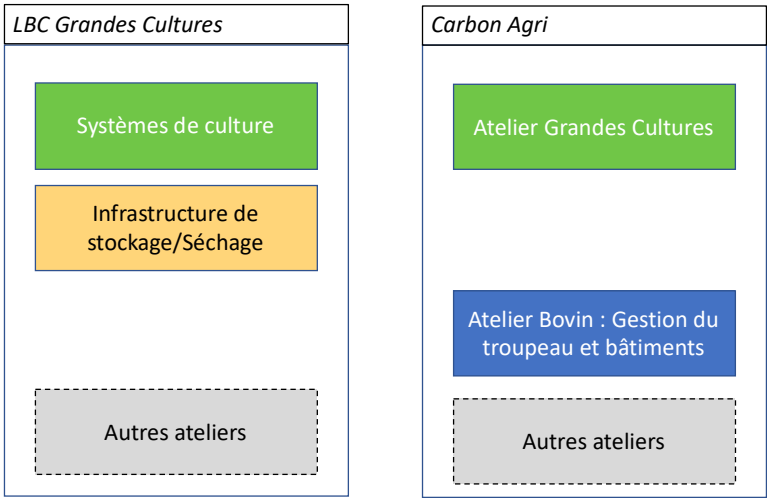

Figure 1 Périmètres des activités des méthodes LBC Grandes Cultures et Carbon Agri

3.3.2. Émissions couvertes par les deux Méthodes

Conformément au référentiel du Label Bas-Carbone dans les deux méthodes, « *les réductions d'émissions se produisant en amont de l'exploitation sont comptabilisées séparément de manière à différentier les réductions d'émissions «empreinte» des réductions d'émissions «vérifiées » »*. Les émissions indirectes ont lieu en amont (pour la méthode Carbon Agri) et aussi en aval (pour la méthode LBC GC) (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

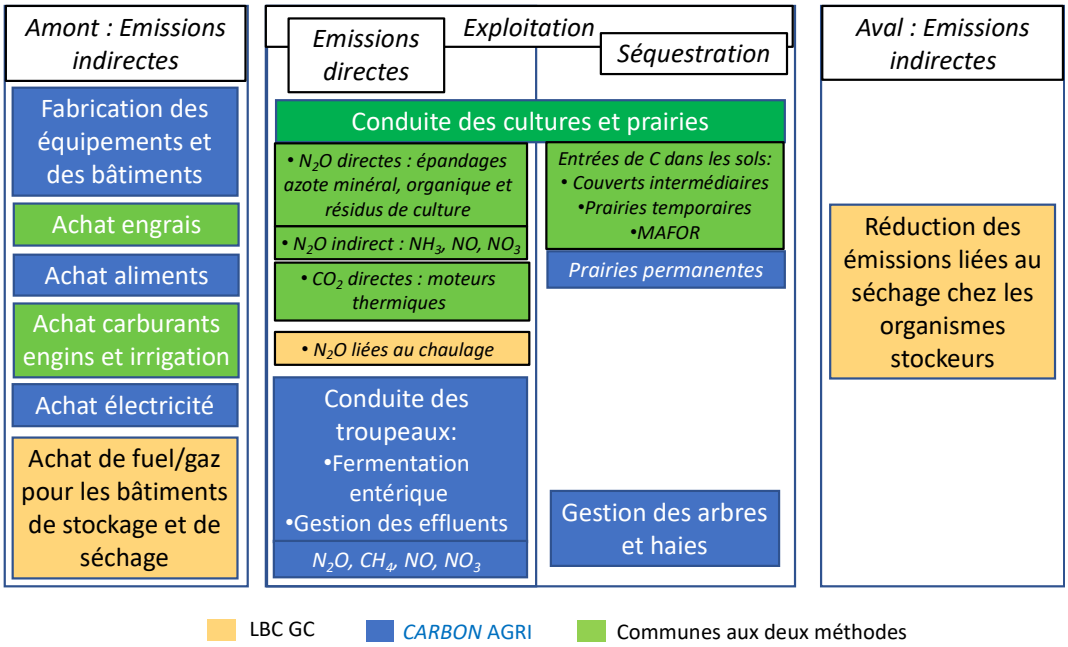

Figure 2 Périmètre des réduction des émissions couvertes selon les méthodes LBC GC et Carbon Agri

Dans l'adaptation de ces méthodes, le périmètre des émissions couverte resterait le même, avec la différenciation des émissions vérifiées ou directes, qui comprennent des réductions d'émission qui ont lieu sur l'exploitation et incluent les gains liés aux diminutions des émissions gazeuses et les gains liés à la séquestration de carbone. Les émissions indirectes considérées ont lieu en amont et en aval.

3.4. Leviers de réduction des émissions ou de stockage de carbone dans le sol

3.4.1. Synthèse d'adaptabilité des leviers des deux méthodes

Le Tableau 5 présente une synthèse de l'adaptabilité des leviers communs dans les méthodes LBC GC à La Réunion. La faisabilité de la transposabilité de chaque levier a été qualifiée par une échelle de couleur : en vert les leviers possibles, en rouge les leviers inadaptés à la réalité de terrain donc non applicables, et en bleu les leviers qui pourraient être développés avec davantage de travaux.

Pour chacune des méthodes, les leviers sont revus en détail, rappelant les travaux de recherches en cours et les freins éventuels, d'abord pour la méthode GC puis pour Carbon Agri.

Stratégie	Levier	Pratique	Transposabilité à La Réunion		Freins
			GC	Carbon Agri	
Diminution des émissions de GES associées à la fertilisation azotée	Réduire la dose d'azote minéral apportée	Ajustement du calcul de dose	o	o	Technicité et manque de formation
		Prise en compte des conditions climatiques pour les apports	o	P	Manque des données météo précises
		Utilisation d'outils de pilotage	*n*	o	*GC:* Manque de méthodes *CarbonAgri:* Diffusion et formation des conseillers et agriculteurs
		Modulation intraparcellaire	*n*	*n*	*GC* : Mécanisation nécessaire non disponible
	Améliorer l'efficacité de l'azote apporté et valorisé – Agir sur la nitrification / dénitrification	Utilisation d'inhibiteurs de nitrification	*n*		Incompatibilité pratiques actuelles
		Chaulage des sols acides (objectif 6.8)	*n*		Incompatibilité tropiques : Sols majoritairement acides (<5.5)
		Utilisation de formes d'engrais moins émettrices	P		Impossibilité d'importer du nitrate à la réunion (économique et normatif)
		Enfouissement des apports organiques et minéraux	P	o	*GC:* Mécanisation nécessaire peu disponible *CarbonAgri* : Communication et formation des agriculteurs
	Introduire des légumineuses	Introduire des légumineuses ou des cultures/variétés à plus faible besoin en N	P	o	*GC* : Faisable selon cultures, canne sucrière n'est pas compatible, énergétique oui *CarbonAgri* : Communication et formation des agriculteurs
Diminution des émissions de GES associées aux combustibles fossiles	Réduire combustibles fossiles des engins et l'irrigation	Réduire le nombre de passage des engins agricoles	P	o	*GC* : Incompatibilité pratiques actuelles (très peu méchanisées) *CarbonAgri* : Sous équipement des agriculteurs Intérêt des agriculteurs pour les gros tracteurs.
		Réduire la consommation d'énergie des engins	o	o	*GC* : Selon type de machinerie *CarbonAgri* : Focaliser la déefiscalisation sur autre chose que l'achat de nouveaux tracteurs.
		Réduire la consommation d'énergie du système d'irrigation	P	*n*	Irrigation par gravité pour la canne
	Séchage et stockage	Réduire la consommation d'énergie du séchage et/ou de stockage	*n*	*n*	La canne n'est pas sechée et l'électricité industrielle produite avec les résidus
Diminution des GES aval	Réduire humidité récolte	Récolte de cultures à plus faible teneur en humidité pour réduire les consommations	*n*		Incompatibilité avec le procédé
	Réduire les consommations d'électricité du bloc traite (pré-refroidisseur de lait, récupérateur de chaleur, ventilation du bloc traite...)			P	Manque d'appui technique
Stockage de carbone dans le sol	Augmenter la quantité de biomasse restituée		P	*n*	Incompatibilité pratiques actuelles, impact négatif sur les rendements
	Augmentation des restitutions par les résidus de cultures		o	*n*	Technicité
	Augmentation des apports de matières amendantes ou fertilisantes d'origine résiduaire (MAFOR) sur l'exploitation		o	P	Economique pour transport des effluents
	Insertion et allongement des prairies temporaires et artificielles (luzerne par exemple) dans les rotations		*n*	*n*	Incompatibilité avec la culture (rotations de 10 ans)

Tableau 5. Synthèse de la transposabilité des leviers de réductions des émissions de la méthode du Label « Bas-Carbone » Grandes Cultures. En vert les leviers possibles (O), en rouge inadapté (N), en bleu envisageables (P) mais incompatibles avec la réalité du terrain actuellement et en gris les situations à approfondir

Les tableaux présentés dans partie suivante reprennent la liste des leviers mobilisables par la méthode LBC GC. Des informations sur le potentiel de RE sont également données, leur transposabilité, l'état actuel et les freins potentiels sont abordés.

3.4.2. Leviers de réduction des émissions pour la canne à sucre à La Réunion

Pour faciliter la lecture, dans les tableaux, la convention de couleur est la même que précédemment : en vert (**et en gras**) les leviers possibles, en *rouge* (*et en italique*) les leviers inadaptés à la réalité de terrain donc non applicables, et en bleu les leviers qui pourraient être développés avec d'avantage des travaux.

Diminution des émissions de GES associées à la fertilisation azotée

→ Réduire la dose d'azote minéral apportée sur le système de culture

Leviers	Transposabilité à la Canne à sucre à La Réunion	État actuel des recherches	Freins
1. Ajustement du calcul de dose prévisionnelle grâce à une meilleure prise en compte des apports et des objectifs de rendements réalistes	**1. Utilisation renforcée de l'outil d'aide à la Fertilisation SERDAF[5] qui tient compte des fournitures du sol, des rendements espérés et de l'efficience des fertilisants.**	Outil en cours de rénovation (CIRAD, eRcane)	Technicité, formation, communication
2. Prise en compte des conditions climatiques pour le déclenchement des apports	**2. Les documents d'accompagnement préconisent des apports en période pluvieuse ou la mise en marche de l'irrigation afin de limiter la volatilisation ammoniacale.**	Conseil actuel (RITA Canne)	Prédiction du temps impossible, Irrigation non généralisée
3. Utilisation d'outils de pilotage	3. A ce jour, il n'existe pas d'outil d'ajustement de la dose fertilisante reposant sur une mesure du statut nutritionnel de la canne.	Actions de recherche ponctuelles (eRCane, CIRAD)	Fiabilité méthode
4. Modulation intra-parcellaire	4. Cette option requiert de la mécanisation, des outils de mesure de variation de la production ou de la qualité des sols dont nous ne disposons pas à La Réunion.	Non étudié	Mécanisation

*Tableau 6 Transposabilité du levier du LBC GC à La Réunion pour la canne à sucre : Réduire la dose d'azote minéral apportée sur le système de culture (***en vert les leviers possibles,** en bleu peuvent être développés, en *rouge inadaptés).*

[5] SERDAF : Système expert réunionnais d'aide à la fertilisation

→ Améliorer l'efficacité de l'azote apporté et valorisé par la plante en limitant la nitrification/dénitrification, la volatilisation et la lixiviation – Agir sur la nitrification / dénitrification

Leviers	Transposabilité à la Canne à sucre à La Réunion	État actuel des recherches	Freins
1. Utilisation d'inhibiteurs de nitrification	*1. La problématique principale est la volatilisation ammoniacale du fait de la forme uréique apporté dans la totalité des engrais destinés à la canne. Inhiber la nitrification revient à renforcer la volatilisation, ce type de produit a été testé par le CTICS à La Réunion et ne donne pas de résultat satisfaisant.*	A l'étude (CTICS)	
2. Chaulage des sols acides (uniquement pour les pHeau initial < 6.8 et dans l'objectif d'atteindre une valeur de 6.8)	2. L'augmentation du pH permet de réduire la production de N_2O au bénéfice du N_2 mais a par ailleurs tendance à augmenter la volatilisation qui est un problème majeur en canne à La Réunion. Par ailleurs, la valeur de 6.8 est inatteignable pour la grande majorité des sols réunionnais (50% des sols canniers réunionnais ont un pH < 5.5).	Non étudié	
3. Utilisation de formes d'engrais moins émettrices (réduction de l'utilisation des formes uréiques, inhibiteurs d'uréase)	**3. L'ammonitrate donne de meilleurs résultats que l'urée mais est peu importé à La Réunion pour des raisons de sécurité. Les inhibiteurs d'uréase ou les engrais enrobées sont des options agronomiquement prometteuses.**	A l'étude (CTICS)	Importation pour Ammonitrate, coût pour inhibiteur uréase
4. Enfouissement des apports organiques et minéraux	**4. Permettrait effectivement d'abattre la volatilisation mais peu de mécanisation à La Réunion et difficile de rentrer dans les parcelles dans les parcelles de canne après 3 mois de croissance. Une option non évoquée dans le document est la fertirrigation peu pratiquée mais prometteuse sur le papier.**	A l'étude (CTICS, eRcane)	Mécanisation

*Tableau 7 Transposabilité du levier du LBC GC à La Réunion pour la canne à sucre : Améliorer l'efficacité de l'azote apporté et valorisé par la plante en limitant les pertes (**en vert les leviers possibles,** en bleu peuvent être développés, en rouge inadaptés).*

→ Introduire des légumineuses fixatrices d'azote dans la rotation (en culture principale, associée ou intermédiaire) ou des cultures/variétés à plus faible besoin en azote

Leviers	Transposabilité à la Canne à sucre à La Réunion	État actuel des recherches	Freins
Introduire des légumineuses fixatrices d'azote dans la rotation Introduire des cultures/variétés à plus faible besoin en azote	**L'introduction de légumineuses peut uniquement se faire en culture associée en intercalaire mais on observe une légère tendance à la baisse des rendements de canne. En rotation, cela ne peut se faire qu'une fois tous les 10 ans (moyenne de la fréquence de replantation à La Réunion).** Si on reste sur un modèle à finalité sucrière difficile de remplacer la canne, mais si on part un jour sur une finalité énergétique il existe d'autres modèles biologiques peut-être moins gourmands en N.	A l'étude (CIRAD, eRcane)	Main d'œuvre

Tableau 8 Transposabilité du levier du LBC GC à La Réunion pour la canne à sucre : Introduction des légumineuses ou autres cultures *(**en vert les leviers possibles,** en bleu peuvent être développés, en rouge inadaptés).*

→ *La diminution des émissions de GES associées aux combustibles fossiles*

Leviers	Transposabilité à la Canne à sucre à La Réunion	État actuel des recherches
1. Réduire le nombre de passage des engins agricoles sur le système de culture (simplification du travail du sol, passage au semis direct…)	*1. Pour plus de la moitié des parcelles de l'île, il n'y a pas passage d'engin à part la récolte pour emmener les cannes à l'usine. Dans les plus mécanisés, il y a peu de passages environ 3-4 (1-2 herbicide, 1 engrais, 1 récolte), difficile d'en réduire le nombre*	Non étudié
2. Réduire la consommation d'énergie des engins (écoconduite, banc d'essais moteurs, motorisation électrique, autoguidage RTK)	2. **Eco conduite est valable pour les 40% de parcelles mécanisées.** En 2021, la production d'électricité à La Réunion repose à 72 % sur des énergies fossiles (charbon, pétrole) (oer, 2022), et cela doit être pris en considération car la méthode GC néglige l'impact de l'électricité en métropole du fait du nucléaire.	Non étudié
3. Réduire la consommation d'énergie du système d'irrigation (choix de matériel moins gourmands en énergie)	*3. Irrigation gravitaire dans la grande majorité des cas. Le facteur d'émission du m³ d'eau est donc très bas à La Réunion.*	Non étudié

Tableau 9 Transposabilité du levier du LBC GC à La Réunion pour la canne à sucre : Diminution des émissions de GES associées aux combustibles fossiles *(***en vert les leviers possibles,** en bleu peuvent être développés, en *rouge inadaptés).*

Le stockage de carbone dans le sol

Leviers	Transposabilité à la Canne à sucre à La Réunion	État actuel des recherches	Freins
Augmenter la quantité de biomasse restituée par les couverts végétaux, par exemple par l'intégration ou extension des couverts végétaux dans les rotations	L'intégration de couverts végétaux intermédiaires types CIPAN est impossible en canne à sucre. L'incorporation de légumineuses en intercalaire ou une gestion plus tolérante de certaines adventices pourrait permettre de faire rentrer du C mais un impact négatif sur la production de canne et donc sur les entrées de C serait en contrepartie attendu.	A l'étude (CIRAD, eRcane)	Technicité
Augmentation des restitutions par les résidus de cultures (restitution des résidus, augmentation de la production de biomasse par unité de surface)	**Les modes de coupes de la canne influencent fortement la quantité de paille de canne restituée au champ. Il y a marge de progression importante sur les rendements en canne à La Réunion (Christina et al. 2021). L'augmentation des biomasses produites et restituées est donc envisageable. Une particularité de la canne est que la réponse à la fertilisation azotée se traduit par une réduction de biomasse racinaire, ce qui pourrait avoir des répercussions sur l'évolution des stocks de C à terme (Versini et al. 2020).**	A l'étude (CIRAD, eRcane)	Technicité
Augmentation des apports de matières amendantes ou fertilisantes d'origine résiduaire (MAFOR) sur l'exploitation (effluents d'élevage, composts, déchets urbains et industriels, digestats …)	**La Réunion produit beaucoup d'effluents d'élevage qui peuvent être valorisés en agriculture et constituer un retour de matière organique au champ. Les MAFOR les plus carbonées retournent actuellement plutôt en maraichage. Les effluents d'élevage revenant sur canne sont principalement des lisiers de porc et des fientes de pondeuses dont le potentiel de stockage est limité. Les MAFOR d'origine urbaine (boues de STEP) représentent des tonnages marginaux et posent des questions d'acceptabilité clients. Les écumes de sucrerie retournent déjà la canne à sucre.**	A l'étude (CIRAD, eRcane)	Financement du transport et de l'épandage, mécanisation
Insertion et allongement des prairies temporaires et artificielles (luzerne par exemple) dans les rotations	*La seule possibilité serait d'introduire une culture en rotation tous les 10 ans.*	A l'étude (CIRAD, eRcane)	Pas d'intérêt économique

Tableau 10 Transposabilité du levier du LBC GC à La Réunion pour la canne à sucre : stockage de carbone dans le sol *(***en vert les leviers possibles,** en bleu peuvent être développés, en *rouge inadaptés).*

La diminution des émissions de GES en aval de l'exploitation

Levier	Transposabilité à la Canne à sucre à La Réunion	Etat actuel
Augmenter la quantité de biomasse restituée par les couverts végétaux, par exemple par l'intégration ou extension des couverts végétaux dans les rotations	*La canne n'est pas séchée avant l'arrivée en industrie sucrière (dessiccation post-coupe au champ = perte en sucre) et il n'y a pas d'organismes stockeurs.*	Non étudié

Tableau 11 Transposabilité du levier du LBC GC à La Réunion pour la canne à sucre : diminution des émissions de GES en aval de l'exploitation (*en rouge inadaptés).*

3.4.3. Leviers de réduction des émissions pour l'élevage à La Réunion

Diminution des émissions de GES associées à la fertilisation azotée

→ Réduire la dose d'azote minéral apportée

Leviers	Transposabilité à l'élevage à La Réunion	Etat actuel des recherches	Freins
1. Ajustement du calcul de dose prévisionnelle grâce à une meilleure prise en compte des apports et des objectifs de rendements réalistes	**L'ajustement de la dose est rare et il existe donc une marge de manœuvre à ce niveau. Il existe un OAD en format Excel permettant d'ajuster le calcul de la dose, qui peut être amélioré dans l'avenir. La généralisation de l'indice de nutrition azoté est également une piste envisageable pour mieux ajuster la dose à apporter.**	Outil en cours de développement (CIRAD, ARP)	Manque de formation des conseillers et des agriculteurs au raisonnement de la fertilisation
2. Prise en compte des conditions climatiques pour le déclenchement des apports	Actuellement pas pris en compte	Non étudié	Manque de références
3. Utilisation d'outils de pilotage	**Des indices de nutrition sont utilisés en parallèle de l'analyse de sol pour le conseil. Il y a une marge de manœuvre non négligeable pour diffuser ces approches, et faire un lien entre les deux.**	Travail en cours au CIRAD pour estimer des indices de nutrition azoté par Spectrométrie en Proche Infra-Rouge, et devrait être opérationnel dans les 2-3 ans à venir.	Diffusion et formation des conseillers et agriculteurs
4. Modulation intra parcellaire	*Cette option requiert de la mécanisation, des outils de mesure de variation de la production ou de la qualité des sols dont nous ne disposons pas à La Réunion.*	Non étudié	Mécanisation et investissement

Tableau 12 Transposabilité du levier présenté dans Carbon Agri : Réduire la dose d'azote minéral apportée sur le système de culture **En vert les leviers possibles**, *en rouge inadapté, en* bleu envisageables *mais à approfondir*

→ Améliorer l'efficacité de l'azote apporté et valorisé par la plante en limitant la nitrification/dénitrification, la volatilisation et la lixiviation – Agir sur la nitrification

Leviers	Transposabilité à l'élevage à La Réunion	Etat actuel	Freins
1. Utilisation d'inhibiteurs de nitrification	On ne sait pas en prairie à La Réunion si le risque principal est la volatilisation ou la lixiviation et donc s'il faut limiter la nitrification.	Non étudié	
2. Chaulage des sols acides (uniquement pour les pHeau initial < 6.8 et dans l'objectif d'atteindre une valeur de 6.8)	*La valeur de 6.8 est inatteignable pour la grande majorité des sols de prairie (75% des sols des prairies réunionnais ont un pH < 6 et 25 % < 5,1).*	Non étudié	
3. Utilisation de formes d'engrais moins émettrices (réduction de l'utilisation des formes uréiques, inhibiteurs d'uréase)		Non étudié	
4. Enfouissement des apports organiques et minéraux	***Permettrait effectivement d'abattre la volatilisation mais peu de mécanisation à La Réunion et difficile de rentrer dans les parcelles dans les parcelles de canne après 3 mois de croissance. Une option non évoquée dans le document est la fertirrigation peu pratiquée mais prometteuse sur le papier.***	A l'étude (CTICS, eRcane)	Mécanisation

Tableau 13 Transposabilité du levier du Carbon Agri à La Réunion pour la prairie : Améliorer l'efficacité de l'azote apporté et valorisé par la plante en limitant les pertes. **En vert les leviers possibles**, *en rouge inadapté, en* bleu envisageables *mais à approfondir*

→ Introduire des légumineuses fixatrices d'azote dans la rotation (en culture principale, associée ou intermédiaire) ou des cultures/variétés à plus faible besoin en azote

Leviers	Transposabilité à l'élevage à La Réunion	Etat actuel	Freins
Introduire des légumineuses fixatrices d'azote dans la rotation Introduire des cultures/variétés à plus faible besoin en azote	**Les prairies sont majoritairement composées de graminées. Les légumineuses sont peu présentes, car rarement semées, et ont des difficultés à se maintenir en raison du pH du sol, de la présence de graminées agressives, et de la gestion des prairie (exploitation haute, tardive ...). Il y a une marge de progrès importante.**	Actions de transfert en cours avec le projet CapProteines (ARP et Armeflhor). Projet d'essais associations au CIRAD SELMET	Communication et formation des agriculteurs

Tableau 14 Transposabilité du levier du Carbon Agri à La Réunion pour la prairie : Introduire des légumineuses fixatrices d'azote dans la rotation . **En vert les leviers possibles**, *en rouge inadapté, en* bleu envisageables *mais à approfondir*

La diminution des émissions de GES associées aux combustibles fossiles

Leviers	Transposabilité à l'élevage à La Réunion	Etat actuel
1. Réduire le nombre de passage des engins agricoles sur le système de culture (simplification du travail du sol, passage au semis direct…)	**Un développement du sur-semis est possible (essai ARP, SICALAIT)**	Actions de transfert en cours
2. Réduire la consommation d'énergie des engins (écoconduite, banc d'essais moteurs, motorisation électrique, autoguidage RTK)	**Eco conduite, adéquation puissance tracteur / travaux (surfaces, …)** En 2021, la production d'électricité à La Réunion repose à 72 % sur des énergies fossiles (charbon, pétrole) (oer, 2022), et cela doit être pris en considération car la méthode Carbon Agri néglige l'impact de l'électricité en métropole du fait du nucléaire.	Pas d'action dans ce sens actuellement. Les tracteurs sont souvent surdimensionnés par rapport à l'usage
3. Réduire la consommation d'énergie du système d'irrigation (choix de matériel moins gourmands en énergie)	*Peu de système d'irrigation sur prairies, et irrigation gravitaire lorsque c'est le cas*	

Tableau 15 • Transposabilité du levier du Carbon Agri à La Réunion pour la prairie Diminution des émissions de GES associées aux combustibles fossiles. **En vert les leviers possibles**, *en rouge inadapté, en* bleu envisageables *mais à approfondir*

Réduire la consommation de combustibles fossiles associée aux engins et à l'irrigation (fioul, GNR, gaz)

Leviers	Transposabilité à l'élevage à La Réunion	Etat actuel
1. Réduire la consommation d'énergie du système de séchage et/ou de stockage de l'exploitation	*Le séchage du foin se fait au champ*	
2. Réduire les consommations d'électricité du bloc traite (pré-refroidisseur de lait, récupérateur de chaleur, ventilation du bloc traite,...)	Peu utilisé à La Réunion, pourrait être développé. En 2021, la production d'électricité à La Réunion repose à 72 % sur des énergies fossiles (charbon, pétrole) (oer, 2022). La Réunion. Cela doit être pris en considération car la méthode Carbon Agri néglige l'électricité en métropole car nucléaire.	Non étudié

Tableau 16 Transposabilité du levier du Carbon Agri à La Réunion pour prairie : Améliorer l'efficacité de l'azote apporté et valorisé par la plante en limitant les pertes. **En vert les leviers possibles**, *en rouge inadapté, en* bleu envisageables *mais à approfondir*

Le stockage de carbone dans le sol

Leviers	Transposabilité à l'élevage à La Réunion	*Etat actuel*	*Freins*
Augmenter la quantité de biomasse restituée par les couverts végétaux, par exemple par l'intégration ou extension des couverts végétaux dans les rotations	Prairies semi-permanentes voire permanentes donc couverture et restitution déjà élevées. Il n'y a ni culture de rotation ni culture associées.	Pratiques de fertilisation à l'étude (CIRAD Selmet & ARP)	Manque de formation et de suivi des agriculteurs. Système d'aides qui peuvent être un frein à "l'intensification"
Augmentation des restitutions par les résidus de cultures (restitution des résidus, augmentation de la production de biomasse par unité de surface)	*Prairies semi-permanentes voire permanentes donc couverture et restitution déjà élevées. Cependant, prairies globalement sous-valorisée. Un gain de productivité de 10 à 30% est possible via une meilleure gestion (fertilisation, pH sol, chargement, frequence d'exploitation, report de stock …)*	Pratiques de fertilisation à l'étude (CIRAD Selmet & ARP)	Manque de formation et de suivi des agriculteurs. Système d'aides qui peuvent être un frein à "l'intensification"
Augmentation des apports de matières amendantes ou fertilisantes d'origine résiduaire (MAFOR) sur l'exploitation (effluents d'élevage, composts, déchets urbains et industriels, digestats …)	*MAFOR déjà largement valorisés sur prairies, étude sur co-composatge déchets verts / Effluents*	Compostage à l'étude	Equipement des élevages en matériel d'épandage pour fumier et compost
Insertion et allongement des prairies temporaires et artificielles (luzerne par exemple) dans les rotations	Prairies semi-permanentes voire permanentes		

Tableau 17 Transposabilité du levier du Carbon Agri à La Réunion pour la prairie: Le stockage de carbone dans le sol **En vert les leviers possibles**, *en rouge inadapté, en* bleu envisageables *mais à approfondir*

Gestion des infrastructures agro écologiques

Levier	Transposabilité à l'élevage à La Réunion	État actuel	Freins
Implanter et amélioration de la gestion des haies sur l'exploitation	*Peu de haies sur les exploitations*		Coût d'installation et entretien, peu d'intérêt pour les agriculteurs
Développement de l'agroforesterie (introduction d'arbres dans les parcelles de prairies ou surfaces cultivées)	**Parcours arboré volailles. Déjà en place dans certains systèmes bovin extensif (forêt tamarins, etc.)**	Peu d'arbres présents dans les prairies	Convaincre les agriculteurs, et les accompagner

Tableau 18 Transposabilité du levier du Carbon Agri à La Réunion pour la prairie : • Gestion des infrastructures agro écologiques. **En vert les leviers possibles**, *en rouge inadapté, en* bleu envisageables *mais à approfondir*

Gestion des déjections animales

Leviers	Transposabilité à l'élevage à La Réunion	Freins
Augmenter la durée de pâturage	*Vache allaitantes à 100% du temps au pâturage. Marge de progression possible pour vaches laitières et petits ruminants, qui sont majoritairement au bâtiment*	Modèles d'élevage des filières
Augmentation de la fréquence de raclage des déjections		
Améliorer les modes d'épandage des déjections (pendillards, enfouisseurs)	**Essai épandeur de lisier à pendillard par l'ARP (en lien avec la réduction de la volatilisation de l'azote)**	Équipement des agriculteurs
Couverture de fosse de stockage	**Peu de fosse sont actuellement couvertes**	Coût et manque d'intérêt

Tableau 19 Transposabilité du levier du Carbon Agri à La Réunion pour la prairie: Gestion des déjections animales. **En vert les leviers possibles**, *en rouge inadapté, en* bleu envisageables *mais à approfondir*

Gestion du troupeau

Leviers	**Transposabilité à l'élevage à La Réunion**	**Etat actuel**	**Freins**
Améliorer la conduite sanitaire (réduire la proportion de mammite, optimiser l'équipement de traite, réduire le nombre de boiteries,...)	**Oui, gros axe de progrès**		Sensibilisation, formation, suivi et accompagnement des éleveurs
Améliorer le logement des animaux, la ventilation des bâtiments,...pour optimiser la production par vache	**Gros axe de progrès, missions d'institut techniques qui n'ont pas connus de suites. Coopératives bovines qui commencent à s'interroger**	Travaux RITA sur logement	Formation des encadrant tech + coût
Optimiser l'âge au 1er vêlage et la longévité des vaches	**Marge de progrès possible. Enquête Selmet/gds qui a montré que les fondamentaux n'étaient pas respectés**	1 thèse CIRAD Selmet sur le sujet	Sensibilisation, formation, suivi et accompagnement des éleveurs
Améliorer les performances génétiques (potentiel de production, réduction du méthane entérique)	*Les filières ne sont pas intéressées*		Priorités filières
Optimiser les effectifs de génisses de renouvellement (allonger la longévité des vaches, sexage,...)	*Les filières ne sont pas intéressées*		Priorités filières

Tableau 20 Transposabilité du levier du Carbon Agri à La Réunion pour la prairie : Gestion du troupeau. **En vert les leviers possibles**, *en rouge inadapté, en* bleu envisageables *mais à approfondir*

Alimentation du troupeau

Leviers	**Transposabilité à l'élevage à La Réunion**	**Etat actuel**	**Freins**
Augmentation de la qualité des fourrages (stade de récolte, stockage)	**Amélioration générale des pratiques de gestion et de récolte des fourrages (production en dessous des rendements théoriques). Qualité du fourrage qui peut encore être améliorée, en travaillant sur les stades d'exploitations et les conditions de récolte et de stockage**		Sensibilisation, formation, suivi et accompagnement des éleveurs
Optimisation de la teneur en azote de la ration		Non étudié	
Optimiser la consommation de concentrés (en lien avec la valorisation de la ration ajustée aux besoins des animaux, la qualité des fourrages et le type de fourrages)	**Contexte insulaire donc fortement dépendant des importations. Niveaux de concentrés élevés dans les rations monogastriques et ruminants. Il s'agit d'un gros axe de travail, notamment en bovin lait et engraissement bovin et petits ruminants**		Changement de pratiques et de systèmes d'élevage
Remplacement du tourteau de soja par du tourteau de colza	*Contexte insulaire donc fortement dépendant des importations. Peu d'impact sur les émissions indirectes liées à l'importation*		
Augmentation de l'autonomie protéique	**Contexte insulaire donc fortement dépendant des importations. Trouver des ressources locales de protéines**	Projet Cap protéines en cours, et projets d'essais association Selmet. Point qui peut être amélioré en introduisant des légumineuses	Changement de pratiques
Ajout de lipides dans la ration			

Tableau 21 Transposabilité du levier du Carbon Agri à La Réunion pour la prairie : Alimentation du troupeau. **En vert les leviers possibles**, *en rouge inadapté, en* bleu envisageables *mais à approfondir*

3.5. Durée du projet

Dans Carbon Agri : *Le terme « projet » fait référence aux projets additionnels de réduction des émissions de GES labellisés Label « Bas-Carbone ». Un projet est labellisé pour une durée de cinq ans renouvelable.*

Dans LBC GC *: « La durée d'un Projet est fixée à 5 ans. Cette durée est un compromis permettant de limiter l'incertitude des méthodes utilisées pour évaluer le stockage de carbone dans les sols, tout en préservant une projection raisonnable des modifications des ateliers de grandes cultures par les Porteurs de Projets. Les Projets sont renouvelables sans limite, mais sous réserve de redémontrer l'additionnalité des leviers mis en œuvre et de validation par l'Autorité compétente ».*

La canne à sucre et la prairie permanente sont des cultures semi-pérennes qui sont récoltés annuellement pour la première et bimensuellement pour la seconde, et replantées dans les deux cas tous les 10 ans environ. Les cycles de repousses sont comparables les uns aux autres à l'image des cultures annuelles mais l'année de plantation est atypique et peut être à l'origine d'émissions importantes.

Afin de garantir la praticité de la méthode pour les porteurs de projet et de limiter le risque d'erreur associé à la modélisation du stockage de carbone dans les sols, la durée du projet devra être adaptée pour la canne à sucre et la prairie permanente à une période de 5 ans ; en considérant l'année de plantation, avec un diagnostic initial et un suivi tous les ans.

3.6. Scénario de référence

Le scénario de référence permet de démontrer que la baisse des émissions de GES et/ou le stockage de carbone dans les sols sont bien le fait du Projet et ne correspondent pas à la tendance actuelle. Seules les réductions d'émissions allant au-delà du scénario de référence sont reconnues dans le cadre du Label « Bas-Carbone ». Les Porteurs de Projet doivent donc définir et justifier un scénario de référence auquel les Projets seront comparés. Celui-ci peut être spécifique s'il est possible de qualifier avec précision l'état initial de l'exploitation en début de Projet, sur la base de données historiques. Lorsque cela n'est pas possible, le scénario de référence peut être générique et calculé sur la base des données moyennes régionales ou à dire d'expert.

Un scénario de référence spécifique en canne à sucre pourrait être basé sur la réalisation d'un diagnostic initial établi à partir des pratiques culturales moyennes des 3 années précédant le début du Projet. Une période de 3 années correspond à un compromis entre le risque de choisir une année climatiquement particulière et la possibilité de retracer l'historique de l'itinéraire cultural. Lorsque les données des 3 années d'historique ne sont pas disponibles (par exemple cahier de suivi de culture inexistant, absence de factures, etc..), il faut se reporter au scénario de référence générique.

L'établissement d'un scénario de référence générique se base sur les conduites culturales de référence (fertilisation minérale et organique, rendements, travail du sol…). Des pratiques culturales moyennes se dégagent en canne à sucre et peuvent permettre de calculer un niveau de référence pour les émissions de GES et le stockage de carbone dans les sols. Un itinéraire type comprend ainsi 1 intervention de fertilisation, 3 interventions de désherbage (Agreste 2020) et 1 intervention de récolte. Ces interventions peuvent être entièrement manuelles ou mécanisées et il pourrait donc sembler pertinent de différencier un scénario de référence générique manuel d'un scénario de référence générique mécanisé.

3.7. Proposition de consortiums pour la rédaction de méthodes canne à sucre et élevage à La Réunion

S'inspirant de la démarche adoptée pour la méthode Grandes Cultures, la rédaction de nouvelles méthodes pourrait être structurée par la constitution de consortiums disposant d'un comité de pilotage exécutif d'une part et d'un comité de rédaction d'autre part.

Le comité de pilotage exécutif est le maître d'ouvrage de la rédaction de la méthode, il décide des choix stratégiques et doit s'assurer que la méthode convienne aux porteurs de projets LBC ciblés. Pour la canne à sucre à La Réunion, ce comité pourrait être composé de Tereos, du CTICS (Centre Technique Interprofessionnel de la Canne et du Sucre) et de la Chambre d'Agriculture. Pour l'élevage à La Réunion les membres pourraient être la FRCA (Fédération Régionale des Coopératives agricoles de La Réunion), la Chambre d'agriculture, l'ARP (Association Réunionnaise de Pastoralisme), et éventuellement certaines coopératives (Sicarévia, Sicalait, CPPR - Cooperative Producteurs De Porcs Reunion).

Pour rappel, un porteur de projet LBC peut tout autant être un exploitant agricole (en nom propre ou sous forme sociétaire) qu'un collectif regroupant plusieurs exploitations agricoles.

Le comité de rédaction de la méthode est quant à lui le maître d'œuvre, il est composé d'un comité d'experts rassemblant des scientifiques reconnus pour leur expertise dans les domaines nécessaires à la rédaction de la méthode, ainsi que des représentants d'autres méthodes déjà approuvées ou en cours de rédaction, il consulte un comité d'usagers pour remonter les questions et les propositions des futurs usagers de la méthode. Ce comité pourrait être composé du CIRAD, d'eRcane et d'Arvalis pour la canne-à-sucre à La Réunion et du CIRAD et l'IDELE pour l'élevage à La Réunion.

4. Analyse critique de l'estimation des émissions des gaz à effet de serre

Dans cette section, le bilan des émissions de gaz à effet de serre des Méthodes existantes est discuté au regard des processus biophysiques, des modes de calculs et des références de facteurs d'émissions à considérer dans ces territoires ultramarins.

4.1. Processus biophysiques à prendre en considération

Un facteur clé dans le calcul des RE est le contexte biophysique et les processus qui ont une influence sur les chemins d'impact et les dynamiques d'émissions des GES. Ainsi, les facteurs climatiques (température, pluviométrie), les caractéristiques du sol (texture, pH, taux de matière organique, etc.) et l'occupation du sol sont des facteurs déterminants pour le calcul des émissions au champ, et donc pour une grande partie des leviers de RE. De façon générale, les facteurs d'émissions valables en conditions tropicales sont moins bien renseignés et donc plus incertains que ceux existants en conditions tempérées (Koch & Salou, 2022).

Concernant l'occupation des sols, la dynamique à La Réunion est différente de celle des autres DOM, car si entre 2008 à 2018 dans les Antilles la surface des terres agricoles diminuait (- 1,7%/an), à La Réunion elle augmentait (+0,6%/an) (Agreste, 2021b).

Les caractéristiques du sol jouent aussi un rôle important, raison pour laquelle la nature du sol très volcanique de La Réunion et les sols acides en zone tropical en général, doivent être intégrés dans la méthode, tout comme les limites que cela implique. En effet, les pratiques comme le chaulage vont avoir un résultat différent sur la capacité du sol à stocker le carbone. Par ailleurs, les conditions climatiques tropicales (précipitations importantes et groupées sur une courte saison) et des pentes de 10 % en moyenne sont des facteurs aggravant de l'érosion des sols sur l'île (Lobietti *et al., 2018*). Selon ces auteurs, l'érosion du sol et sa pollution font baisser le potentiel alimentaire de l'île pour les générations futures. Les pratiques agricoles peuvent participer à la limitation de ces phénomènes.

De ce point de vue, la prise en compte de l'érosion, a minima celle associée aux précipitations, reste importante (Albers et al., 2022) et mériterait d'être améliorée avant application à l'Outre-mer.

Un point d'interrogation dans ces contextes insulaires concerne le calcul des émissions indirectes de N_2O liées au phénomène de volatilisation/redéposition qui se fait probablement majoritairement dans les océans. La méthodologie IPCC inclue bien la catégorie « lakes and other waters » mais il est difficile de dire si les processus de production de N_2O suite à la redéposition de NH_3 sont les mêmes en milieux terrestres et marins. Cette préoccupation concerne tous les milieux côtiers mais se trouve exacerbée en contexte insulaire dans lequel la volatilisation est actuellement forte et les surfaces de redéposition principalement marines.

4.2. Variabilité des facteurs d'émissions dans le contexte réunionnais

Comme indiqué précédemment, les facteurs d'émissions en conditions tropicales sont généralement plus incertains, du fait d'un nombre plus réduit de mesures disponibles, par rapport aux facteurs d'émissions disponibles en conditions tempérées. Pour explorer cet aspect dans le cas de La Réunion, des mesures disponibles pour les émissions azotées sur canne à La Réunion ont été mobilisées et comparées avec trois types de modèles classiquement utilisés : IPCC Tier 1 (IPCC, 2019), Agribalyse (Koch & Salou, 2022), et Indigo-N (Bockstaller et al., 2022).

L'application de l'approche IPCC Tier 1 nécessite notamment la détermination des climats selon la typologie IPCC (Figure3).

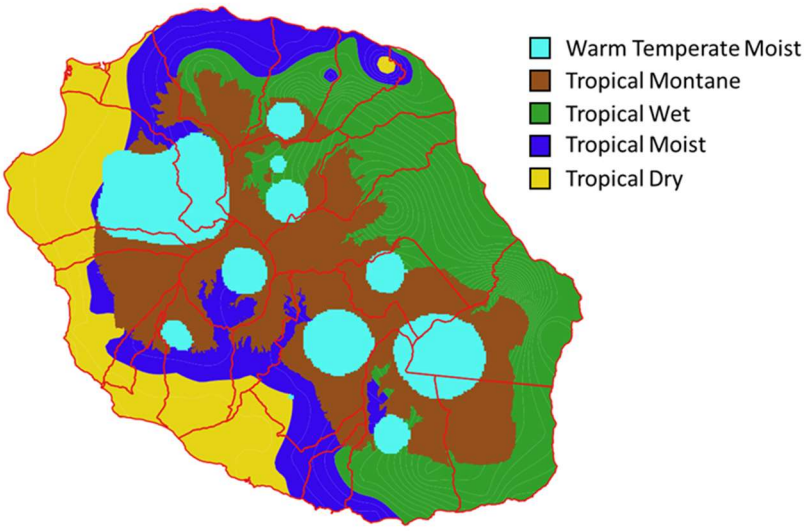

Figure 3 Carte type des contexte climatiques correspondant au catégories de l'IPCC

La comparaison des facteurs d'émissions azotées, obtenus dans différentes conditions de sols et de climats, ainsi que dans le cas de différents types d'apports de fertilisation, est présentée dans le (1) : Le modèle IPCC ne distinguant pas volatilisation sous forme de NH3 ou de Nox, ces facteurs agrègent les deux types d'émissions.

Tableau 22. Les résultats de ce tableau montrent que, lorsque des mesures sont disponibles, il y a une bonne convergence entre modèles et mesures dans le cas des émissions directes de N_2O, notamment pour l'urée. Dans le cas de l'application de lisier de porc et de boues de STEP, cette convergence est partielle, avec une bonne correspondance avec les mesures disponibles pour le modèle Indigo-N dans le cas du lisier de porc, et une bonne correspondance pour le modèle IPCC 2019 Tier 1 / Agribalyse pour les boues de STEP.

Concernant le lessivage sous forme de NO_3 et la volatilisation sous forme de NH_3, mesures et modèles divergent nettement (Avadí et al., 2022), avec des facteurs d'émission issus des modèles systématiquement plus importants que les mesures observées dans le cas du NO_3, et systématiquement plus faibles dans le cas de la volatilisation. Les différences de résultats entre modèles sont également plus marquées pour ces émissions. Toutefois, une analyse plus approfondie serait nécessaire pour mieux comprendre et interpréter ces différences. Pour cela, un nombre plus important de mesures serait nécessaire pour affiner les résultats obtenus et ainsi mieux distinguer la part de différences pouvant être expliquée par la variabilité naturelle de ces émissions, et la part étant due à un écart des modèles par rapport à la réalité.

Un autre phénomène biophysique qui pourrait être mieux pris en considération dans un travail futur pour le calcul des RE, est l'érosion. La terre érodée emporte du carbone. L'érosion des terres est soit mesurée soit estimée à travers des modèles. En contexte ACV/empreinte carbone, des variations de l'équation Universal Soil Loss Equation (USLE) sont souvent utilisées. Par exemple, RUSLE2 (Foster, 2005; Panagos et al., 2015) est utilisée par AGRIBALYSE en tant que USLE (tel que décrit dans Faist Emmenegger et al., 2009), par WFLDB (World Food Life Cycle Assessment Database) et vraisemblablement par ecoinvent à travers son modèle SALCA-SQ (Oberholzer et al., 2006). L'équation USLE/RUSLE (Eq. 1) demande de renseigner des facteurs d'érosivité/érodibilité, disponibles dans la littérature pour les Antilles par

exemple, dans LANCA (Bos et al., 2016) ou sous la forme de produits géolocalisés[6] (Panagos et al., 2017), mais pour le moment, ces facteurs ne sont pas disponibles pour La Réunion.

RUSLE = R * K * CF * LS * P Eq. 1

où

- RUSLE [t/ha*an] = perte moyenne annuelle de sol
- R [MJ*mm/ha*h*an] : facteur d'érosivité par précipitation (liée au ruissellement)
- K [t*ha*h/ha*MJ*mm] : facteurs d'érodibilité du sol
- CF [n/a] : facteur de couverture/gestion de sol
- LS [n/a] : facteur de la longueur et l'inclinaison de la pente
- P [n/a] : facteur de pratique culturelle

Source : (Koch & Salou, 2016; Panagos et al., 2015), y compris des sources pour les facteurs

En outre, pour exprimer la quantité de terre érodée en termes de carbone perdu (car une fraction du stock de SOC dans la couche arable est perdue proportionnellement au taux d'érosion), l'équation (Eq. 2) décrit dans (Lugato et al., 2016) devient très utile, car elle prend en compte un facteur de couverture/gestion de sol (CF) dépendant du type de culture. Des CF pour le monde entier sont retrouvables, par exemple, dans Borrelli et al., (2017).

SOC_érodé = (SOC * (RUSLE / (bulk.dens * profondeur)) * ER * CF) *Eq. 2*

où

- SOC_érodé [t/ha] : quantité de carbone organique du sol érodé par précipitation
- SOC [t] : teneur en carbone organique du sol (au profondeur déterminé)
- RUSLE [t/ha] : quantité de sol érodé par précipitation
- ER [n/a] : facteur d'enrichissement (défaut : 1)
- CF [n/a] : facteur de couverture/gestion de sol (forêts: 0.0001–0.003, prairies / savanes : 0.01-0.15, arbres / arbres fruitiers : 0.15, céréales: 0.1, fibres : 0.28, arbustes : 0.15, racines / tubercules : 0.34) (Borrelli et al., 2017)
- Bulk density [g/cm3] et profondeur de la couche de sol [cm]

Source : (Lugato et al., 2016)

[6] https://www.gissol.fr/donnees/cartes

Canne à sucre à La Réunion				Facteurs d'émission (%N émis / Napporté)				Gammes d'incertitudes (%N émis / Napporté)		
Émission	**Climat**	**Fertilisation**	**Sol**	**EF (mesure)**	**EF (IPCC Tier 1)***	**EF Agribalyse**	**EF (Indigo-N)**	**EF (mesure)**	**EF (IPCC Tier1)***	**EF Agribalyse**
N_2O direct	Wet	Urée	Tous	1.5%	1.6%	1.6%	1.5%	1,2 - 1,8 %	1,3 - 1,9 %	1,3 - 1,9 %
		Lisier de Porc	Tous	1.7%	0.6%	0.6%	1.5%	1,3 - 2,2 %	0,1 - 1,1 %	0,1 - 1,1 %
		Boues de STEP	Tous	0.8%	0.6%	0.6%	1.5%	0,4 - 1,3 %	0,1 - 1,1 %	0,1 - 1,1 %
	Dry	Urée	Tous		0.5%	0.5%	1.5%		0,0 - 1,1 %	0,0 - 1,1 %
		Lisier de Porc	Tous		0.5%	0.5%	1.5%		0,0 - 1,1 %	0,0 - 1,1 %
		Boues de STEP	Tous		0.5%	0.5%	1.5%		0,0 - 1,1 %	0,0 - 1,1 %
NO_3	Wet	Urée	Tous	3.4%	24.0%	24.0%	15.6%		1,0 - 73,0 %	1,0 - 73,0 %
		Lisier de Porc	Tous	1.0%	24.0%	24.0%	5.1%		1,0 - 73,0 %	1,0 - 73,0 %
		Boues de STEP	Tous	4.6%	24.0%	24.0%	56.7%		1,0 - 73,0 %	1,0 - 73,0 %
	Dry	Urée	Tous		24.0%	24.0%	0.0%		1,0 - 73,0 %	1,0 - 73,0 %
		Lisier de Porc	Tous		24.0%	24.0%	0.0%		1,0 - 73,0 %	1,0 - 73,0 %
		Boues de STEP	Tous		24.0%	24.0%	0.0%		1,0 - 73,0 %	1,0 - 73,0 %
NH_3	Wet	Urée	pH <= 7	55.0%	15.0% (1)	13.1%	10.0%		3,0 - 43,0 % (1)	N.C.
			pH > 7		15.0% (1)	13.8%	10.0%		3,0 - 43,0 % (1)	N.C.
		Lisier de Porc	Tous	54.0%	1.0% (1)	18.1%	33.0%		0,0 - 2,0 % (1)	N.C.
		Boues de STEP	Tous	8.0%	1.0% (1)	6.7%	3.0%		0,0 - 2,0 % (1)	N.C.
	Dry	Urée	pH <= 7		15.0% (1)	13.1%	10.0%		3,0 - 43,0 % (1)	N.C.
			pH > 7		15.0% (1)	13.8%	10.0%		3,0 - 43,0 % (1)	N.C.
		Lisier de Porc	Tous		1.0% (1)	18.1%	33.0%		0,0 - 2,0 % (1)	N.C.
		Boues de STEP	Tous		1.0% (1)	6.7%	3.0%		0,0 - 2,0 % (1)	N.C.
NOx	Wet	Urée	pH <= 7		15.0% (1)	1.05%			3,0 - 43,0 % (1)	N.C.
			pH > 7		15.0% (1)	1.05%			3,0 - 43,0 % (1)	N.C.
		Lisier de Porc	Tous		1.0% (1)	0.99%			0,0 - 2,0 % (1)	N.C.
		Boues de STEP	Tous		1.0% (1)	1.13%			0,0 - 2,0 % (1)	N.C.
	Dry	Urée	pH <= 7		15.0% (1)	1.05%			3,0 - 43,0 % (1)	N.C.
			pH > 7		15.0% (1)	1.05%			3,0 - 43,0 % (1)	N.C.
		Lisier de Porc	Tous		1.0% (1)	0.99%			0,0 - 2,0 % (1)	N.C.
		Boues de STEP	Tous		1.0% (1)	1.13%			0,0 - 2,0 % (1)	N.C.
N_2O indirect (volatilisation), en %N émis / N	Wet	Tous	Tous		1.4%	1.4%			1,1 - 1,7 %	1,1 - 1,7 %
	Dry	Tous	Tous		0.5%	0.5%			0,0 - 1,1 %	0,0 - 1,1 %
N_2O indirect (lessivage), %N émis / N lessivé	Tous	Urée	Tous		1.1%	1.1%			0,0 - 2,0 %	0,0 - 2,0 %

(1) : Le modèle IPCC ne distinguant pas volatilisation sous forme de NH3 ou de Nox, ces facteurs agrègent les deux types d'émissions.

*Tableau 22 Comparatif des mesures des émissions azotées et l'application des facteurs d'émissions par les méthode IPCC (Tier 1), Agribalyse et (Indigo-N) *Incluent NH_3 et NOx, sans distinction*

4.3. Calcul et modélisation des réductions des émissions

Les RE directes incluent celles sur le poste de fertilisation et les RE liées aux combustibles utilisés. Les RE indirectes incluent l'amont (fabrication des intrants) et l'aval (séchage et stockage), ainsi que le stockage de C dans le sol.

Dans la méthode LBC-GC, les postes d'émissions considérés dans l'exploitation incluent pour les fertilisants les émissions directes et indirectes. Ces dernières incluent les émissions de N_2O par lixiviation et volatilisation. Le Tableau 23 donne le détail des calculs des réductions d'émission de GES pour la fertilisation et le chaulage (émissions directes et indirectes) et les précisions pour adapter ces paramètres pour le contexte ultra-marin. Le Tableau 24 recense les RE en amont de l'exploitation. Les combustibles ont été analysés séparément avec des émissions en amont et sur l'exploitation présentés dans le Tableau 25. Les RE en aval de l'exploitation (Tableau 26) sont peu adaptables à La Réunion pour la canne à sucre et La Réunion, mais ces RE sont commentées car elles pourraient être utiles pour d'autres types de systèmes. L'adaptabilité des RE et les calculs liés au stockage font l'objet d'une section à part (Section 5).

Postes	Calcul des Réductions d'Émissions des Gaz à Effet de Serre	Précision pour adaptation au contexte ultra-marin
GES amont	GES_amont_min : émissions fabrication des engrais minéraux et des amendements calcaires, de leurs matières premières et à leur transport, exprimées en kgeqCO2 + émissions associées à la fabrication des engrais organiques (Pour les coproduits avec une valeur commerciale comme les composts ou digestats, pas de prise en compte de la fabrication pour les déjections animales, considérées comme des déchets), le transport, le traitement et le stockage, sur le système de culture i en année k, exprimées en kgeqCO2. Les émissions entre le lieu de production et la parcelle agricole d'épandage ne sont pas intégrés	Difficulté de vérification des quantités de fertilisants utilisées. Engrais minéraux importés. La notion de déchet pour les déjections animales n'est pas valable à La Réunion où les déjections sont valorisées. Le transport dans les DOM/TOM est très importante et ne peut pas être négligée. Manque l'inclusion en amont de l'électricité utilisée car contrairement à la métropole l'électricité est carbonée

Tableau 23 Calculs des réductions d'émission de Gaz à Effet de Serre en amont de l'exploitation

Postes	Calcul des Réductions d'Émissions des Gaz à Effet de Serre	Précision pour adaptation au contexte ultra-marin
Fertilisation	Réductions d'émissions de gaz à effet de serre directes et indirectes permises par la mise en œuvre des leviers « Fertilisation minérale et organique », « Amendements basiques » et « Combustibles fossiles »	
	GES amont + GES aval + GES fertilisation exploitation (N2O directes + indirectes)/surface *1/1 année * durée de référence	Facteurs de caractérisation à adapter, PCC 2019: EF1 (La Réunion); wet climate. TABLE 11.3 dans IPCC 2019, vol 4 ch 1
N_2O direct	(qté N engrais min * inhibiteurs * **EF1(min 0,016kg/N_2O-N/kgN)** + qté N fertilisants org * inhibiteurs *N qté N résidus culture + N minéralisé)* **EF1(org 0,006kg/N_2O-N/kgN)** + **C chaulage**	EF1 OK; problème chaulage pour les sols tropicaux
N_2O indirect	Nvolatilisation + N lixiviation; N volatilisation (QtéNmin + Qtéinhibiteur) * Fraction volatilisée min et QtéNorg + Qtéinhibiteur) * Fraction volatilisée org) * **EF4 0,01kgN-N_2O**/kgNH3-N + NO2-N volatilisé	**EF4: plutôt EF4 0,014 kgN-N2O/kgNH3-N + NO2-N** volatilisé
N2O_lixiviation i,k	(QtéN_min + QtéN_inhib + QN_org + QN_résidus + QN_minéralisé) * Frac_LESS **0.24kgNlessivé**/kgNapporté ou outil **Comifer** * EF5 0.011kg N2O-N/kgN lessivé	La grille COMIFER est pour la France métropolitaine ... Estimation lixiviation en milieu tropical ? FRAC_less présente une forteincertitude : 0.01 - 0.73. IPCC considère comme zone humide tropicale là où précipitation annuelle >1000 mm, mais rien n'est indiqué par rapport à l'irrigation
CO2_directes	l'application de produits à base de CaCO3 * **t_C produit restant dans le sol 0.75** * FC_C-CaCO3 * FC_CO2-C	Seulement appliqué si chaulage de sols acides, **valeur à vérifier**. L'**urée très utilisée à La Réunion devrait aussi être intégrée comme dans Agribalyse**

Tableau 24 Calculs des réductions d'émission de Gaz à Effet de Serre pour le poste Fertilisation et le chaulage

Postes	Calcul des Réductions d'Émissions des Gaz à Effet de Serre	Précision pour adaptation au contexte ultra-marin
Combustibles	Combustibles fossiles » pour les engins et l'irrigation (l'utilisation et la fabrication des combustibles fossiles utilisées sur l'atelier grandes cultures de l'exploitation). Le calcul des émissions de gaz à effet de serre associées au carburant et à l'irrigation du système de culture i, exprimées en t éq. CO2	Dans la méthode GC il y a un Rabais de 5% appliqué si estimations ou travaux réalisés par un tiers. En contraste avec les pratiques en métropole, il y a peu de travaux mécanisés, et peu de documents de suivi.

Tableau 25 Calculs des réductions d'émission de Gaz à Effet de Serre des combustibles en amont (fabrication) et sur l'utilisation de l'exploitation

Postes	Calcul des Réductions d'Émissions des Gaz à Effet de Serre	Précision pour adaptation au contexte ultra-marin
RE Aval	Réductions d'émissions de gaz à effet de serre directes et indirectes permises par les réductions de consommation d'énergie pour le séchage et stockage des productions à la ferme. Changement du type d'énergie mobilisé pour le séchage ou le stockage des productions à la ferme (ex : passage d'un séchoir à gaz à un séchoir à biomasse). Le calcul de ce terme est optionnel et devra être réalisé uniquement si l'exploitation met en œuvre des leviers pour réduire la consommation d'énergie fossile	Non valable à La Réunion car pas de stockage ni séchage des installations de séchage et/ou de stockage des productions de l'atelier grandes cultures (maïs, pomme de terre…), à savoir : Récolte des productions, qui nécessitent un séchage, pour atteindre une plus faible teneur en humidité.
	Réductions d'émissions de gaz à effet de serre indirectes liées à l'aval de l'exploitation agricole, entre la situation Projet et le scénario de référence. Dans la première version, les RE à l'aval de la ferme (réduction du séchage au niveau des organismes stockeurs notamment). Dans le cas où RE aval < 0 alors, RE aval est considéré comme nul.	La prochaine mise à jour de prévoit : la valorisation de biomasses agricoles dans les biomatériaux et la production de matières riches en protéines à destination de l'alimentation animale A La Réunion la canne est utilisée pour produire de l'électricité dans les usines, il est important de développer la modélisation de ce levier

Tableau 26 Calculs des réductions d'émission de Gaz à Effet de Serre en aval de l'exploitation

4.4. Références et données nécessaires pour le RE et suivi du projet

Les méthodes, en plus de reprendre les éléments nécessaires et les références disponibles pour établir les RE, proposent des outils de calcul et des documents pour établir les scénarios spécifiques et permettre le suivi et la validation du projet. Lorsque ces données ne sont pas disponibles, un scénario de référence générique peut alors être produit, ce qui provoque un rabais sur les RE. Ce rabais cherche à refléter les incertitudes et à favoriser l'utilisation des données spécifiques des exploitations. Dans le contexte des DOM, face au manque de données et la difficulté à établir des scénarios de références spécifiques, la question se pose sur la proposition des scénarios génériques définis par des experts avec l'obligation d'additionnalité, le respect des réglementations et une mise en place d'outils de suivi. Le Tableau 27 reprend les modèles, sources de données et documents de suivis proposés dans la méthode GC et des commentaires sur leur transposition à La Réunion.

Postes Réduction des Émissions	Modèles/Paramètres	Source données	BDD et documents justificatifs	Commentaires transposition
Fertilisation	Variables climatiques : Rayonnement, précipitation, température : AMG (annuelles), STICS (journalières), AqYield_NC (MAELIA) (journalières)	Météo France	Météo France	Ces modèles ne sont pas adaptés aux conditions d'Outre-mer
	Pluviométrie, Température, Stock de carbone initial. Données sol : pH, % argiles, CaCO3, ratio C/N; ; Biomasse des cultures intermédiaires et des cultures principales; Quantité de carbone des MAFOR et sa stabilité	Météo France à minima échelle départementale, bases de données sols, quantités épandues et composition	SOL ou Mulder et al., 2016; Base Sol Arvalis, Typterres, SoilGrids ou GSM,BDAT (Base D'Analyse de Terres) de	Ces BDD n'ont pas toujours des données pour les DOM/TOM, quelle granulométrie?
	Rendements, Espèces, Succession culturale, Couverts	Statistique agricole annuelle,	Enquêtes de pratiques, BDD MERCI2 Cahier fertilisation, factures semences	La disponibilité des données de suivi est très variable parmi les DOM, possibilité d'avoir pour certains un historique de l'exploitation mais difficilement du département. Quelle situation de référence choisir ? Est-ce possible avoir une situation générique dans ce cas ?
	Type produit fertilisant, date d'apport, date d'enfouissement, composition produit	Statistique agricole annuelle, Enquêtes de pratiques, Fiches MRT MAFOR 2014	Cahier fertilisation, factures engrais et fertilisant	
Combustibles	Irrigation (quantité, dates d'apport)	Statistique agricole annuelle, Enquêtes de pratiques,	Cahier irrigation, factures consommation eau	
	Consommation réelle carburant	GESTIM+ et Agribalyse	Factures, cahier des travaux	

Tableau 27 Données et paramètres nécessaires pour le calcul et validation des RE

4.5. Outils de diagnostic

Les outils de diagnostic sont un autre point clé pour le label, car chaque label propose une méthodologie et un outil qui doit répondre à certains critères. La méthode LBC GC propose une conformité méthodologique pour le calcul de la réduction des émissions qui doit être respecté par les outils sans en imposer un en particulier. La méthode Carbon Agri, de son côté, impose l'utilisation de l'outil de diagnostic CAP2ER qui semble être adapté à un contexte tempéré avec un accès difficile pour la modification des paramètres.

Des outils adaptés au contexte tropical sont nécessaires pour réaliser des bilans des GES. Les outils existants qui pourraient être adaptés au contexte des DOM sont présentés dans le Tableau 28. Les critères pour la sélection des outils vont dépendre de la facilité d'accès et les possibilités de paramétrage, des indicateurs obtenus et de leur adaptabilité au contexte des DOM.

Une tendance générale avec ces outils est le développement, dans un premier temps, d'interfaces qui appliquent des modèles théoriques sous forme de tableur (ex. fichier Excel) avec un accès direct au paramétrage (ex. Cool Farm Tool). Ces premières versions ne sont pas toujours mises à jour car le financement de la maintenance et de la gestion de données n'est pas prévu. Ainsi, les versions suivantes sont, dans la plupart des cas, des outils en ligne dont le principal inconvénient est un accès limité au paramétrage. Les utilisateurs n'ont accès qu'au formulaire d'entrée et aux résultats mais pas aux calculs.

Pour les DOM, l'outil AgriClimateChange Tool (ou ACCT) avait été adapté aux conditions des DOM, donnant naissance à ACCT DOM. ACCT a été développé dans le cadre du programme Life+ AgriClimateChange pour lutter contre le changement climatique dans les exploitations. En améliorant la performance énergétique des exploitations et/ou de développant des énergies renouvelables. ACCT-DOM est conforme aux méthodologies développées dans Dia'terre®, avec les adaptations nécessaires aux climats et aux productions agricoles. L'outil ACCT et ACCT DOM n'est plus en ligne depuis 2018. Un autre outil gratuit peut permettre d'effectuer un autodiagnostic en ligne : jediagnostiquemaferme.com.

Un autre rapport qui pourrait être très intéressant est de reprendre le logiciel développé en 2014 suite à une étude ADEME-MAAF « Performance énergétique des exploitations agricoles dans les DOM ».

Outil et développeur ou gestionnaire	Description	Accès et possibilités de paramétrage	Indicateurs
ACCT-DOM (Solagro)	Évalue les consommations d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'échelle de l'exploitation agricole et par atelier de production. ACCT DOM consiste en une adaptation de ACCT pour les exploitations DOM	L'outil ACCT et ACCT DOM n'est plus en ligne depuis 2018. Un autre outil gratuit peut vous permettre d'effectuer un autodiagnostic, il s'agit de jediagnostiquemaferme.com	- GJ/ha, performance éne (GJ/unité fonctionnelle) - Bilan d'azote au sol disti solde azoté en kg N/ha
jediagnostiquemaferme .com (Inter-réseau régional Agriculture Énergie Environnement)	Le diagnostic énergétique Dia'Terre® permet en outre, de quantifier l'ensemble des intrants d'une exploitation agricole. On distingue énergies directes et énergie indirectes.	Outil gratuit en ligne, inscription nécessaire. Pas d'accès au paramétrage. D'après les auteurs " *t. Il n'est pas question de complexifier le diagnostic en ligne*".	GJ/an, GJ/ha; ton CO2eq/ tCO2/ha
CAP'2ER (Idele)	CAP'2ER® (Calcul Automatisé des Performances Environnementales en Élevage de Ruminants) pour évaluer les impacts environnementaux à l'échelle d'une exploitation d'élevage de ruminants et par atelier (bovin lait/viande, ovin).	Outil en ligne https://cap2er.eu/, inscription nécessaire. Pas d'accès au paramétrage.	9 indicateurs : Changeme climatique, Eutrophisatio Acidification, Épuisement ressources, Biodiversité, S C, Conditions travail, écon
Carbon Extract (Agrosolutions)	Mesurer et engager la transition bas-carbone des exploitations agricoles sur leur territoire, destinée aux agriculteurs et conseillers	Outil privé, accompagnement possible en tant que prestation	Émissions de gaz à effet d stockage de carbone dans et les haies
Global Livestock Environmental Assessment Model Interactive (GLEAM-i) (Elevage FAO)	GLEAM, basé sur le Tiers 2 IPCC. Les émissions en amont, les émissions de la production animale et la consommation d'énergie à la ferme. Les émissions en aval sont causées par la transformation et le transport	Outil en ligne, accessible sans inscription https://gleami.apps.fao.org/ 3 modules: troupeau, Alimentation et Effluents. Pas de stockage	Emission intensities (kgCC prot) Protein production (kg pr Total emissions (kgCO2-e
Cool Farm Tool (Alliance)	Cool Farm Tool quantifie les émissions de gaz à effet de serre à la ferme et la séquestration du carbone dans le sol. Plusieurs types de cultures et prairies mais pas la canne spécifiquement	Cool Farm Tool l'outil en ligne accessible après inscription, gratuit pour les agriculteurs	Émissions et bilan GES tec hectare ou tonne. Bilan p postes élevage, système d séquestration de carbone machines, énergie et tran
Ex-Ante Carbon-balance Tool (EX-ACT FAO)	EX-ACT est un outil d'évaluation développé par la FAO, visant à estimer le bilan carbone ex-ante des projets, des programmes ou des politiques de développement agricole et forestier.. Le bilan carbone s'estime par rapport à un scénario de référence	EX-ACT est un outil gratuit, open-source, basé sur Excel et téléchargeable après inscription. Tier 1 ou Tier 2 disponibles. Version 9.3.5	Bilan par GES (CO2 , N2O, leur origine, en CO2teq ; f du bilan carbone sur l'ens la période d'analyse, en te

Tableau 28 Synthèse des outils disponibles pour l'évaluation du bilan carbone des exploitations agricoles et d'élevage

5. Analyse critique de l'estimation du stockage de carbone dans les sols

5.1. Prise en compte du stockage de C dans les sols par les méthodes Grandes Cultures et Carbon Agri

La *méthode Grandes Cultures* recourt à des modèles de simulations de stockage du carbone dans les sols pour estimer l'évolution des stocks de carbone (en tC/ha) sur la durée des projets. Des simulations portant à la fois sur le scénario de référence et le scénario du projet permettent d'estimer un différentiel de stock de C (delta_StockC). Ce dernier est ensuite converti en réduction d'émission (en teqCO2) conformément aux préconisations de l'IPCC (IPCC, 2019). Les modèles préconisés sont AMG et STICS qui ont été construits, paramétrés et validés dans les contextes des grandes cultures en métropole.

La méthode *Carbon Agri* utilise des facteurs de stockage/déstockage annuel de carbone pour des occupations des terres et pratiques additionnelles données afin d'estimer les variations de stock de carbone dans le sol.

5.2. Modèles de simulation testés en conditions ultramarines : Morgwanik, AMG et RothC

MorGwanik est une application informatique sur Excel destinée à calculer le bilan de matière organique (MO) à un pas de temps annuel (Sierra et al., 2015). Il s'agit d'un outil d'aide à la décision pour prédire l'impact de la gestion des systèmes de culture et de l'application des amendements organiques sur la fertilité organique des sols. Les informations d'entrées de l'application sont : région concernée en Guadeloupe, teneur initiale en MO, rotation de cultures, réduction du travail du sol, type et dose d'amendement organique utilisé, et prise en compte du changement climatique. MorGwanik tient aussi compte de l'effet de la grande diversité des sols et des microclimats présents en Guadeloupe sur la teneur en MO. Cet outil a été élaboré à partir des résultats des recherches conduites à INRAE Antilles-Guyane, et réalisé avec la collaboration de CaribAgro.

AMG est un modèle conçu pour simuler la dynamique du carbone organique du sol à un pas de temps annuel (Clivot et al., 2019). Le modèle considère trois compartiments de matière organique : la MO fraîche (FOM) provenant des résidus de culture ou des amendements organiques qui peuvent être décomposés ou humifiés, et la MO qui est divisée en pools de C actif et stable (en tC.ha-1). Le taux de minéralisation k du pool de C actif dépend des conditions climatiques et des caractéristiques du sol et est calculé à l'aide de fonctions environnementales. Afin de permettre un développement d'outils d'aide à la décision pour gérer le stock de carbone organique des sols cultivés, le domaine d'application du modèle a été élargi grâce à la mutualisation des travaux de recherche et d'expérimentation disponibles au sein d'un consortium associant AgroTransfert, Arvalis, INRA et LDAR.

RothC est un modèle international de renouvellement du carbone organique dans la couche arable qui tient compte des effets du type de sol, de la température, de l'humidité du sol et de la couverture végétale sur le processus de renouvellement (Coleman et Jenkinson, 1996). Il utilise un pas de temps mensuel pour calculer le carbone organique total ($t.ha^{-1}$) et le carbone de la biomasse microbienne ($t.ha^{-1}$) sur une échelle de temps allant de quelques années à plusieurs siècles. RothC a été développé et paramétré à l'origine pour modéliser le renouvellement du carbone organique dans les sols arables à partir des expériences de terrain à long terme de Rothamsted - d'où son nom. Plus tard, il a été étendu pour modéliser le renouvellement dans les prairies et les forêts et pour fonctionner dans différents sols et sous différents climats. Il a maintenant été largement testé et utilisé à l'échelle de la parcelle, du

champ, de la région et du monde en utilisant des données provenant de nombreuses expériences à long terme, de différentes régions et de différents pays à travers le monde. Les développements récents comprennent une version pour les apports de matières organiques fertilisantes (Mondini et al., 2017).

5.3. Présentation du jeu de données réunionnais

L'exercice de modélisation s'est porté sur 9 essais long-terme réunionnais dans lesquels les effets d'apport de fertilisants organiques sur les stocks de C du sol ont été étudiés. Des mesures de teneurs en C ont été réalisées chaque année dans ces essais, représentant un total de 511 points.

- L'essai des Colimaçons avec du maraichage implanté depuis 17 ans sur un cambisol andique qui reçoit deux doses de compost de fumier de volaille ou de compost de lisier de porc (Nobile et al. 2018).
- Le réseau Fertiprairie qui comporte 3 essais en prairie permanente ayant reçu pendant 15 années deux doses de lisiers de bovin ou de composts de fumiers de bovin : le lycée de Saint-Joseph sur un arénosol, la ferme de la Sicalait sur un andosol, la société Sedael sur un andosol (Edouard-Rambaut et al. 2022).
- L'essai Soere-PRO de La Mare en canne à sucre implanté sur un nitisol dans lequel des lisiers de porc ou des boues de station d'épuration ont été apporté pendant 7 ans (Versini et al. 2020).

Le réseau TERO en canne à sucre composé de 4 essais :

- L'essai TERO Nord de La Mare implanté sur un nitisol dans lequel des lisiers de porc, des boues de station d'épuration, des litières de volaille, des composts de déchet vert, des engrais organiques ou des écumes de distillerie ont été apporté pendant 7 ans.
- L'essai TERO Ouest de Piton Saint-Leu implanté sur un cambisol dans lequel des lisiers de porc, des boues de station d'épuration, des litières de volaille, des composts de déchet vert, des engrais organiques ou des écumes de distillerie ont été apporté pendant 6 ans.
- L'essai TERO Est de Saint-Benoit implanté sur un andosol dans lequel des lisiers de porc, des écumes de distillerie, des fientes de poule granulées ou des digestats de méthanisation ont été apporté pendant 5 ans.
- L'essai TERO Sud de Saint-Louis implanté sur un cambisol dans lequel des lisiers de porc, des écumes de distillerie ou des fientes de poule granulées ont été apporté pendant 4 ans.

5.4. Constitution d'une base tropicale d'estimation des entrées dans le sol du C des cultures

Cette tâche constitue un pré-requis crucial à l'utilisation des modèles AMG et RothC. Elle a fait l'objet d'un stage de 5 mois conduit par Alex Hennequière sur la période courant de mars à août 2022. L'objectif était de constituer à partir de la littérature et des références acquises dans les unités du CIRAD une base de données tropicale sur les entrées de carbone dans le sol par les cultures. L'enjeu était de mettre à la disposition de la communauté agronomique tropicale un outil basé sur l'approche de Bolinder et al. (2007) favorisant l'utilisation de modèle de dynamique de carbone dans les sols.

Les cultures représentant les plus grandes surfaces mondiales ont été retenues : Canne à sucre, Coton, Riz, Ananas, Banane, Manioc, Igname. Des bases de données internationales, des études publiées et des experts filière ont été mis à contribution pour établir les indices de récolte (*Harvest Index*), le ratio souterrain/aérien de biomasse, le ratio C/N des résidus

culturaux et la distribution verticale des racines dans le profil de sol (paramètre β) de ces 7 cultures. Ces données ont été rassemblées dans deux fichiers : un fichier avec les différents profils racinaires, et un fichier avec les 3 premières données recherchées et les métadonnées associées (dispositif de culture, type de fertilisation…). Enfin l'ensemble de ces informations a été intégré dans un outil accessible à la demande permettant de calculer les entrées aériennes et racinaires de carbone à partir d'une mesure de rendement en matière fraiche.

5.5. Performance des trois modèles

Des simulations ont étés réalisées pour l'ensemble des essais avec une utilisation par défaut des trois modèles. L'ensemble des variables d'entrées ont pu être renseignées pour AMG et RothC. Lorsque les types de cultures ou de fertilisants organiques n'existaient pas dans MorGwanik, les plus proches ont été sélectionnés à dire d'expert. Les performances globales se sont montrées les meilleures pour MorGwanik avec une erreur relative globale de 17% (RRMSE), puis pour AMG à 24% et enfin RothC avec une erreur relative globale de 31% (Figure 4**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Ces erreurs relatives sont plus élevées que celle obtenue avec le modèle AMG en métropole qui est de 5,3%. Une part de cet écart de performance peut être imputable à l'importante variabilité interannuelle observée sur les essais réunionnais.

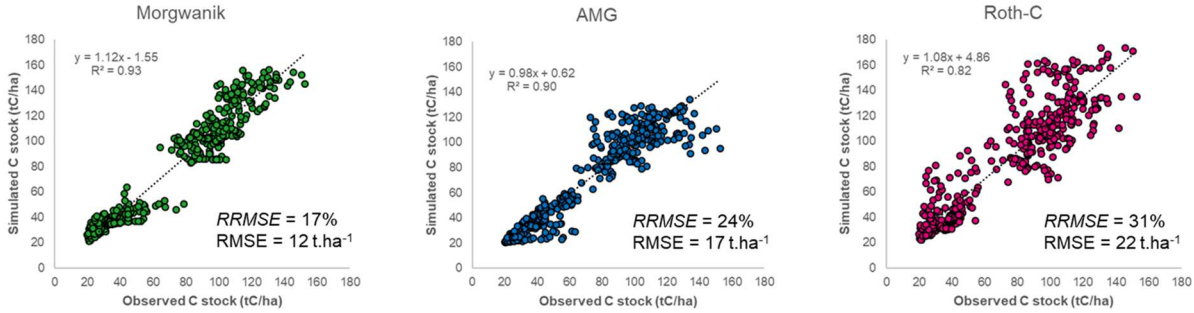

Figure 4 Force prédictive des trois modèles sur l'ensemble du jeu de données réunionnais.

Le biais de simulation est en revanche le plus important avec MorGwanik qui a tendance à surestimer le stockage de C dans les sols, tendance également observable pour RothC (Figure 5). AMG présente les meilleures performances de ce point de vue-là avec un coefficient directeur de 0,98.

La dérive des modèles au cours du temps est également favorable à AMG avec une valeur de -0,5 $tC.ha^{-1}.an^{-1}$ contre 0,8 $tC.ha^{-1}.an^{-1}$ et 1,0 $tC.ha^{-1}.an^{-1}$ pour MorGwanik et RothC respectivement (Figure 5).

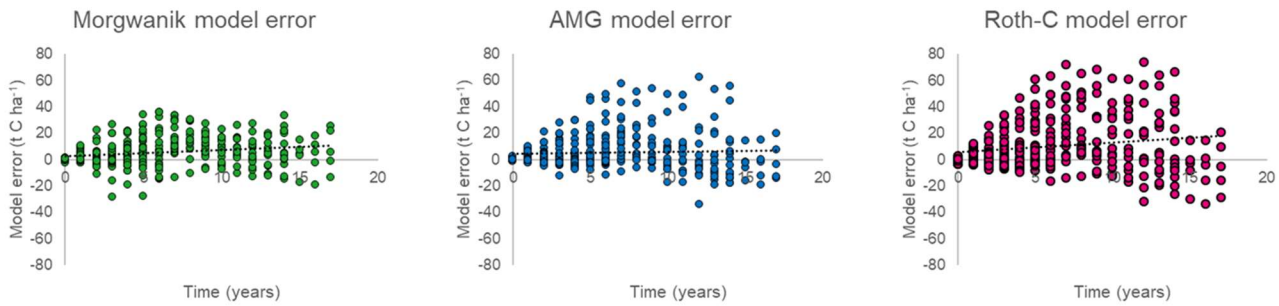

Figure 5 Erreur des trois modèles au cours du temps sur l'ensemble du jeu de données réunionnais.

Malgré des formalismes plus rudimentaires, MorGwanik obtient des résultats satisfaisants. Des simulations supplémentaires ont été réalisées afin de comprendre cet état de fait (Figure

6). Le fait de forcer les entrées de C par les cultures en utilisant la même approche que pour les deux autres modèles (voir section 4.4) conduit à une amélioration des performances en corrigeant le biais global. En revanche, le forçage des quantités de C apportés dans le sol, en utilisant les mêmes données que pour les deux autres modèles, dégrade fortement les performances du modèle.

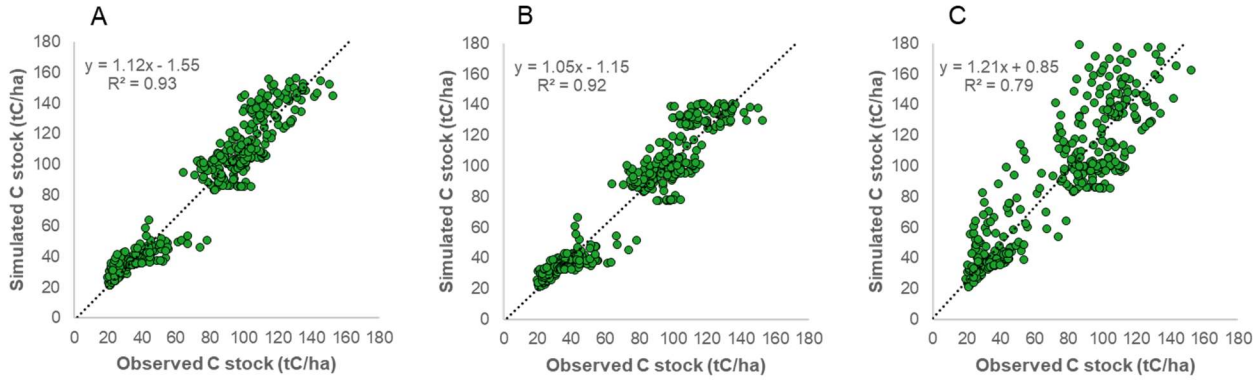

Figure 6 Force prédictive de Morgwanik par défaut (A), en forçant les entrées de C par les cultures (B), en forçant les entrées de C par les MAFOR (C).

Par ailleurs, les meilleures performances de MorGwanik vis-à-vis d'AMG et de RothC sont très fortement liées à deux essais conduits sur andosol en prairie. Dans ces deux sites recevant des lisiers bovins ou des composts de fumier de bovin, AMG et RothC semblent surestimer le stockage de C dans les sols (Figure 7). Or, un bilan complet à l'échelle du profil de sol a récemment démontré que deux tiers du carbone apporté avec les fertilisants organiques se trouvait en fait en quantités identiques dans les horizons 15-30 cm et 30-60cm (Edouard-Rambaut *et al*. 2022) alors que les simulations sont réalisées sur les 15 premiers centimètres du sol. Même si ces modèles ne sont actuellement pas capables de simuler le transfert du carbone apporté avec les fertilisants organiques dans les horizons inférieurs du sol, AMG et RothC apparaissent tout de même plus justes que MorGwanik lorsque le stock additionnel de carbone est réalisé sur l'ensemble du profil de sol.

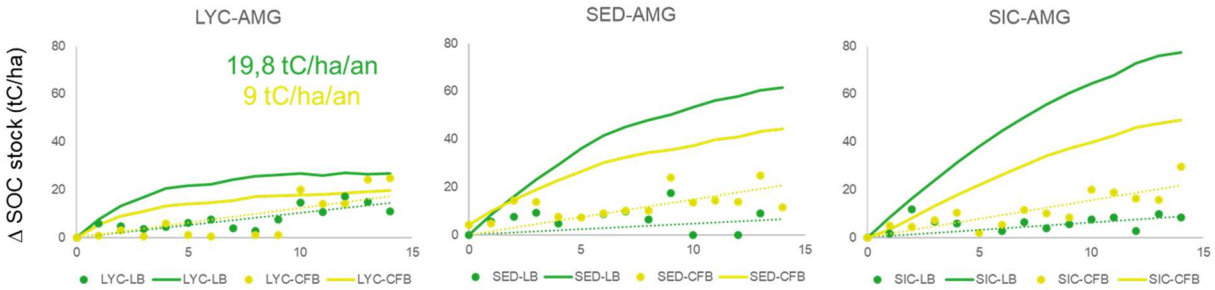

Figure 7 Contribution des fertilisants organiques au stockage de C dans les 15 premiers centimètres du sol pour trois sites de prairie (LYC : arénosol, SED & SIC : andosols). Les apports de lisier bovin sont représentés en vert et de compost de fumier bovin en jaune. Les points représentent des mesures et les courbes des simulations avec AMG.

Afin de limiter l'impact de l'hétérogénéité interannuelle et de certains sites sur l'évaluation des performances globales de ces modèles, une représentation en taux d'évolution du carbone des sols peut être adoptée comme c'est le cas dans la méthode IPCC (Figure 8). Le modèle RothC présente un fort biais avec une surestimation générale des taux de stockage du C dans le sol. AMG s'en sort le mieux avec un biais extrêmement faible et un niveau d'erreur comparable à celui de MorGwanik. Enfin, même si l'approche IPCC ne permet pas de rendre compte de l'effet de gradients d'apports sur les stocks de C du sol, l'erreur relative moyenne n'est pas si différente de celles obtenues avec les trois modèles.

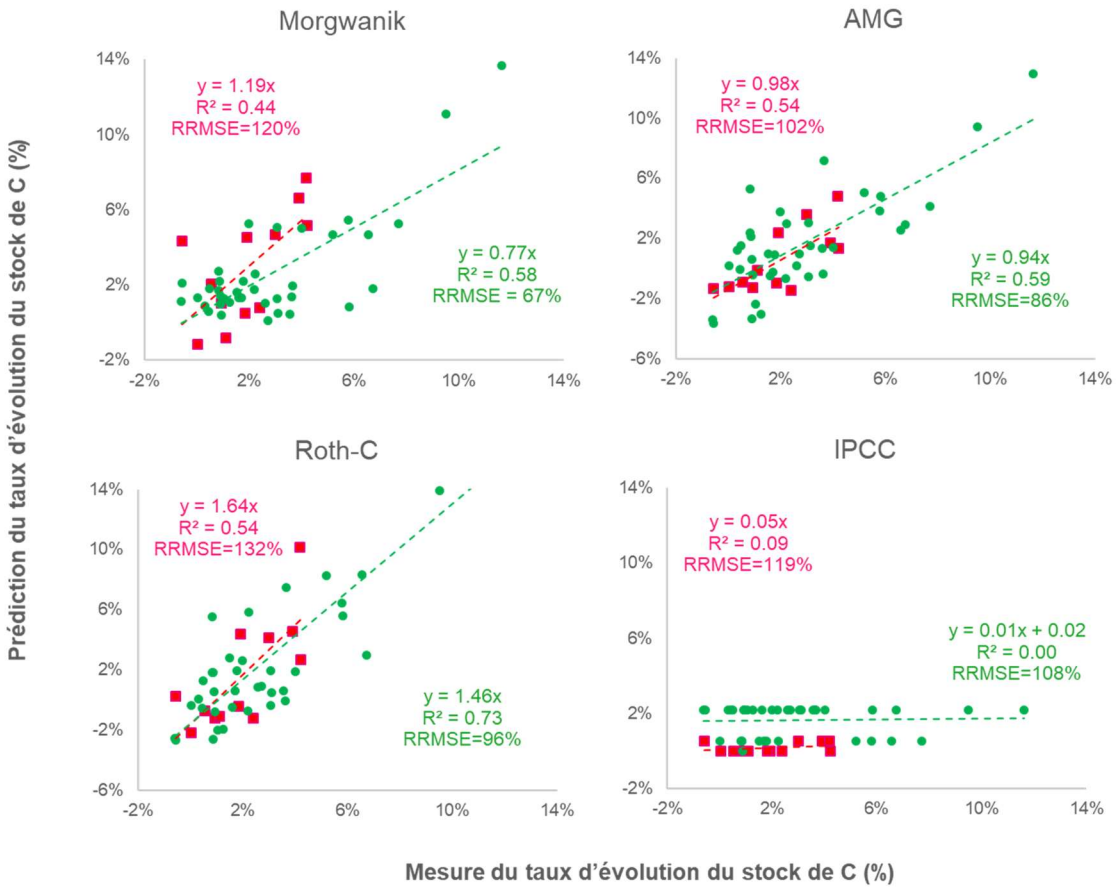

Figure 8 Qualité de prédiction du taux d'évolution du carbone des sols avec les modèles MorGwanik, AMG et RothC et avec l'approche IPCC pour des modalités minérales (en rouge) et organiques (en vert) de fertilisation.

6. Recommandations opérationnelles

Le présent travail a permis de confirmer que l'adaptation du cadre du LBC Grandes Cultures et Carbon Agri est possible pour les contextes Outre-mer, en particulier pour la canne à sucre et la prairie, à condition de veiller aux points d'attention nécessaires sur l'adaptation aux conditions biophysiques et la réalité socio-économique du territoire.

Les différences du contexte biophysique vont avoir un impact considérable sur la modélisation des facteurs d'émission des fertilisants minéraux et organiques. Pour le choix des leviers et les pratiques, il est nécessaire prendre en considération la réalité du terrain avec le bas niveau de mécanisation, le manque d'outils de raisonnement de la fertilisation, l'utilisation limitée de certains fertilisants minéraux tels l'ammonitrate et les particularités du territoire de La Réunion en particulier, où la pression foncière amène à intensifier les productions avec un bas niveau de maîtrise des pratiques de fertilisation, notamment de matières fertilisantes d'origine résiduaire.

Pour la prise en compte du stockage de carbone dans le sol, des modèles de stockage du carbone ont été testés et les conditions nécessaires à leur calibrage ont été présentés. Le modèle AMG représente à ce jour l'option la plus prometteuse en terme de performances et d'adaptabilité. Le modèle Morgwanik qui est issu comme AMG du modèle Hénin-Dupuis mais qui a été adapté au territoire de la Guadeloupe reste évidemment le plus pertinent pour ce territoire-là.

La synthèse réalisée pointe les RE et leviers qui peuvent être adaptés à la réalité biophysique et socio-économique des DOM, et en particulier à La Réunion. Par ailleurs, dans les DOM, le LBC peut contribuer à améliorer le suivi et l'utilisation d'outils de pilotage d'une façon plus systématique et donc une meilleure utilisation et efficacité des intrants qui éviteraient des émissions et des pertes vers l'environnement.

En ce qui concerne les outils qui pourraient être utilisés, il serait intéressant de s'inspirer de ceux qui ont déjà été développés dans des précédents projets en contexte ultramarin et les remettre à jour et en utilisation pour la réalisation des bilans énergétiques et des émissions de GES. L'expertise des instituts de recherche gagnerait à être valorisée dans cette perspective. D'un point de vue opérationnel, il semble nécessaire de mener une réflexion sur les moyens de maintenance et de mise à jour des outils, la gestion des bases de données produites et l'accompagnement des utilisateurs.

Finalement, il est important de rappeler que dans les zones riches en couvertures naturelles comme celles de la plupart des DOM[7], s'il est bien sûr urgent de diminuer les émissions de GES liées aux pratiques agricoles, une source d'émissions qui peut s'avérer considérable, et être difficilement compensée, est le changement de l'utilisation de sol des couverts forestiers et arbustifs. Chercher des moyens de conserver ces stocks de carbone des sols naturels et de financer leur préservation (et les structures et services écosystémiques associés) pourrait également s'avérer un atout pour ces territoires.

[7] A l'exception de Mayotte : taux de boisement de 16 % en 2015, soit bien moins qu'en métropole (31 % en 2017). Pour les autres DOM la surface en forestière représente des surfaces importantes : 35 % à La Réunion, et plus de 40 % pour Martinique et Guadeloupe et > 90 % en Guyane

7. Références

Agreste (2022). Recensement agricole 2020 - Surface moyenne des exploitations agricoles en 2020 : 69 hectares en France métropolitaine et 5 hectares dans les DOM. agreste | PRIMEUR | OCTOBRE 2022 No 13.

Agreste (2021a). Graph'Agri 2021. L'agriculture, la forêt, la pêche et les industries agroalimentaires. 224 pages. https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/GraFra2021Integral/detail/

Agreste (2021b). Les dossiers. L'occupation du sol entre 1982 et 2018. Avril 2021, n°3. URL : https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Dos2103/Dossiers%202021-3_TERUTI.pdf

Agreste (2020). Etat des lieux des pratiques de désherbage de la canne à sucre à La Réunion. DAAF La Réunion - SISE - Enquête Pratiques Culturales Canne 2017 - Agreste Août 2020 n°109

Bolinder, M. A., Janzen, H. H., Gregorich, E. G., Angers, D. A. & VandenBygaart, A. J. (2007). An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *118 : 29-42*.

Clivot, H., Mouny, J.-C., Duparque, A., Dinh, J. L., Denoroy, P., Houot, S., Vertès, F., Trochard, R., Bouthier, A., Sagot, S. & Mary, B. (2019). Modeling soil organic carbon evolution in long-term arable experiments with AMG model. *Environmental Modelling & Software*, *118 : 99-113*.

Coleman, K. & Jenkinson, D.S. (1996). RothC-26.3-A Model for the turnover of carbon in soil. Evaluation of soil organic matter models, Springer.

Demenois, J., Dayet A., Karsenty A.. (2022). "Surviving the jungle of soil organic carbon certification standards: an analytic and critical review". Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 27:1, https://doi.org/10.1007/s11027-021-09980-3

Edouard-Rambaut, L. A., Vayssières, J., Versini, A., Salgado, P., Lecomte, P., & Tillard, E. (2022). 15-year fertilization increased soil organic carbon stock even in systems reputed to be saturated like permanent grassland on andosols. *Geoderma*, *425*.

INSEE (2021). La France et ses territoires. Insee Références. Édition 2021. 204 pages. https://www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/5040030/FET2021.pdf

Koch P. and Salou T., 2022. AGRIBALYSE®: Rapport Méthodologique- Volet Agriculture- Version 3.1 ; version initiale v1.0 ; 2014. Ed ADEME, Angers, France. 342 p. URL: https://doc.agribalyse.fr/documentation/documentation-complete

Laboubee C., Bochu J.L., Leplay S., Duval L., Reboul L., Vayssieres J. (2013). Performance énergétique des exploitations agricoles dans les DOM. État des lieux des consommations et productions d'énergie des exploitations, analyse et propositions de leviers d'actions. apport final définitif de la Tâche 1. Marché n°: 10-60-C0147 18 octobre 2013. 153 pages. http://www.fedom.org/wp-content/uploads/2014/04/etat-lieux-energie-exploitations-agricoles-dom.pdf

Mondini, C., Cayuela, M. L., Sinicco, T., Fornasier, F., Galvez, A., & Sánchez-Monedero, M. A. (2017). Modification of the RothC model to simulate soil C mineralization of exogenous organic matter. *Biogeosciences*, *14* : 3253-3274.

Nobile, C. M., Bravin, M. N., Tillard, E., Becquer, T., & Paillat, J.-M. (2018). Phosphorus sorption capacity and availability along a toposequence of agricultural soils: effects of soil type and a decade of fertilizer applications. *Soil Use and Management*, *34*(4).

OER (2022). Observatoire Énergie Réunion. Production d'électricité. URL https://oer.spl-horizonreunion.com/electricite/production-electricite-la-reunion

Sierra, J., Causeret, F., Diman, J. L., Publicol, M., Desfontaines, L., Cavalier, A., & Chopin, P. (2015). Observed and predicted changes in soil carbon stocks under export and diversified agriculture in the Caribbean. The case study of Guadeloupe. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *213 : 252-264*.

Versini, A., Poultney, D., Bachir, H., Février, A., & Paillat, J.-M. (2020). Effect of nitrogen fertilisation on sugarcane root development and nitrogen accumulation in ratoon crops of Reunion Island. *Sugar Tech*, *22* : 1110-1121.

8. Annexes

8.1. Réductions d'Émissions potentiels et leviers communs aux deux méthodes LBC GC et Carbon Agri

Réductions d'émissions	**Leviers**	Méthode
La diminution des émissions de GES associées à la fertilisation azotée	Réduire la dose d'azote minéral apportée sur le système de culture	GC
	Ajustement du calcul de dose prévisionnelle grâce à une meilleure prise en compte des apports et des objectifs de rendements réalistes	
	Prise en compte des conditions climatiques pour le déclenchement des apports	
	Utilisation d'outils de pilotage	
	Modulation intraparcellaire	
	Améliorer l'efficacité de l'azote apporté et valorisé par la plante en limitant la nitrification/dénitrification, la volatilisation et la lixiviation – Agir sur la nitrification / dénitrification	
	Utilisation d'inhibiteurs de nitrification	
	Chaulage des sols acides (uniquement pour les pHeau initial < 6.8 et dans l'objectif d'atteindre une valeur de 6.8)	
	Utilisation de formes d'engrais moins émettrices (réduction de l'utilisation des formes uréiques, inhibiteurs d'uréase)	
	Enfouissement des apports organiques et minéraux	
	Introduire des légumineuses fixatrices d'azote dans la rotation (en culture principale, associée ou intermédiaire) ou des cultures/variétés à plus faible besoin en azote	
Consommation des engrais	Optimiser la fertilisation pour réduire l'usage des engrais minéraux N, P, K	Carbon Agri
	Implantation de légumineuses en mélange ou en cultures pures	
La diminution des émissions de GES associées aux combustibles fossiles	Réduire la consommation de combustibles fossiles associée aux engins et à l'irrigation (fioul, GNR, gaz)	GC
	Réduire le nombre de passage des engins agricoles sur le système de culture (simplification du travail du sol, passage au semis direct…)	
	Réduire la consommation d'énergie des engins (écoconduite, banc d'essais moteurs, motorisation électrique, autoguidage RTK)	
	Réduire la consommation d'énergie du système d'irrigation (choix de matériel moins gourmands en énergie)	
	Réduire la consommation de combustibles fossiles associée au séchage et au stockage des grandes cultures	
	Réduire la consommation d'énergie du système de séchage et/ou de stockage de l'exploitation	
Consommation d'énergie	Réduire la consommation de carburant (ajustement de la puissance à l'outil, conduite économe, passage des tracteurs au banc d'essai,…)	Carbon Agri
	Réduire les consommations d'électricité du bloc traite (pré-refroidisseur de lait, récupérateur de chaleur, ventilation du bloc traite,…)	
Le stockage de carbone dans le sol	Augmenter la quantité de biomasse restituée par les couverts végétaux, par exemple par l'intégration ou extension des couverts végétaux dans les rotations.	
	Augmentation des restitutions par les résidus de cultures (restitution des résidus, augmentation de la production de biomasse par unité de surface)	
	Augmentation des apports de matières amendantes ou fertilisantes d'origine résiduaire (MAFOR) sur l'exploitation (effluents d'élevage, composts, déchets urbains et industriels, digestats …)	
	Insertion et allongement des prairies temporaires et artificielles (luzerne par exemple) dans les rotations	
Gestion des surfaces cultivées	Implanter des cultures intermédiaires	
	Implanter des prairies temporaires ou permanentes sur l'exploitation	
	Allonger la durée des prairies temporaires	
La diminution des émissions de GES en aval de l'exploitation	Augmenter la quantité de biomasse restituée par les couverts végétaux, par exemple par l'intégration ou extension des couverts végétaux dans les rotations	

Tableau 29 Réductions d'Émissions potentiels et leviers communs aux deux méthodes LBC GC et Carbon Agri

8.2. Réductions d'Émissions potentiels et leviers qui pourraient s'articuler entre les deux méthodes LBC GC et Carbon Agri

Réductions d'émissions	**Leviers**	Méthode
Gestion des infrastructures agro écologiques	Implanter des haies sur l'exploitation	Carbon Agri et articulation GC
	Améliorer la gestion des haies	Carbon Agri et articulation GC
	Développement de l'agroforesterie(introduction d'arbres dans les parcelles de prairies ou surfaces cultivées)	Carbon Agri et articulation GC

Tableau 30 Réductions d'Émissions potentiels et leviers qui pourraient s'articuler entre les deux méthodes LBC GC et Carbon Agri

8.3. Réductions d'Émissions potentiels et leviers exclusifs à la méthode Carbon Agri

Réductions d'émissions	**Leviers**
Gestion des déjections animales	Augmenter la durée de pâturage
	Augmentation de la fréquence de raclage des déjections
	Améliorer les modes d'épandage des déjections (pendillards, enfouisseurs)
	Couverture de fosse de stockage des effluents
	Méthanisation des déjections animales
	Compostage des déjections
Gestion du troupeau	Améliorer la conduite sanitaire (réduire la proportion de mammite, optimiser l'équipement de traite, réduire le nombre de boiteries,...)
	Améliorer le logement des animaux, la ventilation des bâtiments,...pour optimiser la production par vache
	Optimiser l'âge au 1ervêlage et la longévité des vaches
	Améliorer les performances génétiques (potentiel de production, réduction du méthane entérique)
	Optimiser les effectifs de génisses de renouvellement (allonger la longévité des vaches, sexage,...)
Alimentation du troupeau	Augmentation de la qualité des fourrages (stade de récolte, stockage)
	Optimisation de la teneur en azote de la ration
	Optimiser la consommation de concentrés (en lien avec la valorisation de la ration ajustée aux besoins des animaux, la qualité des fourrages et le type de fourrages)
	Remplacement du tourteau de soja par du tourteau de colza
	Augmentation de l'autonomie protéique
	Ajout de lipides dans la ration

Tableau 31 Réductions d'Émissions potentiels et leviers exclusifs à la méthode Carbon Agri