



# SEQCOI : UN CALCULATEUR SPATIALISÉ DE BILANS DE GAZ À EFFET DE SERRE DU SECTEUR AGRICULTURE, FORESTERIE ET AUTRES USAGES DES TERRES

DOCUMENTATION TECHNIQUE

Décembre 2022



AVEC L'EUROPE,  
nos régions  
coopèrent





---

## INTRODUCTION

Le sixième cycle d'évaluation du GIEC, dont les rapports ont été rendus à partir d'août 2021, confirme ce sur quoi les scientifiques alertent les politiques depuis cinq décennies : le changement climatique et ses conséquences auront des conséquences graves et représentent la menace majeure pour le XXI<sup>ème</sup> siècle. Ces bouleversements sont dus à l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère, augmentation provoquée par les activités humaines.

Si la crise climatique semble désormais inévitable, il existe toutefois des solutions pour atténuer ses effets. Pour cela, il s'agit, d'une part, de diminuer les sources des émissions de GES, notamment en réduisant nos consommations d'énergie fossile ; et d'autre part, d'augmenter la capacité d'absorption des GES en développant et protégeant les puits de carbone terrestres, principalement les forêts et les sols.

Le secteur de l'Agriculture, de la Foresterie et des Autres utilisations des Terres (AFAT, ou AFOLU en anglais) est responsable d'environ un quart des émissions de GES d'origine anthropique. Trois gaz sont majoritairement concernés. Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) est surtout émis lors d'un changement d'usage des terres : il y a alors réajustement des stocks de carbone de la biomasse et du sol, qui peuvent augmenter ou diminuer selon l'usage d'origine et de destination. Le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) est surtout lié à l'application d'intrants et à la minéralisation de la matière organique, y compris d'origine animale. Enfin, les deux principales sources de méthane (CH<sub>4</sub>) sont la riziculture inondée et l'élevage de ruminants.

Le projet SeqCOI - Offres et demandes en **séquestration** du carbone dans les territoires des îles de l'Océan Indien -, animé par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) entre juillet 2021 et décembre 2022, s'est donné pour objectif de proposer aux décideurs politiques un outil spatialisé, fiable et simple d'utilisation permettant d'estimer le bilan de gaz à effet de serre du secteur AFAT sur leur territoire. Cet outil est disponible en ligne<sup>1</sup>. Le projet s'est concentré sur des territoires de taille équivalente, et correspondants à un échelon pertinent de prise de décision pour l'aménagement du territoire. Un partenaire scientifique a été associé au projet sur chaque territoire :

- A Madagascar, la commune rurale d'Antoby Est a été choisie comme territoire d'étude. Le Laboratoire des Radiosotopes (LRI), sous tutelle de l'Université d'Antananarivo, avait déjà acquis des données sur ce terrain ;
- L'ensemble de l'île Rodrigues, territoire rattaché à la république de Maurice, a été étudié avec l'appui du Mauritius Research and Innovation Council (MRIC) ;
- A La Réunion, la densité des données disponibles a permis de s'intéresser à toutes les communautés de communes de l'île. En sus de son soutien technique et scientifique, le Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad) a accueilli dans ses locaux de Saint-Pierre l'équipe d'animation.

L'objet de ce document est de présenter en détail l'outil développé. Il ne s'agit ni d'un guide d'usage (*user guide*), ni d'un tutoriel. Sa lecture reste néanmoins recommandée à tout utilisateur de l'outil.

---

1. <https://smartis.re/SEQCOI>

# TABLE DES MATIÈRES

<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>1 Genèse et développement</b>	<b>6</b>
1.1 Genèse : l'importance des données locales	6
1.2 Bilans de GES : concepts	7
1.3 Le choix d'un calculateur modèle	8
1.4 Un nouveau calculateur de bilans GES spatialisés	9
<b>2 Calculateur</b>	<b>11</b>
2.1 Remarques générales	11
2.2 Equations générales	14
2.2.1 Changements de stocks de carbone de la biomasse	14
2.2.2 Changements de stocks de carbone du sol	14
2.2.3 N <sub>2</sub> O issu de la minéralisation de la MOS	16
2.2.4 Combustions	16
2.2.5 Equations spécifiques aux mangroves	17
2.3 Changements d'usage	18
2.3.1 Déforestation	19
2.3.2 Boisement	20
2.3.3 Changements d'usages agricoles	21
2.3.4 Urbanisation des surfaces agricoles	22
2.4 Agriculture	23
2.4.1 Cultures annuelles	23
2.4.2 Cultures pérennes	25
2.4.3 Riz inondé	26
2.4.4 Prairies	27
2.4.5 Intrants	28
2.5 Elevage	31
2.5.1 CH <sub>4</sub> lié à la fermentation entérique	31
2.5.2 CH <sub>4</sub> de la gestion des effluents	32
2.5.3 N <sub>2</sub> O direct de la gestion des effluents	33
2.5.4 N <sub>2</sub> O indirect de la gestion des effluents	33
2.6 Forêts	34
2.7 Zones cotières	34
2.7.1 Changements de stocks de carbone de la biomasse	35
2.7.2 Changements de stocks de carbone du sol	35
2.7.3 CH <sub>4</sub> lors d'une remise en mangrove	35
<b>3 Données</b>	<b>36</b>
3.1 Base de données et données de base	36
3.2 Contexte pédo-climatique	37
3.2.1 Cartes des climats	37
3.2.2 Cartes des sols	39
3.3 Usages et élevage	42
3.3.1 Cartes des usages	42
3.3.2 Données descriptives des élevages	45

<b>4 Devenir de l’outil</b>	<b>46</b>
4.1 Ergonomie . . . . .	46
4.2 Fonctionnalités . . . . .	47
4.3 Résultats et interprétation . . . . .	47
<b>A Schéma physique de base de données</b>	<b>48</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>50</b>

## TABLE DES FIGURES

1 Arbre de décision pour la classification des climats . . . . .	37
2 Carte du climat de l’île Rodrigues . . . . .	38
3 Carte du climat d’Antoby Est . . . . .	39
4 Carte du climat de la Réunion . . . . .	40
5 Carte des sols de l’île Rodrigues . . . . .	40
6 Carte des sols d’Antoby Est . . . . .	41
7 Carte des sols de La Réunion . . . . .	42
8 Carte des usages de Rodrigues . . . . .	43
9 Carte des usages d’Antoby Est . . . . .	44
10 Carte des usages de La Réunion . . . . .	44

## LISTE DES TABLEAUX

1 Tableau de synthèse des flux de GES : exemple . . . . .	13
2 Tableau de synthèse du compartiment Déforestation . . . . .	19
3 Tableau de synthèse du compartiment Boisement . . . . .	20
4 Tableau de synthèse du compartiment Changement d’usages agricoles	21
5 Tableau de synthèse du compartiment Urbanisation des surfaces agri- coles . . . . .	22
6 Tableau de synthèse du compartiment Cultures annuelles . . . . .	23
7 Tableau de synthèse du compartiment Cultures pérennes . . . . .	25
8 Tableau de synthèse du compartiment Riz inondé . . . . .	26
9 Tableau de synthèse du compartiment Prairies . . . . .	28
10 Tableau de synthèse du compartiment Intrants . . . . .	28
11 Tableau de synthèse du compartiment Elevage . . . . .	31
12 Tableau de synthèse du compartiment Forêts . . . . .	35
13 Tableau de synthèse du compartiment Zones côtières . . . . .	35

---

# 1 GENÈSE ET DÉVELOPPEMENT

## 1.1 GENÈSE : L'IMPORTANCE DES DONNÉES LOCALES

Le projet SeqCOI s'inscrit dans un historique de recherches qu'il entend poursuivre et mettre en valeur.

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, ou IPCC en anglais) est bien sûr la référence scientifique et méthodologique mondiale en termes de bilans de GES. Il publie régulièrement des recommandations à destination des Etats afin de leur fournir des méthodes harmonisées d'estimation pour leur inventaire annuel de gaz à effet de serre. L'emploi de méthodes communes permet la comparaison à l'échelle internationale. Les dernières recommandations datent de 2019 et actualisent celles de 2006 ; le volume 4 de ces recommandations est entièrement consacré au secteur AFAT (IPCC 2019).

En sus des méthodes fournies par ces recommandations, le GIEC y propose également des données de référence. Pour des grandes catégories de climats, de sols, de régions ou encore de types d'élevage, des valeurs de facteurs d'émissions sont proposées pour être utilisées lorsqu'un pays ne peut fournir d'estimation plus précise. Par définition, ces valeurs sont à utiliser *par défaut*, et elles peuvent se révéler très éloignées de la réalité lorsqu'on considère une région particulière.

A La Réunion, l'étude C@RUN - Séquestration de carbone dans les sols agricoles réunionnais : évaluations, modélisation spatiale et potentiels d'atténuation du changement climatique - (Todoroff *et al.* 2019) a souligné l'importance d'acquérir des données spécifiques. Ainsi, pour les andosols de La Réunion, l'étude a estimé des stocks compris entre 145 et 176 tC.ha<sup>-1</sup> sur les 30 premiers centimètres de profondeur. En comparaison, pour les climats présents à La Réunion, les données de référence du GIEC proposent des stocks compris entre 50 et 138 tC.ha<sup>-1</sup>, soit une sous-estimation parfois très importante !

A ce premier niveau d'erreur, il faut ajouter le grain spatial parfois très grossier des données disponibles au niveau mondial pour caractériser un territoire selon les grandes catégories utilisées par le GIEC<sup>2</sup>. Sur La Réunion encore, un seul type de climat est proposé (*Tropical Moist*), tandis que des données plus précises permettent de subdiviser le territoire en cinq zones climatiques, avec le contraste que cela implique pour les valeurs des facteurs d'émissions.

A Madagascar, la base de données 2CarMa a été construite pour regrouper les données pédologiques disponibles au sein du LRI. Elle permet, comme à La Réunion, d'appuyer l'obtention de stocks de carbone beaucoup plus précis à l'échelle régionale.

Ces données, fiables et acquises dans des cadres scientifiquement rigoureux, sont cependant difficilement disponibles pour le décideur politique. C'est pourtant tout l'enjeu : valoriser les données acquises dans le cadre de la recherche pour éclairer les pouvoirs publics, en particulier dans le cadre des politiques d'atténuation et d'adaptation au changement climatique.

---

2. Un atlas de telles données est disponible sur <https://earthmap.org/>

### 1.2 BILANS DE GES : CONCEPTS

Un bilan de GES est la somme des quantités de gaz à effet de serre émises ou captées dans l'atmosphère sur une année. Si ce bilan est positif, cela signifie que les émissions sont supérieures au captage : les activités étudiées ont donc contribué à l'augmentation des GES dans l'atmosphère. Inversement, le bilan peut être négatif : les plantes absorbent, par la photosynthèse, du CO<sub>2</sub> atmosphérique, et la décomposition de leurs racines et feuilles mortes alimente le stock de carbone du sol.

Pour le secteur AFAT en particulier, les processus biophysiques à l'origine de l'émission ou du captage de GES sont nombreux. Pour un processus particulier, quel qu'il soit, la formule d'estimation du flux de GES correspondant peut être exprimée ainsi :

$$F_{GES} = DA \times FE_{i,j,k,\dots}$$

où :

- $F_{GES}$  est la quantité de gaz à effet de serre émise ;
- $DA$  est la donnée d'activité, par exemple la surface d'un usage ou le nombre d'animaux ;
- $FE_{i,j,k,\dots}$  est le facteur d'émission, en quantité de GES par unité d'activité.

Les indices  $i, j, k, \dots$  indiquent que la valeur à utiliser pour le facteur d'émission dépend d'un certain nombre de caractéristiques : climat, type de sol, itinéraire technique...

Pour le décideur politique, l'évolution du bilan de GES de son territoire administré est un indicateur simple pour évaluer *a posteriori* si les politiques publiques mises en œuvre ont permis de contribuer à l'atténuation du changement climatique. Encore plus intéressant pour le décideur est la possibilité d'inclure dans les critères de choix *a priori* entre différents projets d'aménagement, le bilan de GES estimé de son territoire avec et sans le projet. Cela permet de répondre à une question simple : quels sont les projets qui atténuent, ou au contraire qui accentuent, les émissions de GES d'un territoire ? **C'est la question à laquelle l'outil SeqCOI se propose de répondre.**

On appelle *scénario* de changement d'usage des terres un ensemble de parcelles caractérisées par un usage initial et un usage final. Si l'usage initial diffère de l'usage final, les processus émetteurs de GES peuvent également changer, ce qui signifie que le changement d'usage peut avoir un impact positif ou négatif sur les émissions de GES. C'est ce que comptabilise le bilan GES d'un scénario de changement d'usage des terres : qu'implique, en termes de GES, le passage de certaines parcelles d'un usage à un autre ?

Pour que ce bilan soit complet, il n'est pas suffisant de comparer la situation initiale et la situation finale des GES. Imaginons, pour une parcelle donnée, le cas d'une déforestation vers un usage agricole pérenne, tel un verger. Initialement, la forêt est supposée arrivée à l'équilibre, et sa biomasse est supposée stable : le bilan des émissions et stockages de GES de la biomasse est donc nul. Au bout d'un certain temps, la biomasse du verger se stabilise également, et là encore le bilan de GES de la biomasse devient nul. En ne comparant que ces deux situations, on concluerait que le changement n'a eu aucun impact en termes de GES pour la biomasse. Pourtant, la biomasse de la forêt était bien supérieure à celle du verger : où est donc passé tout ce carbone ?

En fait, il a bien été émis, mais pendant la période de transition entre ces deux usages. Contrairement à un inventaire, qui se concentre sur une année, le bilan GES d'un scénario doit donc comptabiliser les émissions sur l'ensemble de la période séparant le passage de l'usage initial à l'usage final. Cette période est appelée *période de comptabilisation*. Par défaut, le calculateur SeqCOI emploie une période de comptabilisation de 20 ans. Ce choix correspond à une vision à moyen-terme de l'impact des politiques d'aménagement. Surtout, il permet à des mécanismes d'importance, qui ne se mettent en place qu'avec le temps, de devenir visibles : c'est notamment le cas des stockages et déstockages du carbone du sol, qui n'est considéré comme stable qu'après 20 ans sous un même usage.

La trajectoire suivie pour mettre en place le changement est également importante. Reprenons la parcelle déforestée précédente : si la parcelle est entièrement déforestée dès la première année, alors la croissance du verger commence dès la première année. En revanche, si la parcelle est progressivement déforestée pendant cinq ans, les derniers arbres fruitiers ne commencent à croître qu'après cinq ans, ce qui change le bilan GES!

A titre d'exemple, les outils d'évaluation de bilans de GES Ex-ACT et NEXT, développés par la Food and Agriculture Organization, proposent quatre trajectoires de changement, appelées dynamiques :

- Une dynamique immédiate (I) : tous les changements sont supposés effectués la première année. Pour une surface déforestée de cinq hectares, ces cinq hectares sont directement convertis dans un nouvel usage ;
- Une dynamique linéaire (L) : le changement est réparti linéairement sur l'ensemble d'une période dite période d'implémentation. Si une surface de cinq hectares est déforestée sur une période d'implémentation de cinq ans, cela signifie que la première année, seul un hectare est considéré comme ayant changé d'usage, auquel vient s'ajouter un deuxième hectare la deuxième année...
- Une dynamique exponentielle (E) : le changement est rapide au début puis ralentit jusqu'à la fin de la période d'implémentation.
- Une dynamique sigmoïdale (S) : le changement est lent en début de période d'implémentation, s'accélère ensuite, avant de ralentir de nouveau.

### 1.3 LE CHOIX D'UN CALCULATEUR MODÈLE

En tant que tel, un calculateur de bilans GES du secteur AFAT n'a rien de nouveau. Plusieurs dizaines de ces calculateurs ont déjà été implémentés, et il était important pour nous de situer chacun de ces calculateurs en termes d'avantages et d'inconvénients, et de proximité avec notre travail.

Un inventaire a donc été réalisé, durant lequel 20 calculateurs existants ont été testés et caractérisés selon une batterie de critères (Colomb *et al.* 2013) :

- L'outil est-il accessible, gratuit, a-t-on accès facilement aux méthodologies et aux données qui le sous-tendent ?
- Quelle est l'approche adoptée par le calcul ? S'agit-il d'un inventaire de GES, d'une évaluation de projet ?
- Comment le territoire est-il représenté ?

- Le calculateur peut-il être adapté à une approche spatiale ? Prend-il en compte le contexte agro-pédo-climatique ?
- Quelles sont les activités et sources de GES comptabilisées ?
- Les données à renseigner pour faire fonctionner le calculateur sont-elles disponibles ?
- Quel temps et quelles compétences sont nécessaires pour faire fonctionner l'outil ?
- Enfin, quels types de résultats sont produits ? Une estimation de l'incertitude est-elle fournie ?

Au vu de la très faible période de temps disponible - le projet a duré 18 mois, dont seulement 8 mois ont été consacrés au développement informatique -, il nous a également paru pertinent de partir d'un calculateur existant pour construire le nôtre.

Le calculateur retenu à la suite de l'inventaire a été le calculateur Ex-ACT (Ex-Ante Carbon-balance Tool), développé par la FAO, actuellement disponible en version 9 (FAO 2022). Disponible gratuitement<sup>3</sup>, il s'agit d'un classeur Excel, composé de neuf modules répartis en autant d'onglets. Un premier module demande à l'utilisateur de spécifier les caractéristiques de son territoire (climat, type de sol...), puis chaque module correspond à une partie du bilan de gaz à effet de serre, par type d'usage (agriculture, prairies...).

Ses principaux avantages, à nos yeux, sont sa structure modulaire, et sa prise en compte de la plupart des processus décrits dans les recommandations du GIEC. Il est également très accessible et facilement ré-implémentable. Il fournit non seulement une évaluation du bilan de GES de la situation actuelle, mais également une évaluation à moyen-terme de scénarios de changements d'usages sur le bilan GES.

En revanche, il ne permet pas directement de prendre en compte la variabilité pédo-climatique d'un territoire : pour chaque sous-territoire homogène en termes de type de sol et de climat, il faut remplir un nouveau classeur Ex-ACT, en paramétrant le premier onglet de manière adéquate. De plus, il ne propose aucune contrainte spatiale : on peut sans soucis, par malice ou par inadvertance, étudier le cas de la conversion de 10 millions d'hectares de forêt boréale vers un système de riziculture inondée, sur des sols sableux... à La Réunion, où la surface totale est limitée à 250 000 hectares, où le climat est tropical et où il n'y a pas de sols sableux.

Il est également fastidieux, même pour un utilisateur expert, de renseigner des données dites « Tier 2 », c'est-à-dire des données spécifiques aux conditions locales, destinées à remplacer les données de référence du GIEC dans les calculs.

### 1.4 UN NOUVEAU CALCULATEUR DE BILANS GES SPATIALISÉS

A ce stade, on peut résumer les objectifs fixés pour l'outil SeqCOI en quelques points :

1. Le calculateur doit respecter au mieux l'ensemble des recommandations les plus récentes fournies par le GIEC pour le calcul des quantités de gaz à effet de serre, pour tous les processus biophysiques décrits dans ces recommandations ;

---

3. <https://www.fao.org/in-action/epic/ex-act-tool/suite-of-tools/ex-act/en/>, dernière consultation le 09/12/2022

2. Lorsqu'elles sont disponibles et fiables, les données spécifiques produites par la recherche scientifique doivent être valorisées et utilisées à la place des données par défaut du GIEC. Celles-ci doivent cependant être incluses pour assurer le fonctionnement de l'outil en cas d'absence de données spécifiques ;
3. Le calculateur doit permettre de simuler des scénarios de changement d'usage et d'évaluer le bilans GES de ces scénarios ;
4. Le calculateur doit être en mesure de prendre en compte la variabilité pédo-climatique du territoire, sans effort de la part de l'utilisateur ; cette variabilité doit contraindre les calculs ;
5. Une interface doit être implémentée, accessible conceptuellement et informatiquement à des utilisateurs non experts.

Partant de ces constats, un cahier des charges complet a été dressé pour l'outil spatialisé de bilans de gaz à effet de serre du secteur AFAT développé par SeqCOI. Il a été fait le choix de développer un outil de calcul de bilans de GES à la parcelle, définie comme une unité d'usage, de sol et de climat homogènes, de taille relativement petite. Le bilan de GES d'un territoire devient alors la somme des bilans GES de toutes les parcelles de ce territoire.

Chronologiquement, nous avons commencé par nous approprier le calculateur Ex-ACT. Celui-ci a ensuite été re-développé à l'identique, mais en réorganisant les données sous format PostgreSQL, et les calculs dans des fonctions pl/sql. Il a été choisi d'écrire les fonctions dans ce langage car il est très adapté pour manipuler les données. Or les calculs en eux-mêmes n'étant, on l'a montré, pas très complexes, les gains de performance étaient plutôt à chercher dans l'application rapide des fonctions à de nombreuses parcelles.

Partir d'un calculateur existant nous a permis d'effectuer une vérification des résultats de notre calculateur en version bêta. Nous avons ainsi pu créer des scénarios testés à la fois dans Ex-ACT et dans SeqCOI et s'assurer de la cohérence des résultats.

Ce premier embryon de calculateur a permis de lancer simultanément le développement de l'interface informatique. Pour celle-ci, il a été choisi, pour en assurer la disponibilité, d'en faire une application en ligne. Un cahier des charges spécifique a été rédigé. L'outil est disponible en ligne sur la plateforme SmartIS, qui regroupe plusieurs outils d'aide à la décision développés par le Cirad à La Réunion.

La conformité des équations et des données de référence avec les dernières recommandations du GIEC a ensuite été vérifiée, en se replongeant dans la documentation correspondante. Certains modules d'Ex-ACT, comme l'aquaculture, ont été retirés ; des processus ont été ajoutés ou modifiés. L'ensemble des processus retenus, ainsi que les équations correspondantes, sont présentés en section 2.

Chacun des trois territoires a été décrit en termes de sols, de climat, d'usages et de pratiques pour chacun de ces derniers. Les cartes ainsi obtenues ont été chargées en base de données et servent de base de calcul lors de l'utilisation de l'interface. Des données non spatiales ont également été récoltées pour spécifier, quand c'était possible, des valeurs locales pour les facteurs d'émissions. Ces données propres sont décrites en section 3.

Enfin, une session de test de l'outil a été organisée dans chaque territoire avec des utilisateurs cibles, afin de repérer et corriger les bugs, et de prendre en note leurs remarques et demandes d'évolution. Les demandes issues de ces sessions ainsi que de nos propres constats sont consignées en section 4.

## 2 CALCULATEUR

Cette section présente l'ensemble des calculs derrière l'outil SeqCOI. Une première partie explicite les principes généraux qui sous-tendent l'ensemble des calculs. Ensuite, les équations utilisées dans plusieurs compartiments sont présentées ; après quoi, une partie est consacrée à chaque compartiment du bilan de GES.

### 2.1 REMARQUES GÉNÉRALES

On l'a dit, simuler un scénario de changement d'usage implique nécessairement de postuler une dynamique temporelle pour les changements en question. Seules les dynamiques I et L (cf. page 8) sont actuellement disponibles dans le calculateur SeqCOI, avec par défaut une période d'implémentation de cinq ans pour la dynamique L. Toutefois, la structure informatique choisie permet d'ajouter simplement de nouvelles dynamiques. La version en ligne du calculateur utilise la trajectoire I. Outre la simplicité de compréhension, cela correspond également à la réalité de l'utilisation de l'outil par les aménageurs : les parcelles à réaffecter sont de suffisamment petite taille pour qu'on puisse considérer que le changement d'usage est effectué directement sur l'ensemble de la parcelle.

Considérer une dynamique de changement revient à se demander, chaque année, quelles surfaces supplémentaires ont changé d'usage. Cependant, les facteurs d'émissions appliqués à l'usage amont comme à l'usage aval sont indépendants de l'année du calcul. On peut donc, pour chaque équation, représenter le facteur temps par une multiplication qui n'intervient qu'à la fin du calcul. Pour simplifier la lecture, dans les équations présentées ci-dessous, celui-ci est représenté par la lettre *T* lorsqu'il est utilisé.

Conceptuellement, le bilan de GES d'un scénario de changement d'usage peut aussi être compris comme la somme des bilans annuels sur la période de comptabilisation, où seules les données d'activité changent d'année en année selon le scénario défini. C'est pourquoi les recommandations du GIEC pour les inventaires annuels de gaz à effet de serre du secteur AFAT restent pertinentes. Le calculateur SeqCOI est basé, pour la plupart de ses calculs, sur ces méthodes. Toutes les équations ci-dessous reprennent, quand cela est possible, les notations du rapport IPCC 2019, dont la référence est également précisée en rouge. Pour les mangroves, les calculs et notations proviennent du rapport IPCC 2014 et sont indiqués en vert. En reprenant l'outil Ex-ACT, nous avons également choisi de conserver certains processus non compris dans les équations du GIEC ; ces processus sont systématiquement indiqués en gris et la source des facteurs d'émissions correspondants est précisée.

Pour un usage ou un changement d'usage donné, il existe plusieurs *processus* physico-chimiques impactant, positivement ou négativement, le bilan GES. A chaque processus correspond une fonction informatique, qu'on peut comprendre comme une fonction mathématique : les valeurs nécessaires au calcul sont requêtées dans les tables de données correspondantes, puis, on leur applique les opérations nécessaires pour obtenir le résultat.

Par souci de lisibilité, les processus sont ensuite regroupés par *compartiments* d'intérêt, choisis de façon experte et volontairement différents de ceux proposés par le GIEC. Le compartiment « Annuelles », par exemple, regroupe tous les processus d'émissions ou d'absorption liés aux usages de cultures annuelles.

Les processus biophysiques considérés peuvent concerner des émissions de CO<sub>2</sub>, de N<sub>2</sub>O ou de CH<sub>4</sub> ; les quantités sont exprimées en tonnes de CO<sub>2</sub>-équivalent grâce aux pouvoirs de réchauffement global (PRG) calculés lors du sixième cycle d'évaluation du GIEC : 27 tCO<sub>2</sub>-éq/tCH<sub>4</sub> pour le CH<sub>4</sub>-non fossile, 273 tCO<sub>2</sub>-éq/tN<sub>2</sub>O pour le N<sub>2</sub>O (Forster *et al.* 2021). Pour le CO<sub>2</sub>, on distingue le CO<sub>2</sub> lié aux changements de biomasse, celui lié aux changements de carbone du sol, et les autres. Ces différents types d'émissions sont appelés *composantes*.

Le bilan GES d'un scénario se décompose donc en compartiments et en composantes. Pour comprendre le tableau de synthèse des GES proposé par le calculateur, il faut ajouter un dernier élément. Du point de vue d'un porteur de projet territorial, il n'est pas suffisant de connaître le bilan GES d'un scénario de changement d'usage, car cela n'indique pas, ni en quoi, ce bilan serait meilleur ou pire que celui d'une autre situation. Dans le cadre d'une prise de décision, ce qui est intéressant, c'est donc le bilan GES d'un scénario de changement d'usage des terres *en comparaison* d'une autre situation. Par défaut, l'outil SeqCOI utilise comme scénario de comparaison le statu quo, c'est-à-dire un scénario où aucun changement d'usage n'est effectué.

Le tableau de synthèse proposé se calcule de la manière suivante :

- Pour chaque parcelle, on calcule le bilan du *statu quo* sur la période de comptabilisation ;
- Pour chaque parcelle, si elle a changé d'usage, on calcule le nouveau bilan sur la même période ;
- On peut, pour le bilan sans et avec projet, calculer les totaux par compartiment et par composante ;
- Une différence entre le bilan avec projet et le bilan sans projet permet de comparer les deux.

C'est ainsi qu'on obtient le tableau de synthèse type tel que présenté en table 1. Les valeurs calculées par parcelle sont également injectées dans les cartes présentées sur l'interface web.

Les calculs étant identiques sur chaque parcelle, les équations présentées ci-après sont des équations génériques, par parcelle, dont la surface est représentée par le symbole  $S$ . Pour une parcelle donnée, le climat, le type de sol, l'usage, le continent, etc. sont connus ; tous les facteurs d'émissions ou autres intervenant dans les calculs, et dont les valeurs sont ventilées selon ces catégories, sont donc fixes. Nous avons donc fait le choix de ne pas rappeler la ventilation de chacun de ces facteurs, ce qui aurait impliqué un jeu d'indices alourdissant fortement la notation.

Composante	Flux brut (tCO <sub>2</sub> -eq)					GES (tCO <sub>2</sub> -eq)					Flux par an (tCO <sub>2</sub> -eq / an)		
						CO <sub>2</sub>			N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>			
	Sans	Avec	Bilan	Biomasse	Sol	Autre					Sans	Avec	Bilan
<b>Changements d'usages</b>													
Déforestation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Boisement	0	-114 083	-114 083	-73 408	-40 674	0	0	0	0	0	0	-5 704	-5 704
Changements d'usages agricoles	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Urbanisation des surfaces agricoles	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Agriculture</b>													
Cultures annuelles	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cultures pérennes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Riz inondé	304 094	304 094	0	0	0	0	0	0	0	0	15 205	15 205	0
Prairies	18 206	18 206	0	0	0	0	0	0	0	0	910	910	0
Intrants	1 012 360	1 012 360	0	0	0	0	0	0	0	0	50 618	50 618	0
<b>Élevage</b>													
	77 394	77 394	0	0	0	0	0	0	0	0	3 870	3 870	0
<b>Forêts</b>													
	10 235	13 569	3 334	0	0	0	0	865	2 469	512	678	167	167
<b>Zones côtières</b>													
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Total</b>													
Total	1 422 288	1 311 540	-110 749	-73 408	-40 674	0	865	2 469	71 114	65 577	-5 537	-5 537	-5 537
Total par ha	147.4	135.9	-11.5	-7.6	0.0	-4.2	0.1	0.3	7.4	6.8	-0.6	-0.6	-0.6
Total par ha/an	7.4	6.8	-0.6	-0.4	0.0	-0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tableau 1 – Tableau de synthèse des flux de GES : exemple

Le tableau précédent provient de l'interface du calculateur. Le scénario réalisé a été de convertir toutes les zones de sols nu en forêt à Madagascar. Les résultats sont organisés par composantes. Les trois premières colonnes donnent le flux total de gaz à effet de serre sans et avec le projet, ainsi que le bilan avec-sans. Ce bilan est ensuite détaillé par GES dans les cinq colonnes suivantes. Le bilan par an occupe les trois dernières colonnes.

## 2.2 EQUATIONS GÉNÉRALES

### 2.2.1 Changements de stocks de carbone de la biomasse

#### Equation 2.5

Pour chaque compartiment  $k$  de la biomasse (biomasse aérienne, biomasse souterraine, litière, bois mort), le changement de stock au sein du compartiment est calculé par différence entre la biomasse de l'usage final  $j$  et la biomasse de l'usage initial  $i$ . La biomasse pour chaque usage est calculée en multipliant la biomasse par hectare  $C$  par la surface  $S$  de la parcelle, de telle sorte que le changement de stock s'écrit :

$$\Delta C_{i \rightarrow j, k} = S \times (C_{j, k} - C_{i, k})$$

Le bilan total des changements de stocks de la biomasse s'écrit donc :

$$\Delta C_{i \rightarrow j} = \sum_{k \in K} (S \times (C_{j, k} - C_{i, k}))$$

$$CO_2 \text{ Biomasse} = \Delta C_{i \rightarrow j} \times \frac{-44}{12} = S \times \left( \sum_{k \in K} C_{j, k} - \sum_{k \in K} C_{i, k} \right) \times \frac{-44}{12} \quad (1)$$

où :

- $CO_2 \text{ Biomasse}$  est le total des émissions de  $CO_2$  liées au changement de biomasse, en  $tCO_2$  ;
- $\Delta C_{i \rightarrow j}$  est la différence de stock de carbone de la biomasse entre l'usage  $j$  et l'usage  $i$ , en  $tC$  ;
- $K = \{\text{biomasse aérienne, biomasse souterraine, bois mort, litière}\}$  ;
- $C_{i, k}$  représente la biomasse par unité de surface du sous-compartiment  $k$  de l'usage  $i$ , exprimée en  $tC \cdot ha^{-1}$ .

L'écriture finale retenue pour l'équation 1 est plus avantageuse : dans le cas où les biomasses par sous-compartiment ne sont pas disponibles, elle permet d'utiliser une biomasse totale, comme fournie par le GIEC. Le facteur  $\frac{-44}{12}$  correspond au ratio des masses moléculaires du  $CO_2$  et du C, et permet de passer de  $tC$  à des  $tCO_2$ .

### 2.2.2 Changements de stocks de carbone du sol

#### Equation 2.5, chapitre 5

En partant d'un niveau considéré à l'équilibre de matière organique du sol, on considère qu'il faut 20 ans pour que le taux de matière organique du sol parvienne à un nouvel équilibre après un changement d'usage ou de pratiques. On peut donc calculer, à partir des stocks de carbone initiaux et finaux, un taux de changement du stock de carbone organique du sol, qu'on applique sur la période et la surface adéquates :

$$\Delta C_{i \rightarrow j} = \frac{C_j - C_i}{20} \times T \times S \quad (2)$$

où  $C_i$  représente le stock de carbone par hectare dans le sol à l'équilibre sous l'usage  $i$ .

En réalité, pour les besoins de l'outil, on veut distinguer l'effet d'un changement d'usage de l'effet d'un changement de pratiques. Pour ce faire, on décompose le stock de carbone d'un usage :

$$C_i = SOC_{ref} \times F_{LU,i} \times F_{MG,i} \times F_{I,i}$$

où :

- $SOC_{ref}$  est le stock de carbone de référence pour un sol minéral sous végétation naturelle, pour le climat et le type de sol considéré, en  $tC \cdot ha^{-1}$  ;
- $F_{LU}$  est le facteur de changement de stock de carbone relatif pour un type d'usage, sans dimension ;
- $F_{MG}$  est le facteur de changement de stock de carbone relatif pour un mode de labour, sans dimension ;
- $F_I$  est le facteur de changement de stock de carbone relatif pour un mode de gestion des intrants, sans dimension ;

On peut donc décomposer le stock de carbone en une composante « usage » et une composante « pratiques » :

$$C_i = SOC_{ref} \times F_{LU,i} + SOC_{ref} \times F_{LU,i} \times (F_{MG,i} \times F_{I,i} - 1)$$

L'équation (2) se réécrit donc :

$$\begin{aligned} \Delta C_{i \rightarrow j} &= [SOC_{ref} \times F_{LU,j} + SOC_{ref} \times F_{LU,j} \times (F_{MG,j} \times F_{I,j} - 1) \\ &\quad - SOC_{ref} \times F_{LU,i} - SOC_{ref} \times F_{LU,i} \times (F_{MG,i} \times F_{I,i} - 1)] \times \frac{1}{20} \times T \times S \\ &= (SOC_{ref} \times F_{LU,j} - SOC_{ref} \times F_{LU,i}) \times \frac{1}{20} \times T \times S \\ &\quad + (SOC_{ref} \times F_{LU,j} \times (F_{MG,j} \times F_{I,j} - 1) - SOC_{ref} \times F_{LU,i} \times (F_{MG,i} \times F_{I,i} - 1)) \times \frac{1}{20} \times T \times S \end{aligned}$$

On obtient donc finalement, en appliquant le facteur  $\frac{-44}{12}$  pour convertir les tC perdues ou stockées en  $tCO_2$  émises ou absorbées :

$$CO_2 \text{ sol, total} = CO_2 \text{ sol, usage} + CO_2 \text{ sol, pratique, i} + CO_2 \text{ sol, pratique, j}$$

$$CO_2 \text{ sol, usage} = (SOC_{ref} \times F_{LU,j} - SOC_{ref} \times F_{LU,i}) \times \frac{1}{20} \times T \times S \times \frac{-44}{12} \quad (3)$$

$$CO_2 \text{ sol, pratique, i} = -SOC_{ref} \times F_{LU,i} \times (F_{MG,i} \times F_{I,i} - 1) \times \frac{1}{20} \times T \times S \times \frac{-44}{12} \quad (4)$$

$$CO_2 \text{ sol, pratique, j} = SOC_{ref} \times F_{LU,j} \times (F_{MG,j} \times F_{I,j} - 1) \times \frac{1}{20} \times T \times S \times \frac{-44}{12} \quad (5)$$

Dans le cas où des données locales sont disponibles pour un usage  $i$  donné, les stocks de carbone mesurés sous cet usage correspondent à  $SOC_{ref} \times F_{LU,i}$ . On peut ensuite, à partir de cet usage de référence, imaginer des scénarios alternatifs

## 2.2 Equations générales

de pratiques en modifiant les valeurs de  $F_{MG,i}$  et  $F_{I,i}$ . Pour les usages non agricoles, ces deux valeurs valent 1 et la composante « pratiques » est donc nulle.

La décomposition en trois équations peut sembler fastidieuse, mais elle permet de ventiler les émissions de CO<sub>2</sub> associées à des changements de carbone du sol dans plusieurs compartiments : une partie sera associée au changement d'usage (e.g. d'une annuelle vers une pérenne, compartiment : Changements d'usages agricoles), une partie sera associée aux pratiques adoptées sur l'usage initial (e.g. annuelle peu labourée et peu fertilisée, compartiment : Annuelles), et une dernière associée aux pratiques adoptées sur l'usage final (e.g. pérenne labourée et très fertilisée, compartiment : Pérennes).

### 2.2.3 N<sub>2</sub>O issu de la minéralisation de la MOS

#### Equation 11.8

Dans le cas où l'usage final présente des taux de matière organique du sol inférieurs à ceux de l'usage initial, la minéralisation de la matière organique implique également des émissions de protoxyde d'azote. L'effet d'un changement d'usage est calculé à partir de la même formule que précédemment, que l'on convertit en quantité d'azote grâce au rapport C/N et auxquels on applique les facteurs d'émissions adéquats :

$$N_2O_{\text{sol, usage}} = (SOC_{ref} \times F_{LU,j} - SOC_{ref} \times F_{LU,i}) \times \frac{1}{20} \times T \times S \times \left(\frac{N}{C}\right)_i \times (EF_1 + \text{Frac}_{Leach} \times EF_5) \times \frac{-44}{28} \quad (6)$$

où, en plus des notations précédentes :

- $EF_1$  est le facteur d'émission pour les émissions directes de N<sub>2</sub>O d'origine organique, en kgN<sub>2</sub>O-N.kgN<sup>-1</sup>;
- $\text{Frac}_{Leach}$  est le pourcentage d'azote lixivié;
- $EF_5$  est le facteur d'émission pour les émissions indirectes de N<sub>2</sub>O liées à la lixiviation, en kgN<sub>2</sub>O-N.(kg N lixivié)<sup>-1</sup>.

L'effet supplémentaire des changements de pratiques sur les émissions de N<sub>2</sub>O est considéré quantité négligeable.

### 2.2.4 Combustions

#### Equation 2.27

Le feu est un important processus émetteur de gaz à effet de serre, qui intervient dans plusieurs cas :

- Le feu peut être employé lors d'un changement d'usage, afin de remettre une parcelle « à zéro » avant d'implanter l'usage suivant (e.g. déforestation de type *slash and burn*). Dans ce cas, seules les émissions de N<sub>2</sub>O et de CH<sub>4</sub> sont comptabilisées, car les émissions de CO<sub>2</sub> sont déjà prises en compte dans les changements de stocks de la biomasse ;

- En agriculture, le feu peut être utilisé pour la gestion des résidus de culture. L'hypothèse de synchronicité, qui considère que le CO<sub>2</sub> dégagé est entièrement réabsorbé par la culture dans la même année, invite là encore à ne considérer que les émissions de N<sub>2</sub>O et de CH<sub>4</sub> ;
- Des feux naturels ou accidentels peuvent se déclencher sur les prairies ou dans les forêts gérées. Dans le cas des prairies, l'hypothèse de synchronicité peut s'appliquer également ; elle ne tient pas en tant que telle pour les forêts, mais on fait l'hypothèse qu'une grande partie du CO<sub>2</sub> émis est absorbé sur le temps de la période de comptabilisation.

Pour tous les cas, la formule générale est la suivante :

$$GES_{combustion} = S \times M_B \times C_f \times \frac{G_{ef}}{1000} \quad (7)$$

où :

- $GES_{combustion}$  désigne la quantité de CO<sub>2</sub>, de N<sub>2</sub>O ou de CH<sub>4</sub> émise lors de la combustion, en tGES ;
- $M_B$  est la quantité de carburant disponible pour la combustion, en tMS.ha<sup>-1</sup> ; selon les cas, elle inclut la biomasse aérienne, souterraine, le bois mort, la litière, les résidus...
- $C_f$  est la fraction de carburant consommée, sans dimension ;
- $G_{ef}$  est le facteur d'émission, en gGES.kgMS<sup>-1</sup>.

### 2.2.5 Equations spécifiques aux mangroves

Les émissions liées aux zones humides ont fait l'objet d'un rapport spécial du GIEC (IPCC 2014). C'est de là que les équations employées pour les mangroves ont été tirées. Les mangroves n'occupent qu'une petite part du territoire de l'île Rodrigues, mais la politique de replantation actuellement adoptée en fait un potentiel réservoir de carbone, et on a donc tenu à comptabiliser les émissions correspondantes. Les autres zones humides n'étant pas sujettes à évolution sur nos territoires d'études, elles n'ont pas été considérées.

#### 2.2.5.a Changements de stocks de carbone du sol

Dans le cas de la destruction d'une mangrove, on considère deux cas. Si la mangrove est détruite pour installer une surface artificialisée, on suppose qu'il y a *extraction*, auquel cas l'équation (3) s'applique comme pour les autres cas, en considérant le premier mètre de sol en lieu et place des 30cm habituels.

Dans les autres cas, on considère que la destruction de la mangrove se fait par drainage. La dynamique de changement du stock de carbone est différente (*Equation 4.8*).

$$CO_{2\text{ sol, drainage}} = S \times \min(C_i - C_j; T \times EF_{DR}) \times \frac{44}{12} \quad (8)$$

où :

## 2.3 Changements d'usage

- $C_i$  est le stock de carbone initial et non réfractaire sous mangrove, en considérant le premier mètre de profondeur, en  $tC.ha^{-1}$ ;
- $C_j$  est le stock de carbone sous l'usage final, en considérant les 30 premiers centimètres, en  $tC.ha^{-1}$ ;
- $EF_{DR}$  est un facteur d'émission pour le drainage des mangroves, en  $tC.ha^{-1}.an^{-1}$ .

Cette équation signifie qu'un rythme constant de perte de carbone du sol est appliqué, jusqu'à atteindre le stock de carbone du sol de l'usage final.

Dans les deux cas, 4% du carbone du sol est considéré réfractaire et est retranché du stock de carbone perdu lors de la destruction de la mangrove.

Dans le cas opposé d'une réhumectation ou de création de mangroves, l'équation est également différente (Equation 4.7) :

$$CO_{2 \text{ sol, réhumectation}} = S \times \min(-C_j; T \times EF_{RE}) \times \frac{44}{12} \quad (9)$$

où :

- $C_j$  est le stock de carbone final sous mangrove, en considérant le premier mètre de profondeur, en  $tC.ha^{-1}$ ;
- $EF_{RE}$  est un facteur d'émission pour la réhumectation et la création de mangroves, en  $tC.ha^{-1}.an^{-1}$ .

On applique donc un facteur constant de stockage de carbone dans le sol, jusqu'à que le stock sous mangrove soit atteint.

### 2.2.5.b $CH_4$ lors d'une remise en mangrove

La réhumectation de sols auparavant drainés entraîne le passage d'une décomposition aérobie à une décomposition anaérobie. Selon le niveau de salinité de l'eau utilisée lors de la réhumectation, cela peut entraîner des émissions de  $CH_4$  (Equation 4.9).

$$CH_{4 \text{ sol, réhumectation}} = S \times T \times \frac{EF_{REWET}}{1000} \quad (10)$$

où  $EF_{REWET}$  est un facteur d'émission en  $kgCH_4.ha^{-1}.an^{-1}$ .

## 2.3 CHANGEMENTS D'USAGE

Le bilan GES d'un changement d'usage correspond à l'ensemble des GES émis lors du passage de l'usage initial à l'usage final, sans prise en compte des GES spécifiques à l'usage initial et à l'usage final. Les recommandations du GIEC incluent ces émissions dans la catégorie de l'usage final. Par exemple, dans le cas d'une déforestation vers un usage agricole, les émissions liées à la perte de carbone de la biomasse et du sol forestier seraient comptabilisées dans le compartiment des usages agricoles. Nous avons fait le choix d'isoler ces processus, pour mieux mettre en valeur les parts respectives du changement d'usage et des usages dans le bilan GES.

Sont comptabilisés ici :

- Les différences de stocks de carbone de la biomasse ;
- Les différences de stocks de carbone du sol ;
- Le N<sub>2</sub>O émis directement et indirectement lors de la minéralisation de la matière organique ;
- Si les pratiques de changement d’usage incluent l’usage de brûlis, les émissions de CH<sub>4</sub> et de N<sub>2</sub>O associées à la combustion ;
- Si l’usage final est bâti, l’impact CO<sub>2</sub> de la construction de ce dernier ;
- Si l’usage final est une mangrove, la quantité de CH<sub>4</sub> émise lors de la réhumectation des zones auparavant drainées.

### 2.3.1 Déforestation

Ce compartiment regroupe tous les cas où une végétation forestière ou de mangrove est remplacée par un autre usage, que celui-ci soit agricole, pastoral ou urbain ; seuls les cas où l’usage final est une autre végétation forestière ou de mangrove (re-forestation) ne sont pas considérés ici.

Processus	GES impliqués			Méthode de calcul (GIEC)
	Biom.	CO <sub>2</sub> Sol	N <sub>2</sub> O Autre	
Changements de stocks de carbone de la biomasse	x			Eq. 2.5
Changements de stocks de carbone du sol		x		Eq. 2.5 ou 4.8
N <sub>2</sub> O issu de la minéralisation de la MOS			x	Eq. 11.8
Emploi de feu lors du changement d’usage			x	Eq. 2.27
Impact des nouvelles constructions			x	N.D.

Tableau 2 – Tableau de synthèse du compartiment Déforestation

#### 2.3.1.a Changements de stocks de carbone de la biomasse

L’équation (1) est utilisée. La biomasse utilisée pour la végétation naturelle initiale inclut la biomasse aérienne, souterraine, le bois mort et la litière, à laquelle on soustrait, le cas échéant, la quantité exportée en tant que bois récolté. Cette végétation initiale est supposée à son état climacique. La biomasse finale inclut la biomasse aérienne, souterraine, le bois mort et la litière de l’usage final après un an d’implantation de ce dernier.

En l’absence de données spécifiques, la biomasse finale lorsque l’usage est bâti est supposée nulle ; de même, la quantité de bois mort et de litière est supposée nulle pour l’usage final.

## 2.3 Changements d'usage

### 2.3.1.b Changements de stocks de carbone du sol

Dans le cas d'une forêt ou d'une mangrove excavée, on emploie l'équation (3). Dans le cas d'une mangrove drainée, on emploie l'équation (8). Par défaut, le stock de carbone du sol sous un usage bâti est supposé nul.

### 2.3.1.c N<sub>2</sub>O issu de la minéralisation de la MOS

L'équation (6) est utilisée.

### 2.3.1.d Emploi de feu lors du changement d'usage

L'équation (7) est employée ; conformément aux recommandations du GIEC, on considère que la biomasse combustible inclut la biomasse aérienne, la litière et le bois mort.

### 2.3.1.e Impact des nouvelles constructions

#### Calcul Ex-ACT

Il s'agit ici d'un calcul qui ne fait pas partie des recommandations du GIEC pour le secteur AFAT, mais qui permet d'avoir un ordre de grandeur, à titre de comparaison, des émissions de CO<sub>2</sub> liées à la construction d'un nouveau bâtiment. Le calcul est direct, en multipliant la surface construite par un facteur d'émission dépendant du type de construction. Les données par défaut sont issues de la Base Carbone de l'ADEME<sup>4</sup>.

## 2.3.2 Boisement

Ce compartiment regroupe tous les cas où l'usage final est une végétation forestière ou de mangrove, et où cette végétation est différente de celle de l'usage initial. On trouve ici les cas d'afforestation depuis une surface non boisée, mais aussi de reforestation, c'est-à-dire de remplacement d'un couvert forestier par un autre (e.g. dans le cadre d'une restauration écologique).

Processus	GES impliqués			Méthode de calcul (GIEC)
	Biom.	CO <sub>2</sub> Sol	N <sub>2</sub> O Autre	
Changements de stocks de carbone de la biomasse	x			Eq. 2.5
Changements de stocks de carbone du sol		x		Eq. 2.5 ou 4.7
Emploi de feu lors du changement d'usage			x	Eq. 2.27
CH <sub>4</sub> lors d'une remise en mangrove				x Eq. 4.9

Tableau 3 – Tableau de synthèse du compartiment Boisement

4. [https://bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD\\_DOC\\_FR/index.htm?batiments.htm](https://bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?batiments.htm), dernière consultation le 04/11/2022

*2.3.2.a Changements de stocks de carbone de la biomasse*

L'équation (1) est utilisée. La biomasse utilisée pour la végétation initiale inclut la biomasse aérienne, souterraine, le bois mort et la litière, à laquelle on soustrait, le cas échéant, la quantité exportée en tant que bois récolté. Quel que soit le type de végétation, naturelle ou anthropique, elle est considérée comme étant à son état climacique.

La biomasse utilisée pour la végétation finale inclut la biomasse aérienne, souterraine, le bois mort et la litière de la végétation naturelle finale. On considère la biomasse accumulée sur l'ensemble de la période de comptabilisation du projet.

*2.3.2.b Changements de stocks de carbone du sol*

L'équation (3) est utilisée lorsque ni l'usage final, ni l'usage initial est une mangrove. Si l'usage final est une mangrove, on emploie l'équation (9). Si l'usage initial est une mangrove, on emploie l'équation (8).

*2.3.2.c Emploi de feu lors du changement d'usage*

L'équation (7) est employée. Si la végétation initiale est naturelle, on considère que la biomasse combustible inclut la biomasse aérienne, la litière et le bois mort. Si l'usage initial est une prairie ou une culture, on considère que l'entièreté de la biomasse est combustible.

*2.3.2.d CH<sub>4</sub> lors d'une remise en mangrove*

L'équation (10) est employée.

**2.3.3 Changements d'usages agricoles**

On considère ici toutes les parcelles dont l'usage initial et l'usage final sont tous les deux des usages agricoles ou de prairies, différents l'un de l'autre.

Processus	Biom.	GES impliqués			Méthode de calcul (GIEC)
		CO <sub>2</sub> Sol	N <sub>2</sub> O Autre	CH <sub>4</sub>	
Changements de stocks de carbone de la biomasse	x				Eq. 2.5
Changements de stocks de carbone du sol		x			Eq. 2.5
N <sub>2</sub> O issu de la minéralisation de la MOS				x	Eq. 11.8
Emploi de feu lors du changement d'usage				x	Eq. 2.27

Tableau 4 – Tableau de synthèse du compartiment Changement d'usages agricoles

*2.3.3.a Changements de stocks de carbone de la biomasse*

L'équation (1) est utilisée. La biomasse utilisée pour la végétation initiale inclut la biomasse aérienne, souterraine, le bois mort et la litière, considérée comme étant à

## 2.3 Changements d'usage

son état climacique. La biomasse finale inclut la biomasse aérienne, souterraine, le bois mort et la litière de l'usage final après un an d'implantation de ce dernier.

### 2.3.3.b Changements de stocks de carbone du sol

L'équation (3) est utilisée.

### 2.3.3.c N<sub>2</sub>O issu de la minéralisation de la MOS

L'équation (6) est utilisée.

### 2.3.3.d Emploi de feu lors du changement d'usage

L'équation (7) est employée, en considérant que l'entièreté de la biomasse de l'usage initial est combustible.

## 2.3.4 Urbanisation des surfaces agricoles

Il s'agit ici de présenter les GES issus de la disparition de surfaces agricoles au profit de surfaces artificialisées.

Processus	GES impliqués				Méthode de calcul (GIEC)	
	Biom.	CO <sub>2</sub> Sol	Autre	N <sub>2</sub> O		CH <sub>4</sub>
Changements de stocks de carbone de la biomasse	x					Eq. 2.5
Changements de stocks de carbone du sol		x				Eq. 2.5
N <sub>2</sub> O issu de la minéralisation de la MOS				x		Eq. 11.8
Emploi de feu lors du changement d'usage				x	x	Eq. 2.27
Impact des nouvelles constructions			x			N.D.

Tableau 5 – Tableau de synthèse du compartiment Urbanisation des surfaces agricoles

### 2.3.4.a Changements de stocks de carbone de la biomasse

L'équation (1) est utilisée. La biomasse utilisée pour la végétation initiale inclut la biomasse aérienne, souterraine, le bois mort et la litière, considérée comme étant à son état climacique. La biomasse finale sous un usage bâti est par défaut considérée nulle.

### 2.3.4.b Changements de stocks de carbone du sol

L'équation (3) est utilisée. Par défaut, le stock de carbone du sol sous un usage bâti est supposé nul.

2.3.4.c *N<sub>2</sub>O issu de la minéralisation de la MOS*

L'équation (6) est utilisée. Par défaut, la matière organique du sol sous un usage bâti est supposée nulle.

2.3.4.d *Emploi de feu lors du changement d'usage*

L'équation (7) est employée, en considérant que l'entièreté de la biomasse de l'usage initial est combustible.

2.3.4.e *Impact des nouvelles constructions*

Même calcul qu'en section 2.3.1.e.

2.4 AGRICULTURE

Les émissions de gaz à effet de serre comptabilisées ici sont :

- Pour une culture donnée, si les pratiques de labour et de fertilisation diffèrent des pratiques de référence pour cette culture, le stockage ou déstockage de carbone du sol supplémentaire associé à ces pratiques ;
- Le cas échéant, les émissions de N<sub>2</sub>O et de CH<sub>4</sub> liées à la combustion des résidus de culture ;
- Le cas échéant, les émissions de N<sub>2</sub>O liées à la décomposition des résidus de culture incorporés ;
- Les émissions de gaz à effet de serre liées à l'application d'intrants ;
- Dans le cas du riz inondé, les émissions de CH<sub>4</sub> liées à la culture ;
- Dans le cas des pérennes, l'accumulation de biomasse liée à la croissance de la culture.

2.4.1 Cultures annuelles

Ce compartiment synthétise les GES émis par les cultures annuelles sur une parcelle, que cela corresponde à l'usage initial, à l'usage final, ou aux deux. Sont considérées ici toutes les cultures ou rotations dont la majorité de la biomasse est renouvelée annuellement. Cela inclut certaines cultures pluri-annuelles, comme la canne à sucre.

Processus	GES impliqués			Méthode de calcul (GIEC)
	Biom.	CO <sub>2</sub> Sol	N <sub>2</sub> O Autre	
Carbone du sol lié aux pratiques		x		Eq. 2.5
Combustion des résidus			x	Eq. 2.27
Incorporation des résidus			x	Eq. 11.2, 11.6 & 11.10

Tableau 6 – Tableau de synthèse du compartiment Cultures annuelles

## 2.4 Agriculture

### 2.4.1.a Carbone du sol lié aux pratiques

Si l'usage initial est une culture annuelle, on emploie l'équation (4). Si l'usage final est une culture annuelle, on emploie l'équation (5).

### 2.4.1.b Combustion des résidus

#### Equation table 11.2, équations 11.6 et 11.7

L'équation (7) est réemployée ici, en considérant comme combustible la totalité des résidus aériens de culture. La quantité de ces derniers est estimée, à défaut de données locales, selon deux méthodes fournies par le GIEC. La première méthode, donnée en équation (11), correspond à une estimation linéaire en fonction du rendement ; si des données manquent pour l'employer, la deuxième méthode, en équation (12), applique un ratio à ce rendement.

$$AG_{DM(T)} = Crop(T) \times Slope(T) + Intercept(T) \quad (11)$$

$$AG_{DM(T)} = Crop(T) \times R_{AG(T)} \quad (12)$$

Où :

- $AG_{DM(T)}$  est la quantité de résidus aériens de la culture T, exprimée en tMS.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> ;
- $Crop(T)$  est le rendement annuel de la culture T, exprimée en tMS.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> ;
- $Slope(T)$  est la pente de l'équation linéaire des résidus aériens selon le rendement, sans dimension ;
- $Intercept(T)$  est l'intercept de l'équation linéaire des résidus aériens selon le rendement, en tMS.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> ;
- $R_{AG(T)}$  est le ratio de la quantité de résidus aériens sur le rendement, sans dimension.

Le rendement annuel en tonnes de matière sèche est lui-même estimé à partir du rendement en matière fraîche :

$$Crop(T) = YieldFresh(T) \times DRY(T) \quad (13)$$

Où :

- $YieldFresh(T)$  est le rendement annuel de la culture T, exprimée en t.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> ;
- $DRY(T)$  est le taux de matière sèche de la culture T, en tMS.t<sup>-1</sup>.

### 2.4.1.c Incorporation des résidus

#### Equations 11.2, 11.6 et 11.10

Lorsque les résidus de culture sont laissés sur place et incorporés, mécaniquement ou biologiquement, leur décomposition entraîne des émissions directes et indirectes (par lixiviation) de N<sub>2</sub>O. La quantité de résidus aériens par hectare est estimée comme précédemment. On estime la quantité de résidus souterrains en appliquant le root-shoot ratio  $RS(T)$  :

$$BGR_T = (Crop(T) + AG_{DM(T)}) \times RS(T)$$

$$N_2O_{\text{incorp}} = (AG_{DM(T)} \times N_{AG(T)} + BGR_T \times N_{BG(T)}) \times (EF_1 + EF_5 \times Frac_{Leach}) \times \frac{44}{28} \times S \times T \quad (14)$$

où :

- $N_2O_{\text{incorp}}$  est la quantité de  $N_2O$  émise directement ou indirectement par l'incorporation des résidus de culture, en t;
- $AG_{DM(T)}$  est la quantité de résidus aériens de la culture T, exprimée en tMS.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>;
- $Crop(T)$  est le rendement annuel de la culture T, exprimée en tMS.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>;
- $RS(T)$  est le ratio de la biomasse souterraine sur la biomasse aérienne, toutes deux exprimées en tMS.ha<sup>-1</sup>;
- $BGR_T$  est la quantité de résidus souterrains de la culture T, exprimée en tMS.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>;
- $N_{AG(T)}$  est la quantité d'azote des résidus aériens pour la culture T, en kgN.kgMS<sup>-1</sup>;
- $N_{BG(T)}$  est la quantité d'azote des résidus souterrains pour la culture T, en kgN.kgMS<sup>-1</sup>;
- $EF_1$  est le facteur d'émission pour les émissions directes de  $N_2O$  d'origine organique, en kgN<sub>2</sub>O-N.kgN<sup>-1</sup>;
- $Frac_{Leach}$  est le pourcentage d'azote lixivié;
- $EF_5$  est le facteur d'émission pour les émissions indirectes de  $N_2O$  liées à la lixiviation, en kgN<sub>2</sub>O-N.(kg N lixivié)<sup>-1</sup>.

#### 2.4.2 Cultures pérennes

Ce compartiment synthétise les GES émis par les cultures pérennes sur une parcelle, que cela corresponde à l'usage initial, à l'usage final, ou aux deux. Les systèmes agroforestiers sont inclus dans les cultures pérennes si le taux de couverture arborée ne les classe pas parmi les forêts.

Processus	Biom.	GES impliqués			Méthode de calcul (GIEC)
		CO <sub>2</sub> Sol	Autre	N <sub>2</sub> O	
Carbone du sol lié aux pratiques		x			Eq. 2.5
Combustion des résidus				x	Eq. 2.27
Croissance des cultures pérennes	x				Section 5.2.1.2

Tableau 7 – Tableau de synthèse du compartiment Cultures pérennes

## 2.4 Agriculture

### 2.4.2.a Carbone du sol lié aux pratiques

Si l'usage initial est une culture pérenne, on emploie l'équation (4). Si l'usage final est une culture pérenne, on emploie l'équation (5).

### 2.4.2.b Combustion des résidus

L'équation (7) est réemployée ici, en considérant comme combustible une quantité renseignée par usage. Si aucune information n'est disponible, mais qu'on sait malgré tout que les résidus sont brûlés, il est supposé que 10 tonnes de matière sèche de résidus sont brûlés, une fois par an.

### 2.4.2.c Croissance des cultures pérennes

Si la biomasse atteinte après un an d'implantation, et le CO<sub>2</sub> absorbé correspondant, sont pris en compte dans le compartiment des changements d'usage, c'est la poursuite de la croissance des cultures pérennes qui est prise en compte ici. Pour ce faire, on applique un taux de croissance jusqu'à ce que la biomasse moyenne soit atteinte :

$$CO_{2\text{ pérennes}} = (\min(T \times (G_{AG} + G_{BG}), L_{mean}) - (G_{AG} + G_{BG})) \times \frac{-44}{12} \times S \quad (15)$$

où :

- $G_{AG}$  est le taux de croissance de la biomasse aérienne, en tC.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>;
- $G_{BG}$  est le taux de croissance de la biomasse souterraine, en tC.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>;
- $L_{mean}$  est la moyenne de la biomasse sur le cycle de la pérenne, en tC.ha<sup>-1</sup>.

### 2.4.3 Riz inondé

Ce compartiment synthétise les GES émis par les systèmes de riz inondé sur une parcelle, que cela corresponde à l'usage initial, à l'usage final, ou aux deux. On considère comme système de riz inondé tous les systèmes où cette culture est présente annuellement. Le riz pluvial est considéré comme une culture annuelle.

Processus	GES impliqués			Méthode de calcul (GIEC)
	Biom.	CO <sub>2</sub> Sol	N <sub>2</sub> O Autre	
Méthane des rizières				Eq. 5.1 à 5.3
Combustion des résidus				Eq. 2.27

Tableau 8 – Tableau de synthèse du compartiment Riz inondé

2.4.3.a Méthane des rizières

Equations 5.1, 5.2 et 5.3

Les émissions de CH<sub>4</sub> des rizières sont estimées à partir d'un facteur d'émission composite.

$$CH_4 \text{ riz} = \frac{EF_c}{1000} \times SF_w \times SF_p \times \left( 1 + \sum_i ROA_i \times CFOA_i \right)^{0.59} \times t \times T \times S \quad (16)$$

où :

- $CH_4 \text{ riz}$  est la quantité totale de CH<sub>4</sub> émise sur la parcelle sur la période de comptabilisation ;
- $EF_c$  est le facteur d'émission par défaut pour une parcelle inondée en continu et sans amendements organiques, en kgCH<sub>4</sub>.ha<sup>-1</sup>.j<sup>-1</sup> ;
- $SF_w$  est un facteur d'ajustement pour prendre en compte les différences de gestion de l'eau pendant la période de culture, sans dimension ;
- $SF_p$  est un facteur d'ajustement pour prendre en compte les différences de gestion de l'eau avant la période de culture, sans dimension ;
- $ROA_i$  est la quantité appliquée de l'amendement organique  $i$ , en matière sèche pour la paille et en matière fraîche pour les autres amendements, en t.ha<sup>-1</sup> ;
- $CFOA_i$  est le facteur de conversion pour l'amendement organique  $i$  ;
- $t$  est la durée de la période de culture du riz, exprimée en jours.

2.4.3.b Combustion des résidus

L'équation (7) est réemployée ici, en considérant comme combustible la paille restante après récolte. Si aucune information n'est disponible, cette quantité est estimée à 5.5 t.ha<sup>-1</sup>.

2.4.4 Prairies

Ce compartiment synthétise les GES émis par les systèmes pastoraux sur une parcelle, que cela corresponde à l'usage initial, à l'usage final, ou aux deux. Cela correspond aux prairies de long-terme, les prairies de court-terme entrant dans les systèmes de cultures annuelles.

Seuls les feux, qu'ils soient d'origine naturelle ou anthropique, ont été pris en compte ici. Les recommandations du GIEC impliquent également de prendre en compte le carbone supplémentaire stocké ou déstocké selon les pratiques d'intrants et le niveau de dégradation, mais devant la difficulté d'obtenir des informations spatialisées sur ce dernier, il a été fait le choix de laisser de côté cet aspect. Cela revient à supposer que les prairies ne sont ni dégradées, ni améliorées.

Quant aux GES liés aux feux, l'équation (7) est réemployée ici, en considérant comme combustible la biomasse aérienne de la prairie. Celle-ci est éventuellement ajustée selon la fréquence des feux.

## 2.4 Agriculture

Processus	GES impliqués			N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	Méthode de calcul (GIEC)
	Biom.	CO <sub>2</sub> Sol	Autre			
Feux de prairies				x	x	Eq. 2.27

Tableau 9 – Tableau de synthèse du compartiment Prairies

### 2.4.5 Intrants

On regroupe ici toutes les émissions liées à l'application d'intrants, sur l'usage initial comme sur l'usage final, pour tous les usages agricoles cités dans les sections précédentes. Les intrants considérés sont les fertilisants organiques et inorganiques, ainsi que les produits phytosanitaires et les amendements calcaires. Trois types d'émissions sont associées à l'application d'intrants sur les surfaces cultivées.

Sont également considérées les émissions liées à la consommation d'énergie, et, le cas échéant, celles liées à l'installation d'un système d'irrigation.

Processus	GES impliqués			N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	Méthode de calcul (GIEC)
	Biom.	CO <sub>2</sub> Sol	Autre			
CO <sub>2</sub> direct de l'application d'intrants			x			Eq. 11.12 & 11.13
N <sub>2</sub> O direct et indirect de l'application d'intrants				x		Eq. 11.1, 11.3 & 11.9
Tansport des intrants			x			N.D.
Consommation d'électricité			x			N.D.
Consommation de carburants			x			N.D.
Implantation de systèmes d'irrigation			x			N.D.

Tableau 10 – Tableau de synthèse du compartiment Intrants

#### 2.4.5.a Emissions directes de CO<sub>2</sub> liées à l'applications d'intrants

##### Equations 11.12 et 11.13

Les amendements calcaires (dolomie, chaux ou autre) ainsi que l'urée sont des composés carbonés, dont l'application est donc directement émettrice de CO<sub>2</sub>. Le calcul est direct :

$$CO_2 \text{ direct intrants} = \sum_i (EF_i \times M_i) \times T \times S \quad (17)$$

où :

- $EF_i$  est le facteur d'émission pour l'intrant  $i$ , en tC.t<sup>-1</sup>;

- $M_i$  est la dose moyenne annuelle appliquée pour l'intrant  $i$ , en  $t \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ . Dans notre calculateur, l'urée est renseignée en  $tN \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ , aussi un facteur de conversion de  $\frac{60}{28}$  est appliqué pour retrouver des  $t \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ .

#### 2.4.5.b Emissions directes et indirectes de $N_2O$ liées à l'application d'intrants

##### Equations 11.1, 11.3 et 11.9

L'application d'engrais azotés induit des émissions directes de  $N_2O$ , ainsi que des émissions indirectes associées à la volatilisation et à la lixiviation de l'azote.

$$N_2O_{\text{intrants}} = \sum_i (M_i \times (EF_{1,i} + \text{Frac}_{GAS,i} \times EF_4 + \text{Frac}_{Leach} \times EF_5)) \times \frac{44}{28} \times T \times S$$

(18)

où :

- $M_i$  est la dose moyenne annuelle appliquée pour l'intrant  $i$ , en  $tN \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ ;
- $EF_{1,i}$  est le facteur d'émission direct pour l'intrant  $i$ , en  $kgN_2O-N \cdot kgN^{-1}$ ;
- $\text{Frac}_{GAS,i}$  est la part d'azote appliqué qui est volatilisée, en  $(kgNH_3-N + kgNO_x-N) \cdot kgN^{-1}$ ;
- $EF_4$  est le facteur d'émission pour les émissions indirectes liées à la volatilisation, en  $kgN_2O-N \cdot (kgNH_3-N + kgNO_x-N)^{-1}$ ;
- $\text{Frac}_{Leach}$  est la part d'azote appliqué qui est lixiviée, en  $kgN \cdot kgN^{-1}$ ;
- $EF_5$  est le facteur d'émission pour les émissions indirectes liées à la lixiviation, en  $kgN_2O-N \cdot kgN^{-1}$ .

#### 2.4.5.c Impact carbone indirect lié au transport des intrants

##### Calcul Ex-ACT

Pour tous les intrants répertoriés (amendements calcaires, engrais azotés et non-azotés, produits phytosanitaires), un facteur d'émission permet d'estimer les émissions supplémentaires liées au transport des intrants :

$$CO_2_{\text{indirect intrants}} = \sum_i (EF_i \times M_i) \times T \times S$$

(19)

où :

- $EF_i$  est le facteur d'émission pour l'intrant  $i$ , en  $tCO_2_{\text{éq}} \cdot t^{-1}$ . Les facteurs d'émissions sont tirés de Lal 2004, Table 5 valeur moyenne convertie en  $tCO_2_{\text{éq}}$  par le facteur  $\frac{44}{12}$ ;
- $M_i$  est la dose moyenne annuelle appliquée pour l'intrant  $i$ , en  $t \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ .

## 2.4 Agriculture

### 2.4.5.d Impact carbone de la consommation d'électricité

#### Calcul Ex-ACT

La consommation d'électricité liée à la production agricole (e.g. utilisation d'une pompe) sont dépendantes des sources d'énergie utilisées pour le mix électrique de chaque zone. A défaut d'information plus précise, des facteurs d'émissions nationaux sont employés.

$$CO_2 \text{ électricité} = EF \times M \times \left(1 + \frac{L}{100}\right) \times T \times S \quad (20)$$

où :

- $EF$  est le facteur d'émission pour l'électricité, en  $tCO_2 \text{ éq.} \cdot MWh^{-1}$ . Les facteurs d'émissions sont tirés d'EX-ACT, d'après des données de l'Agence Internationale de l'Energie.
- $M$  est la quantité annuelle d'électricité consommée, en  $MWh \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ ;
- $L$  est le pourcentage d'électricité perdue entre la production et la consommation. Par défaut,  $L$  est estimé à 10%.

### 2.4.5.e Consommation de carburants

#### Calcul Ex-ACT

Les carburants et combustibles brûlés pour la production agricole sont directement émetteurs de gaz à effet de serre :

$$CO_2 \text{ carburants} = \sum_i (EF_i \times M_i) \times T \times S \quad (21)$$

où :

- $EF_i$  est le facteur d'émission pour le carburant ou combustible  $i$ , en  $tCO_2 \text{ éq.} \cdot m^{-3}$  ( $tCO_2 \text{ éq.} \cdot tMS^{-1}$  pour le bois). Les facteurs d'émissions sont tirés d'EX-ACT, d'après des sources diverses.
- $M_i$  est la quantité annuelle consommée du carburant ou combustible  $i$ , en  $m^3 \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$  (ou  $tMS \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$  pour le bois).

### 2.4.5.f Impact carbone de l'implantation de système d'irrigation

#### Calcul Ex-ACT

Si l'usage final nécessite l'implantation d'un système d'irrigation, l'impact carbone de cette opération est estimée forfaitairement en fonction de la surface à irriguer :

$$CO_2 \text{ irrigation} = EF \times S \quad (22)$$

où  $EF$  est un facteur d'émission en  $tCO_2 \text{ éq.}$ , tiré de la Table 3 de Lal 2004.

## 2.5 ELEVAGE

Les émissions de gaz à effet de serre comptabilisées ici sont :

- Les émissions de CH<sub>4</sub> liées à la fermentation entérique ;
- Les émissions de CH<sub>4</sub> liées à la gestion des effluents ;
- Les émissions *directes* de N<sub>2</sub>O liées à la gestion des effluents ;
- Les émissions *indirectes* de N<sub>2</sub>O liées au dépôt et à la lixiviation des effluents, selon leur mode de gestion.

Il est à noter que le pâturage et l'excrétion directe d'azote sur les prairies qui en résulte sont considérés comme un mode de gestion des effluents comme les autres. Les émissions de N<sub>2</sub>O résultantes, directes et indirectes, sont donc comptabilisées dans le poste Elevage, contrairement à la référence du GIEC où elles sont comptabilisées dans les émissions des sols cultivés.

Processus	GES impliqués			Méthode de calcul (GIEC)
	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	
	Biom.	Sol	Autre	
CH <sub>4</sub> lié à la fermentation entérique				x Eq. 10.19 & 10.20
CH <sub>4</sub> de la gestion des effluents				x Eq. 10.22 & 10.22A
N <sub>2</sub> O direct de la gestion des effluents				x Eq. 10.25 & 10.30
N <sub>2</sub> O indirect de la gestion des effluents				x Eq. 10.26 à 10.29

Tableau 11 – Tableau de synthèse du compartiment Elevage

2.5.1 CH<sub>4</sub> lié à la fermentation entérique*Equations 10.20 et 10.19*

Pour chaque espèce, et selon le niveau de productivité des systèmes d'élevage, on applique un facteur d'émission directement au nombre de têtes concernées :

$$CH_{4 \text{ Enteric}} = \sum_{i,P} \left( \frac{EF_{i,P}}{1000} \times T \times N_{i,P} \right) \quad (23)$$

Où :

- $CH_{4 \text{ Enteric}}$  est le total des émissions liées à la fermentation entérique des animaux, en tCH<sub>4</sub>.yr<sup>-1</sup> ;
- $i$  est une catégorie d'animaux (e.g. vaches laitières, poulets) ;
- $P$  est un niveau de productivité ;

- $EF_{i,P}$  est le facteur d'émission de la fermentation entérique pour la catégorie d'animaux  $i$  et le niveau de productivité  $P$ , en  $\text{kgCH}_4.\text{yr}^{-1}$ , il est divisé par 1000 pour obtenir des  $\text{tCH}_4.\text{yr}^{-1}$ ;
- $N_{i,P}$  est le nombre de têtes pour la catégories d'animaux  $i$  et le niveau de productivité  $P$ ; ce nombre évolue en fonction du temps selon le scénario choisi.

### 2.5.2 CH<sub>4</sub> de la gestion des effluents

#### Equations 10.22 et 10.22A

Le mode de gestion des effluents influe sur la quantité de méthane émise lors de l'accumulation et du traitement des effluents d'élevage.

$$CH_4 \text{ MMS} = \sum_{i,M,P} \left[ (T \times N_{i,P} \times VS_{i,P}) \times AWMS_{i,M,P} \times \frac{EF_{i,M,P}}{1000} \right]$$

Le calcul de  $VS_{i,P}$ , la quantité annuelle d'excrétions pour la catégorie d'animaux  $i$  et le niveau de productivité  $P$ , peut se décomposer, ce qui donne :

$$CH_4 \text{ MMS} = \sum_{i,M,P} \left[ \left( T \times N_{i,P} \times \left( 365 \times VS_{rate(i,P)} \times \frac{TAM_{i,P}}{1000} \right) \right) \times AWMS_{i,M,P} \times \frac{EF_{i,M,P}}{1000} \right] \quad (24)$$

Où :

- $CH_4 \text{ MMS}$  est le total des émissions de méthane liées à la gestion des effluents animaux, en  $\text{tCH}_4.\text{yr}^{-1}$
- $N_{i,P}$  est le nombre de têtes pour la catégories d'animaux  $i$  et le niveau de productivité  $P$ ; ce nombre évolue en fonction du temps selon le scénario choisi;
- $VS_{rate(i,P)}$  est le taux quotidien d'excrétions, en  $\text{kgVS.tAnimal}^{-1}.\text{jour}^{-1}$ , multiplié par 365, il devient un taux annuel en  $\text{kgVS.tAnimal}^{-1}.\text{an}^{-1}$ ;
- $TAM_{i,P}$  est la masse typique d'un animal, en kg, divisée, par 1000, elle devient une masse en tonnes; la multiplication de ces trois premiers termes donne une quantité annuelle totale d'excréments volatiles pour la catégorie d'animaux  $i$  et le niveau de productivité  $P$ ;
- $AWMS_{i,M,P}$  est le pourcentage d'animaux de la catégorie  $i$  et du niveau de productivité  $P$  concerné par le système de gestion des effluents M;
- $EF_{i,M,P}$  est le facteur d'émission du méthane pour le système de gestion des effluents M, la catégorie d'animaux  $i$  et le niveau de productivité  $P$ .

L'interprétation de cette équation est la suivante : pour une catégorie d'animal et un niveau de productivité donné, on calcule une quantité totale d'effluents par an; cette quantité est ventilée par système de gestion des effluents, ce qui permet d'appliquer le facteur d'émission approprié.

### 2.5.3 N<sub>2</sub>O direct de la gestion des effluents

*Equations 10.25 et 10.30*

Le calcul est largement similaire à celui de la section précédente.

$$N_2O_{MMS \text{ dir}} = \sum_{i,M,P} \left[ (T \times N_{i,P} \times N_{ex(i,P)}) \times AWMS_{i,M,P} \times \frac{EF_{i,M,P}}{1000} \right] \times \frac{44}{28}$$

Le calcul de  $N_{ex(i,P)}$ , la quantité annuelle d'azote des excréments pour la catégorie d'animaux  $i$  et le niveau de productivité  $P$ , peut se décomposer, ce qui donne :

$$N_2O_{MMS \text{ dir}} = \sum_{i,M,P} \left[ \left( T \times N_{i,P} \times \left( 365 \times N_{rate(i,P)} \times \frac{TAM_{i,P}}{1000} \right) \right) \times AWMS_{i,M,P} \times \frac{EF_{i,M,P}}{1000} \right] \times \frac{44}{28} \quad (25)$$

- $N_2O_{MMS \text{ dir}}$  est le total des émissions directes de protoxyde d'azote liées à la gestion des effluents animaux, en tN<sub>2</sub>O.yr<sup>-1</sup>
- $N_{i,P}$  est le nombre de têtes pour la catégories d'animaux  $i$  et le niveau de productivité  $P$ ; ce nombre évolue en fonction du temps selon le scénario choisi;
- $N_{rate(i,P)}$  est le taux quotidien d'excrétion d'azote, en kgN.tAnimal<sup>-1</sup>.jour<sup>-1</sup>, multiplié par 365, il devient un taux annuel en kgN.tAnimal<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>;
- $TAM_{i,P}$  est la masse typique d'un animal, en kg, divisée, par 1000, elle devient une masse en tonnes; la multiplication de ces trois premiers termes donne une quantité annuelle totale d'azote excrété pour la catégorie d'animaux  $i$  et le niveau de productivité  $P$ ;
- $AWMS_{i,M,P}$  est le pourcentage d'animaux de la catégorie  $i$  et du niveau de productivité  $P$  concerné par le système de gestion des effluents  $M$ ;
- $EF_{i,M,P}$  est le facteur d'émission direct du protoxyde d'azote pour le système de gestion des effluents  $M$ , la catégorie d'animaux  $i$  et le niveau de productivité  $P$ .

### 2.5.4 N<sub>2</sub>O indirect de la gestion des effluents

*Equations 10.26, 10.27, 10.28 et 10.29*

En notant  $N_{tot(i,P)}$  la quantité  $\left( T \times N_{i,P} \times \left( 365 \times N_{rate(i,P)} \times \frac{TAM_{i,P}}{1000} \right) \right)$ , soit la quantité annuelle totale d'azote excrété pour la catégorie d'animaux  $i$  et le niveau de productivité  $P$ , on considère qu'une partie de cet azote est volatilisé sous forme de NH<sub>3</sub> et de NO<sub>x</sub> pendant la gestion des effluents, et qu'une autre partie est lixiviée. Le total des émissions indirectes associées s'écrit donc :

$$N_2O_{MMS \text{ ind}} = (N_2O_{G(mm)} + N_2O_{(mm)}) \times \frac{1}{1000} \\ = (N_{volatilization-MMS} \times EF_4 + N_{leaching-MMS} \times EF_5) \times \frac{44}{28} \times \frac{1}{1000} \quad (26)$$

$$N_2O_{MMS\ ind} = \sum_{i,M,P} \left[ N_{tot}(i,P) \times AWMS_{i,M,P} \times (Frac_{GasMS}(i,M) \times EF_4 + Frac_{LeachMS}(i,M) \times EF_5) \right] \times \frac{44}{28} \times \frac{1}{1000} \quad (27)$$

Où :

- $N_2O_{MMS\ ind}$  est le total des émissions indirectes de protoxyde d'azote liées à la gestion des effluents animaux, en  $tN_2O.yr^{-1}$ ;
- $N_2O_{G(mm)}$  est le total des émissions indirectes de  $N_2O$  liées à la volatilisation / redéposition de l'azote issu des effluents animaux, en  $kgN_2O.yr^{-1}$ ;
- $N_2O_{L(mm)}$  est le total des émissions indirectes de  $N_2O$  liées à la lixiviation de l'azote issu des effluents animaux, en  $kgN_2O.yr^{-1}$ ;
- $N_{volatilization-MMS}$  est la quantité d'azote volatilisé annuellement, en  $kgN.yr^{-1}$ ;
- $EF_4$  est le facteur d'émission pour l'azote volatilisé, en  $kgN_2O-N.(kg\ NH_3-N + NO_x-N\ volatilisé)^{-1}$
- $N_{leaching-MMS}$  est la quantité d'azote lixivié annuellement, en  $kgN.yr^{-1}$ ;
- $EF_5$  est le facteur d'émission pour l'azote lixivié, en  $kgN_2O-N.(kg\ N\ lixivié)^{-1}$
- $AWMS_{i,M,P}$  est le pourcentage d'animaux de la catégorie  $i$  et du niveau de productivité  $P$  concerné par le système de gestion des effluents  $M$ ;
- $Frac_{GasMS}(i,M)$  est la fraction d'azote volatilisé pour la catégorie d'animaux  $i$  dans le système de gestion des effluents  $M$ , en  $(kg\ NH_3-N + NO_x-N\ volatilisé).(kg\ N\ excrété)^{-1}$
- $Frac_{LeachMS}(i,M)$  est la fraction d'azote volatilisé pour la catégorie d'animaux  $i$  dans le système de gestion des effluents  $M$ , en  $(kg\ N\ lixivié).(kg\ N\ excrété)^{-1}$ .

## 2.6 FORETS

Les forêts gérées par l'homme peuvent être soumises à des feux, d'origine anthropique ou naturelle, que les pratiques de gestion peuvent favoriser ou non. Ce compartiment comptabilise les émissions de  $N_2O$  et de  $CH_4$  liées à ces incendies.

L'équation 7 est ré-employée ici, en considérant combustibles la biomasse aérienne, souterraine, le bois mort et la litière. Deux facteurs supplémentaires sont pris en compte : la périodicité des feux de forêts, en années, permet de déterminer combien de feux en moyenne auront lieu sur une parcelle pendant la période de comptabilisation ; l'impact, en %, vient moduler la quantité de biomasse réellement affectée en moyenne.

## 2.7 ZONES CÔTIÈRES

Ce compartiment comptabilise les émissions des changements d'états de la mangrove, quand ces changements ne s'accompagnent pas de changements d'usages. Cela peut concerner, par exemple, un changement de régime hydrique en amont d'une mangrove. Sont également comptabilisées les créations de mangroves sur des surfaces prises sur la mer, ne relevant auparavant pas de l'usage des terres.

Processus	GES impliqués			N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	Méthode de calcul (GIEC)
	Biom.	CO <sub>2</sub> Sol	Autre			
CH <sub>4</sub> des feux de forêts					x	Eq. 2.27
N <sub>2</sub> O des feux de forêts				x		Eq. 2.27

Tableau 12 – Tableau de synthèse du compartiment Forêts

Processus	GES impliqués			N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	Méthode de calcul (GIEC)
	Biom.	CO <sub>2</sub> Sol	Autre			
Changements de stocks de carbone de la biomasse	x					Eq. 2.5
Changements de stocks de carbone du sol		x				Eq. 4.7 ou 4.8
CH <sub>4</sub> lors d'une remise en mangrove					x	Eq. 4.9

Tableau 13 – Tableau de synthèse du compartiment Zones côtières

### 2.7.1 Changements de stocks de carbone de la biomasse

L'équation 1 est utilisée. La biomasse comptabilisée pour les mangroves regroupe la biomasse aérienne, souterraine, le bois mort et la litière. Dans le cas d'un drainage de mangrove, on considère cette biomasse au stade climacique comme la biomasse initiale, et on considère une biomasse finale nulle. Dans le cas d'une réhumectation ou d'une nouvelle plantation, on considère une biomasse initiale nulle, et la biomasse finale des mangroves est calculée selon leur taux de croissance annuelle.

### 2.7.2 Changements de stocks de carbone du sol

On emploie l'équation 8 dans le cas d'un drainage, et l'équation 9 dans le cas d'une réhumectation ou d'une nouvelle plantation.

### 2.7.3 CH<sub>4</sub> lors d'une remise en mangrove

L'équation 10 est utilisée.

---

## 3 DONNÉES

### 3.1 BASE DE DONNÉES ET DONNÉES DE BASE

Les calculs présentés ci-dessus font appel à un grand nombre de facteurs d'émissions, eux-mêmes parfois calculés à partir d'autres données. Afin d'assurer le fonctionnement du calculateur sur l'ensemble des territoires étudiés, et sur les futurs territoires étudiés, nous nous sommes assurés d'inclure systématiquement les données de référence fournies par les recommandations du GIEC. Cette sous-section revient sur les principes d'organisation adoptés pour la base de données correspondante.

Les données de référence du GIEC sont organisées selon des grandes catégories : six types de sols, douze types de climats, quinze types de systèmes de gestion des effluents d'élevage... Ces catégories peuvent être croisées pour une donnée particulière. Ainsi, le stock de carbone par défaut sous végétation naturelle est donné selon le type de sol et le climat.

Pour reprendre ces données sous la forme d'une base, nous avons considéré ces grandes catégories comme des *clés*. Chaque catégorie fait ainsi l'objet d'une table particulière. Une table est ensuite créée pour chaque intersection de catégories nécessaire. Dans l'exemple précédent, nous avons une table pour les types de sols, une table pour les types de climats, et une table croisant chaque type de sol avec chaque type de climat pour donner le stock de carbone correspondant. Les identifiants uniques (*clés primaires*) des tables catégorielles servent de *clés étrangères* dans les tables de croisement.

Ce choix a eu deux conséquences d'importance. D'abord, il faut souligner que cela a permis de réduire le nombre de tables dans la base de données. En effet, certaines tables des recommandations du GIEC partagent les mêmes clés. Par exemple, les tables 10A.6 à 10A.9 (chapitre *Livestock*) peuvent être concaténées. Les données de base (GIEC + autres sources pour les intrants...) ont été regroupées en trente-six tables.

Ensuite, il a parfois fallu harmoniser les données pour retomber sur les catégories de base, car certaines tables du GIEC fournissent des données pour des catégories agrégées. Par exemple, certaines données sont fournies pour le climat « Tropical » ; elles ont été reventilées dans les climats « Tropical Wet », « Tropical Moist », « Tropical Dry » et « Tropical Montane ». Si la plupart de ces harmonisations ont été assez intuitives, il faut souligner un cas particulier, celui des régions. Pour plusieurs données, les catégories utilisées relèvent de frontières régionales, mais celles-ci ne sont pas harmonisées tout le long des recommandations. On trouve ainsi des données de végétation pour la région Afrique, et des données d'élevage pour la région Proche-Orient et Afrique du Nord. Afin de ne pas multiplier les catégories de type « région », elles ont toutes été ramenées à la nomenclature des 22 sous-régions définies par la FAO, dont la définition est disponible sur le site de FAOSTAT<sup>5</sup>.

A cette base de données ont été ajoutées les tables correspondant aux données Tier2, ainsi que plusieurs tables utilitaires, comme par exemple une table contenant les constantes de calcul les plus utilisées (e.g. les PRG). Au total, le schéma correspondant contient actuellement 47 tables. Le schéma physique est consultable en Annexe A.

---

5. <https://www.fao.org/faostat/fr/#definitions>, consulté le 07/12/2022

### 3.2 CONTEXTE PÉDO-CLIMATIQUE

Mis à part les régions, dont les limites correspondent à des limites administratives, deux des catégories structurant la base de données, et donc, le calculateur, devaient être situées spatialement, et ce, le plus finement possible. Nous avons donc cherché à obtenir des cartes du climat et des sols de chaque territoire.

#### 3.2.1 Cartes des climats

Pour les trois territoires, nous avons choisi de conserver la classification des climats du GIEC, tout en utilisant des données locales pour affiner spatialement les types de climats attribués. Pour ce faire, nous avons appliqué l'arbre de décision fourni par les recommandations du GIEC (IPCC 2019, figure 1)

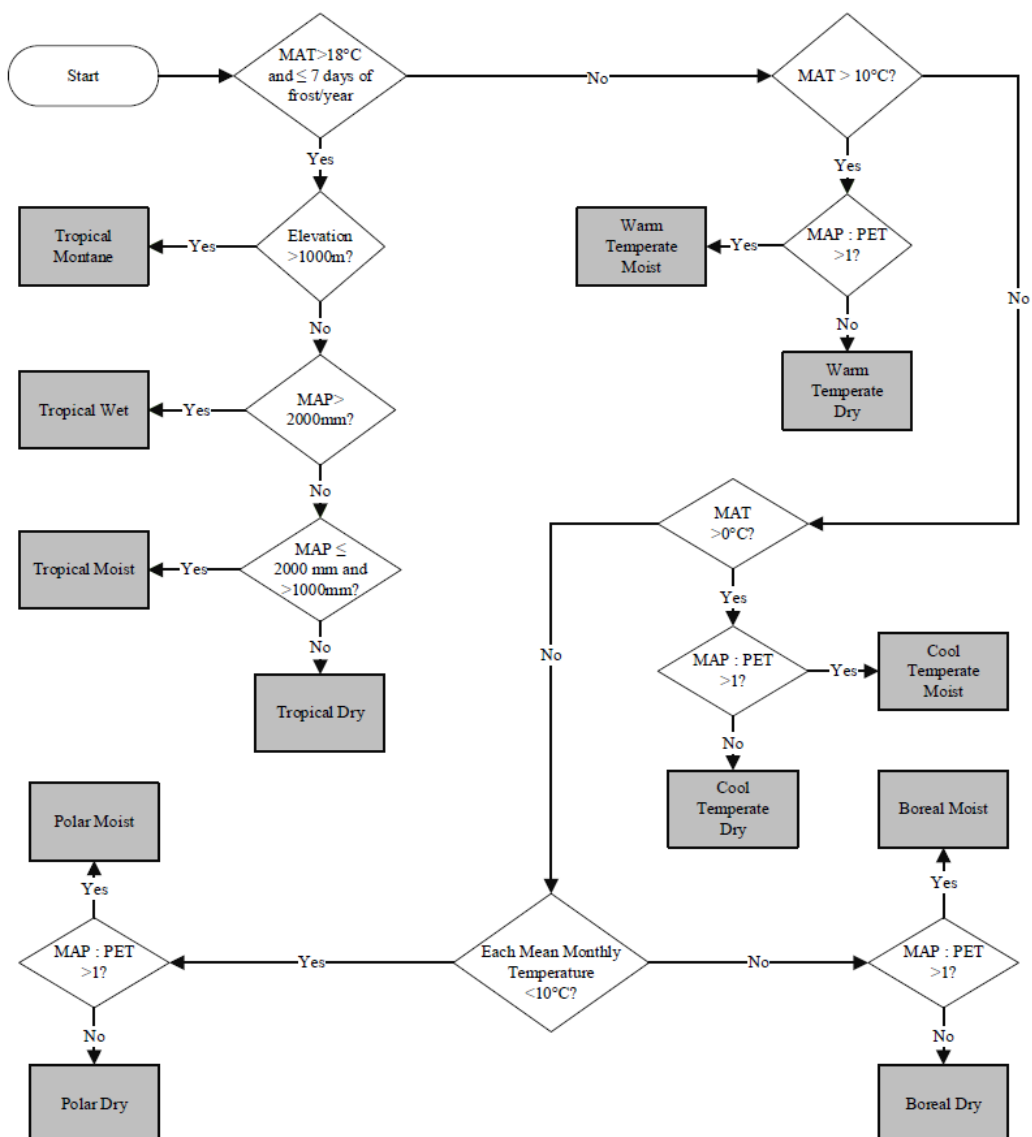


Figure 1 – Arbre de décision pour la classification des climats

### 3.2 Contexte pédo-climatique

L'application de cet arbre de décision demande de disposer de la température moyenne annuelle (MAT), des précipitations annuelles moyennes (MAP), de l'altitude et de l'évapotranspiration potentielle (ETP).

A Rodrigues, les données utilisées proviennent du Digest of Statistics on Rodrigues<sup>6</sup>, une compilation de données descriptives de l'île fournie annuellement par le gouvernement mauricien. En particulier, les données qui nous intéressent proviennent du Meteorological Services de Rodrigues, qui publie la température moyenne et la somme des précipitations pour chaque mois, sur les deux stations de Pointe Canon et de Plaine Corail, respectivement situées aux extrémités Est et Ouest de l'île. En sus des valeurs mensuelles, est également indiquée l'écart de ces valeurs à la normale. On a donc pu recalculer les normales mensuelles. L'application de l'arbre de décision du GIEC nous a fait conclure à un climat *Tropical Moist* pour les deux stations, climat que nous avons donc appliqué à l'ensemble des parcelles de l'île.

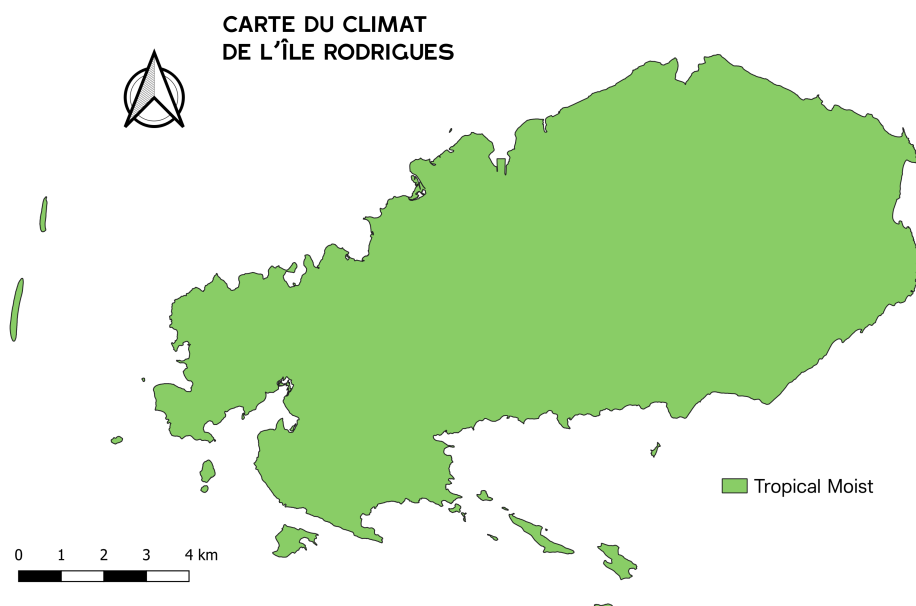


Figure 2 – Carte du climat de l'île Rodrigues

A Madagascar, les données utilisées proviennent de WorldClim<sup>7</sup>. En interpolant des données climatiques issues de 60 000 stations météorologiques partout dans le monde entre les années 1970 et 2000, une équipe de météorologues a pu créer des cartes de données climatiques avec une résolution d'un kilomètre carré (Fick & Hijmans 2017). Les données topographiques proviennent du modèle numérique de terrain produit par les images satellites de la mission SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)<sup>8</sup>. Ces données permettent d'attribuer un climat *Tropical Montane* à l'ensemble de la commune rurale d'Antoby Est.

A La Réunion, le CIRAD dispose, dans le cadre d'un partenariat avec Météo-France, d'un réseau commun de stations météorologiques. Dans le cadre du projet BRIO (Building Resilience in Indian Ocean), ces données ont été extrapolées sur l'en-

6. Données disponibles en ligne : [https://statsmauritius.govmu.org/Pages/Statistics/By\\_Subject/Rodrigues/SB\\_Rodrigues.aspx](https://statsmauritius.govmu.org/Pages/Statistics/By_Subject/Rodrigues/SB_Rodrigues.aspx), consulté le 7/12/2022

7. <https://worldclim.org/data/worldclim21.html>, consulté le 7/12/2022

8. disponibles à la même URL que ci-dessus.

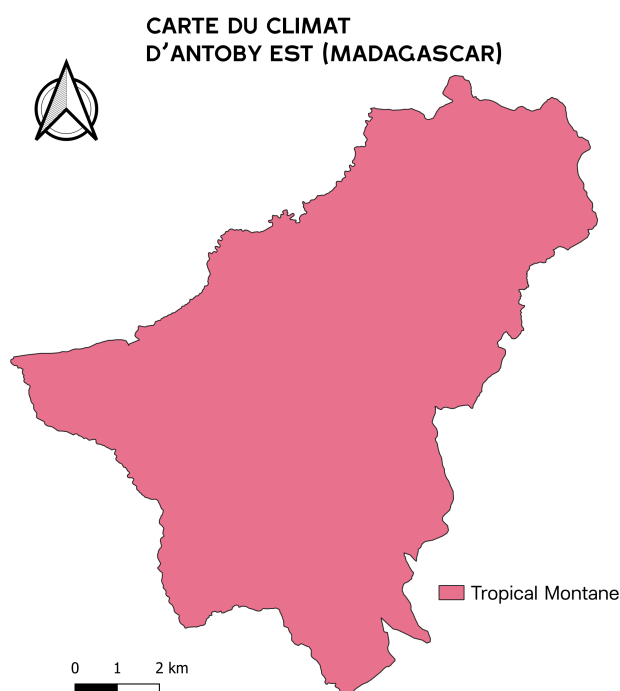


Figure 3 – Carte du climat d'Antoby Est

semble de l'île, divisée par une grille de 3x3 km. Ces données non publiques ont été mises à notre disposition. L'altitude provient de courbes de niveaux calculées par le CIRAD à partir du modèle numérique de terrain de l'IGN (Litto3d MNT), avec une précision de cinq mètres<sup>9</sup>. En réalisant l'intersection de ces données, nous avons constaté que la limite d'altitude utilisée par le GIEC (1000m) pour définir le climat *Tropical Montane* correspondait à peu près à un passage à des températures annuelles moyennes inférieures à 18°C, donc au passage à des climats tempérés chauds. Par simplification, nous avons donc choisi de ne pas conserver l'intersection exacte, et de garder la grille issue des données BRIO. La complexité du climat de La Réunion est alors résumée en cinq types de climats répartis sur l'île, selon deux gradients bien connus : un gradient d'altitude modulant les températures, et un gradient Est-Ouest correspondant à la pluviosité.

### 3.2.2 Cartes des sols

Afin de mieux capturer la diversité des sols des trois territoires, nous avons choisi, quand cela était possible, de ne pas reprendre les grands types de sols fournis par le GIEC. Des types de sols spécifiques ont été définis et cartographiés pour chaque territoire.

A Rodrigues, une carte pédologique au 1 :20 000 avait été réalisée par Philippe de Blic, de l'ORSTOM (aujourd'hui IRD) en partenariat avec le Mauritius Sugar Industry Research Institute, en 1985. Très précise, cette carte a été simplifiée par les pédologues de l'équipe, en distinguant six grands types de sols.

A Madagascar, une étude pédologique a permis d'identifier cinq grand types

9. [https://aware.cirad.fr/layers/geonode:courbe\\_niveau\\_100m\\_4326](https://aware.cirad.fr/layers/geonode:courbe_niveau_100m_4326)

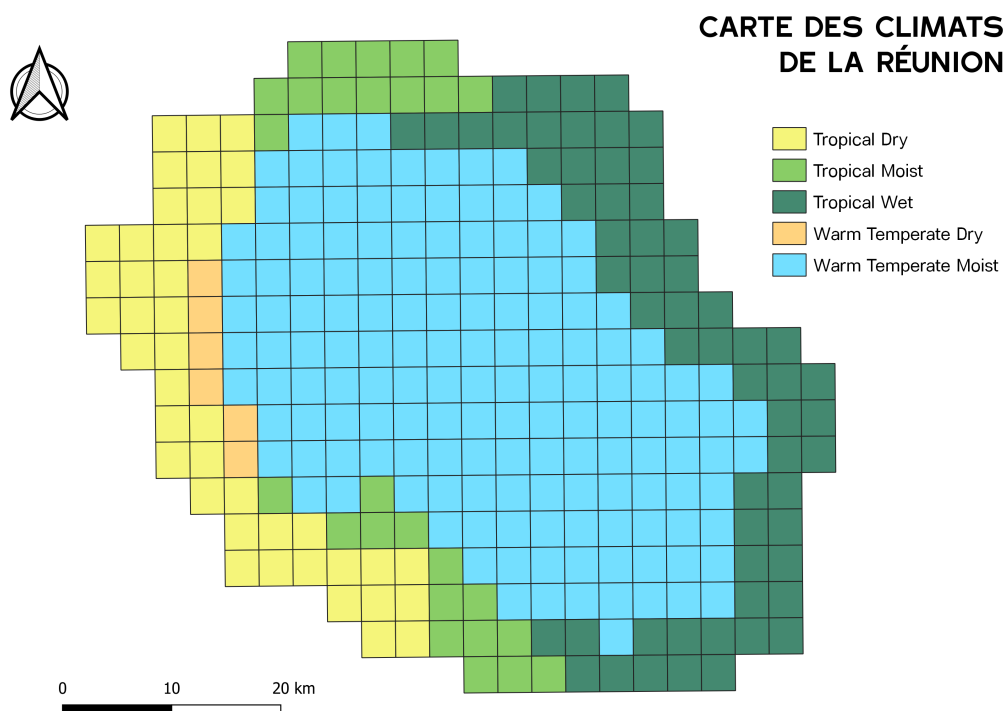


Figure 4 – Carte du climat de la Réunion

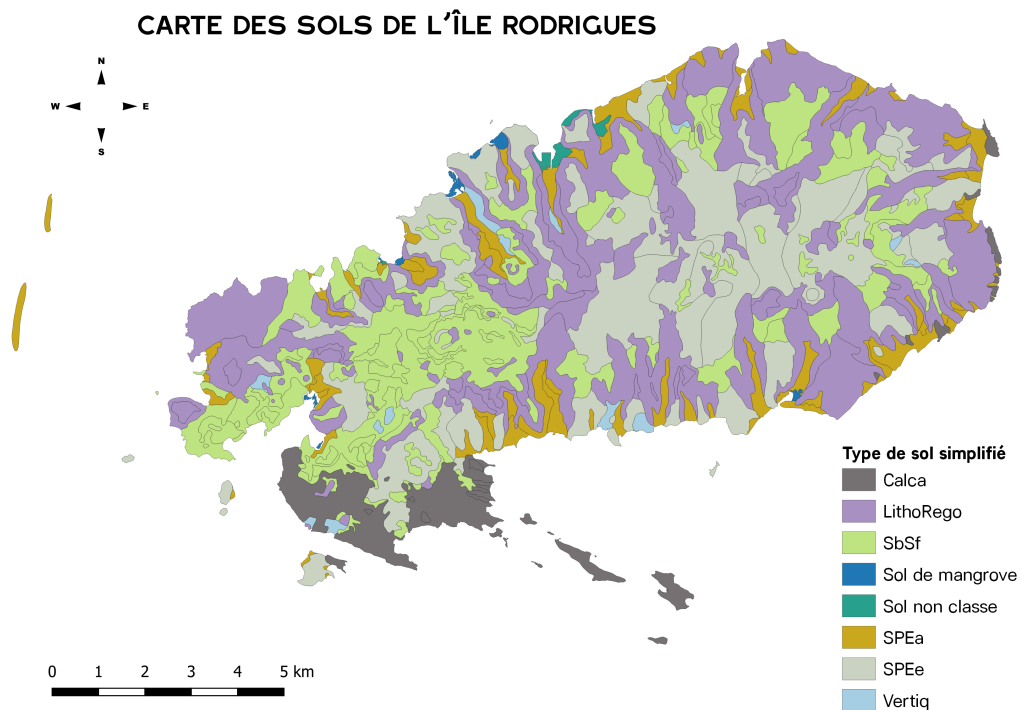


Figure 5 – Carte des sols de l'île Rodrigues

de sol. La répartition spatiale de ces types de sols a employé les méthodes de la télédétection. L'image satellite Sentinel-2 du 15 mai 2022 a été segmentée, avec un minimum de 750 pixels par segment; pour 811 de ces segments, un type de sol a été attribué par photo-interprétation. Un modèle Random Forest a ensuite été calibré sur 590 segments, et validé sur les 221 segments restants, avec un indice kappa de 0,78. Ce modèle a permis de prédire une classe de sol pour les segments restants.

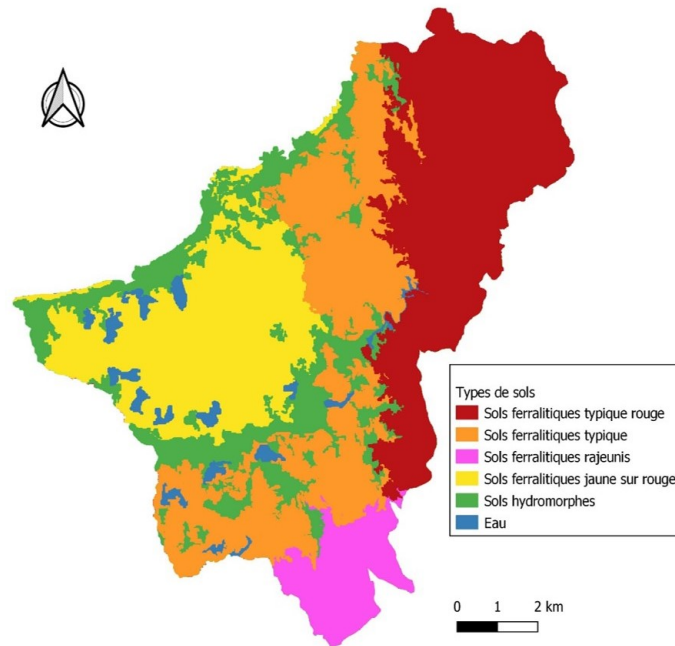


Figure 6 – Carte des sols d'Antoby Est

A La Réunion, les types de sols redéfinis proviennent de la thèse de Myriam Allo, réalisée dans le cadre du projet C@RUN (Allo 2019). Partant du constat que la classification morpho-pédologique de référence, établie par Raunet 1991, n'est pas homogène du point de vue des propriétés des sols, une autre méthodologie a été mise en oeuvre, basée sur la spectroscopie moyen infra-rouge (MIRS) : en effet, ces spectres contiennent une information très précise sur la composition minéralogique et chimique des sols. 962 échantillons géo-référencés ont donc été extraits de la pédothèque du laboratoire d'analyse de sols du Cirad à Saint-Denis, broyés à 200 $\mu$ m et passés au MIRS. Des partitionnements imbriqués en k-medoids ont ensuite permis de distinguer neuf types de sols. Un modèle de prédiction Random Forest a ensuite été calibré sur ces 962 échantillons, afin de prédire un type de sol sur 7780 autres échantillons géo-référencés, également analysés au laboratoire de Saint-Denis. La spatialisation a ensuite été réalisée par la méthode des polygones de Voronoï. Les zones qui n'ont pu se voir attribuer un type de sol spécifique par cette méthodologie ont reçu le type de sol *Volcanic*, utilisé par le GIEC.

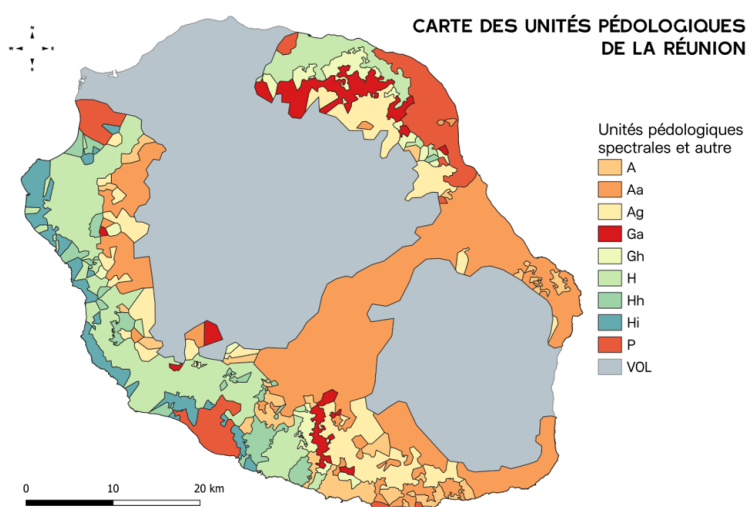


Figure 7 – Carte des sols de La Réunion

## 3.3 USAGES ET ÉLEVAGE

On ne saurait proposer aux aménageurs de construire des scénarios de changement d'usage sans fournir un état initial des usages présents sur le territoire. De même, il a fallu obtenir des données locales décrivant l'état initial de l'élevage.

### 3.3.1 Cartes des usages

La construction de cartes des usages pour chacun des territoires comportait plusieurs contraintes. Sur le plan purement informatique, il fallait obtenir des cartes relativement légères, afin qu'elles soient portables dans une interface de webmapping. Mais il fallait tout de même avoir des polygones élémentaires relativement petits : sinon, les scénarios de changement d'usages simulables sur l'interface n'auraient guère été très fins.

Surtout, il fallait que les usages représentés soient caractérisables, c'est-à-dire qu'on puisse les décrire dans des catégories existantes dans nos données de référence, afin de pouvoir appeler les facteurs d'émissions correspondants. Pour un usage, le calcul du bilan de GES correspondant implique d'en détailler les pratiques. Prenons par exemple le riz tel qu'il est cultivé « classiquement » à Antoby Est : il a fallu indiquer le régime hydrique avant et pendant la période de culture, le type et la quantité des amendements organiques, le devenir des résidus, ainsi que les quantités d'intrants et combustibles consommés. Par usage, on entend donc un usage caractérisé par des pratiques. Il aurait fallu, dans l'idéal, décrire chaque itinéraire technique effectivement présent sur le terrain ; cependant, cela impliquait d'être en mesure de situer spatialement chacun de ces itinéraires techniques sur le territoire, ce que nous n'étions pas en mesure de faire. Nous avons donc décrit des itinéraires techniques représentatifs.

A Rodrigues, la carte des usages a été réalisée par photo-interprétation d'une image fournie par le service du cadastre de la Rodrigues Regional Assembly (RRA), elle-même obtenue depuis le logiciel Erdas Imagine.

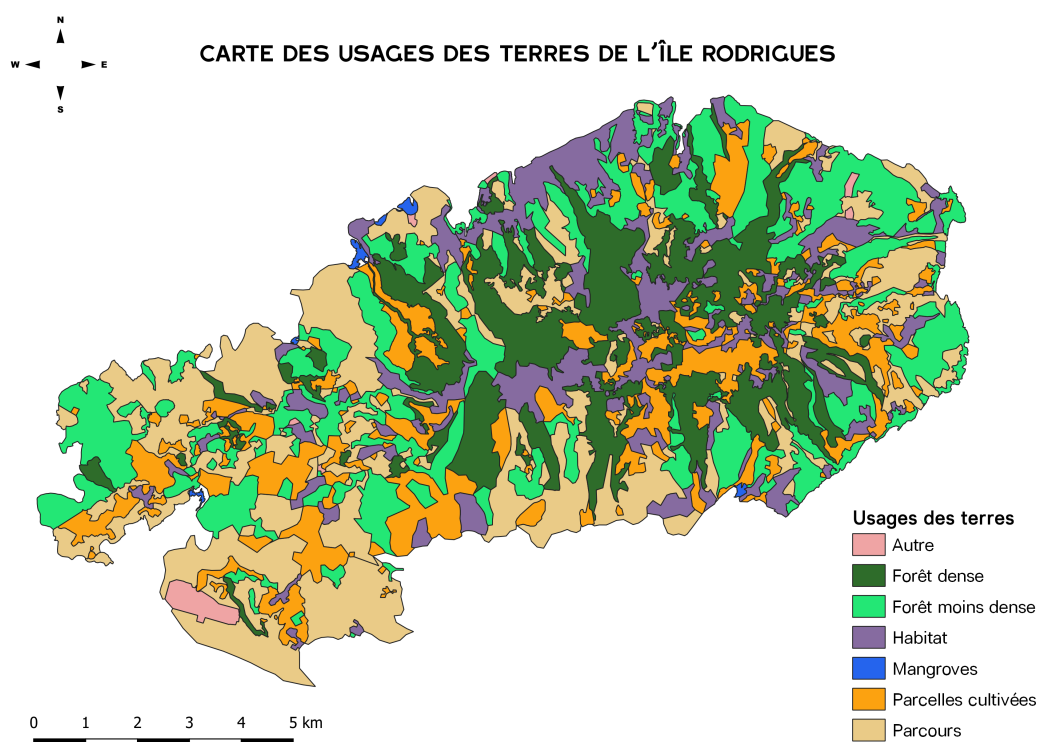


Figure 8 – Carte des usages de Rodrigues

A Madagascar, la carte des usages a également été obtenue par photo-interprétation. Elle a été fournie par AgriSud International, qui l'avait réalisé dans le cadre du Schéma d'Aménagement Communal (SAC) en 2017.

A La Réunion, nous avons choisi de partir de la carte d'occupation du sol établie à partir d'images satellites à très haute résolution (SPOT 6/7). Cette carte est établie annuellement par le Cirad, le millésime 2021 a été utilisé (Dupuy *et al.* 2020). Cependant, le grand nombre d'objets, et la précision de la géométrie de ces objets, en font une carte trop lourde pour être utilisée avec aisance sur une interface web. La carte a donc fait l'objet d'une série de manipulations :

- Certains usages ont été regroupés de manière experte : par exemple, les usages « Forêts et fourrés de montagne » et « Autre végétation arborée » ont été regroupés dans l'usage *Forêts*. L'usage « Ombre » a été supprimé, les polygones correspondants se sont vus attribuer l'usage du polygone voisin le plus pertinent ;
- Des zones bâties ont été délimitées dans le logiciel Arcgis : cela permet de représenter les zones très densément bâties par un seul polygone. Les zones de végétation comprises dans ces zones bâties sont considérées peu modifiables (e.g. terrains de foot, parcs) ;
- Certains polygones ont été identifiés comme correspondants à la végétation spontanée peuplant les bords de route. Ces espaces non aménageables ont été associés aux routes ;
- D'autres espaces non aménageables ont été exclus : cela correspond aux ravines trop pentues, aux zones rocailleuses des Hauts, et aux zones de Réserve biologique intégrale ou de Réserve naturelle nationale ;

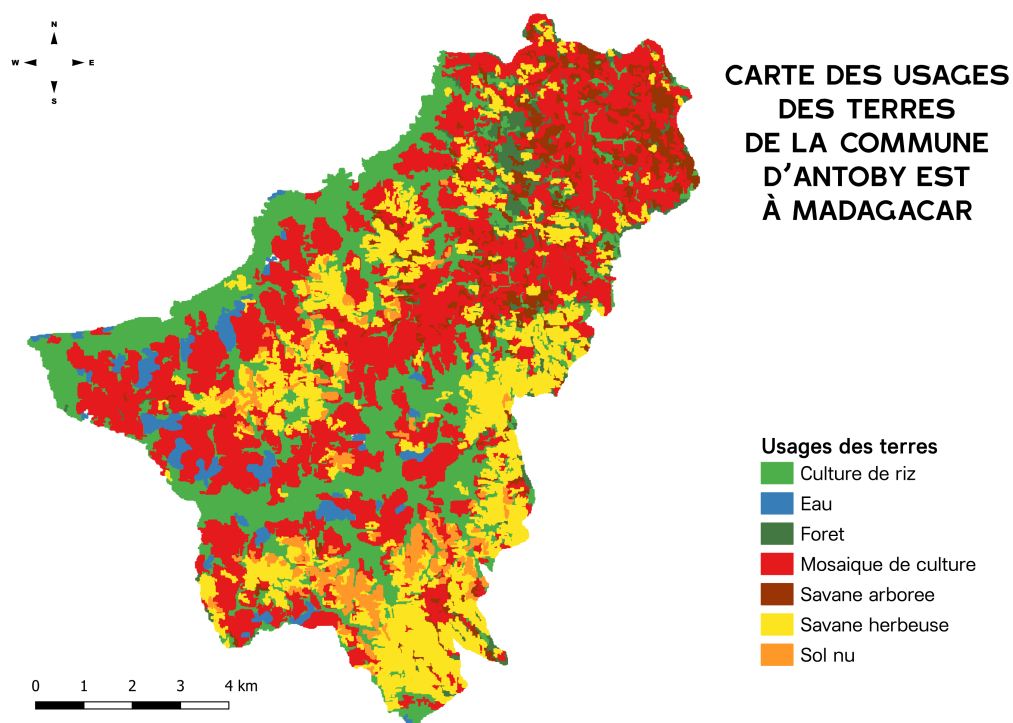


Figure 9 – Carte des usages d'Antoby Est

— Les entités trop petites ont été fusionnées avec leur voisine, et la géométrie a été simplifiée à cinq mètres.

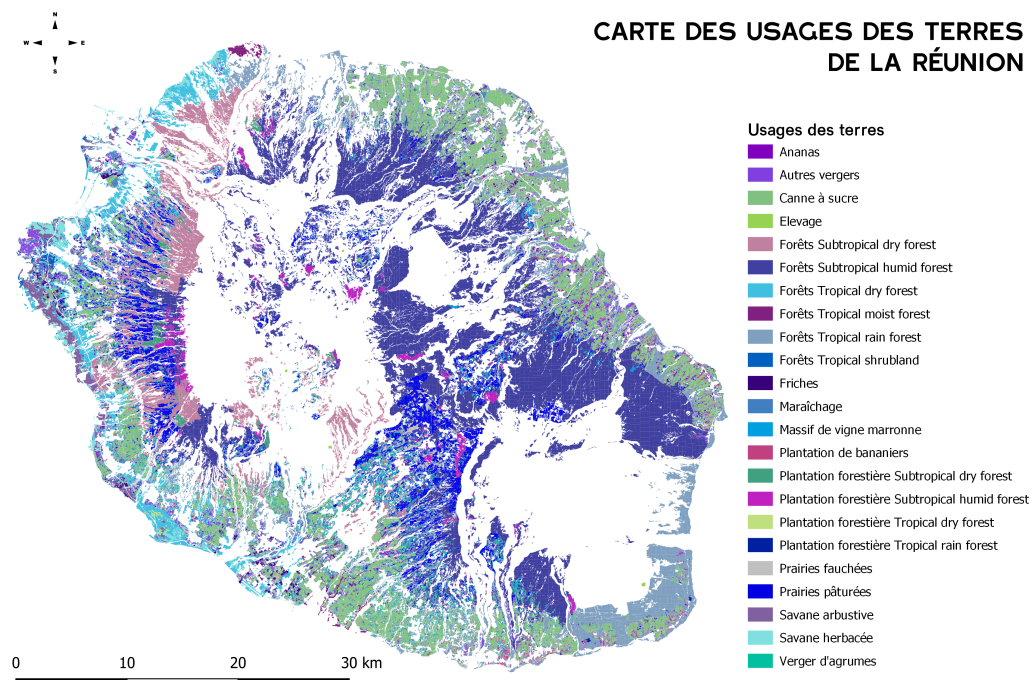


Figure 10 – Carte des usages de La Réunion

#### 3.3.2 Données descriptives des élevages

L'élevage représente une part importante des émissions de GES du secteur agricole. C'est pourquoi il nous a paru important de le représenter, et de permettre aux utilisateurs de créer des scénarios de changement d'élevages sur un territoire. Dans les équations présentées ci-dessus, il est nécessaire de connaître le nombre de têtes par type d'animaux. Cependant, cette donnée n'existe que de manière spatialement agrégée : on ne dispose pas de la localisation exacte de chaque tête de bétail, ni même de chaque troupeau. Les données disponibles ne le sont qu'à une échelle administrative.

Nous avons donc fait le choix de représenter les animaux par unité administrative. Cela revient à considérer un petit nombre de grandes fermes, qui regroupent tous les animaux présents sur l'unité considérée. Les émissions associées à l'élevage ne sont donc pas représentées de manière surfacique, mais de manière ponctuelle. Sur l'interface, on peut cliquer sur chaque « ferme » afin d'en modifier le nombre de têtes présent à la fin du scénario.

Ce choix est une approximation correcte pour les animaux élevés en bâtiments, où les émissions sont effectivement concentrées sur une surface très petite. En revanche, les prairies pâturées et les parcours voient leurs bilans de GES réels sous-estimés, puisque les émissions liées au passage des animaux sont rapatriées au bâtiment d'élevage représentant la totalité de l'unité administrative. Réciproquement, celui-ci concentre des émissions qui sont en réalité en partie réparties sur des surfaces pâturées.

A La Réunion, les données d'élevage exploitées proviennent du dernier Recensement Général Agricole (RGA), une enquête pilotée par le Ministère de l'Agriculture, menée au niveau national tous les dix ans, et dont la dernière édition date de 2020. Les chiffres qui en sont issus ont été mis en ligne sur le site de la Direction de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt (DAAF) de La Réunion<sup>10</sup>. L'échelon administratif le plus fin disponible est celui de la commune.

Sur la commune d'Antoby Est, comme pour les usages, les données proviennent du SAC. Pour chaque *fokontany*, divisions des communes rurales, des enquêtes ont permis d'estimer le nombre d'animaux présents.

A Rodrigues, l'élevage n'a pas pu être intégré dans le cadre de ce projet. Une discussion avec la commission de l'Agriculture de l'Assemblée régionale de Rodrigues a permis d'établir que les données adéquates existaient, mais elles n'ont pour l'instant pas été mises à notre disposition.

---

10. <https://daaf.reunion.agriculture.gouv.fr/resultats-du-recensement-agricole-2020-les-fiches-territoriales-a2946.html>, dernière consultation le 15/12/2022

---

## 4 DEVENIR DE L'OUTIL

L'inclusion de l'interface SeqCOI sur la plateforme SmartIS de notre partenaire Cirad en garantit la maintenance et le maintien en l'état à moyen-terme. Néanmoins, dans un contexte de courte durée du projet, la question s'est rapidement posée des améliorations possibles *après* le projet.

L'outil SeqCOI a été implémenté à destination des institutions ayant autorité ou impact sur l'aménagement du territoire. Afin de s'assurer de la pertinence de l'outil, nous avons organisé une session de test par des utilisateurs potentiels, dans chacun des trois territoires : collectivités territoriales, bureaux d'étude, agences de l'environnement, ONG...

Si ces sessions ont permis de confirmer l'intérêt général de l'outil, elles ont également donné naissance à une série de remarques et de demandes d'amélioration. Les plus urgentes d'entre elles ont été traitées au cours du projet.

Preuve de l'intérêt porté par les acteurs rencontrés, une forte demande a été exprimée pour étendre les possibilités du calculateur à de nouvelles zones d'étude. Sous réserve de la fourniture d'une carte des sols, d'une carte des climats et d'une carte d'usages décrits en termes de pratiques, le calculateur est en réalité en mesure de fonctionner sur tous les territoires, grâce à l'inclusion des données de référence du GIEC, qui couvrent l'ensemble de la planète. A Madagascar notamment, plusieurs ONG de développement se sont manifestées pour que leurs terrains de travail soient caractérisés, quand le Ministère de l'Agriculture a lui demandé à intégrer le pays entier.

La base de données est destinée à accueillir un maximum de données spécifiques pour les facteurs d'émissions. Malheureusement, nous n'avons pas eu le temps d'en intégrer autant que nous le souhaitions, et un réel travail de recherche bibliographique reste à effectuer pour renseigner ces facteurs.

De même, un travail de synthèse des travaux scientifiques permettrait de caractériser des usages ou modes de gestion alternatifs à ceux présents actuellement sur la carte des usages d'un territoire - par exemple, des cultures en agroforesterie, ou la mise en place de brûlis des résidus. On pourrait dès lors intégrer ces alternatives comme des usages finaux dans des scénarios, ce qui permettrait d'évaluer le bilan de GES de la mise en place de nouvelles pratiques ou de nouvelles cultures à l'échelle d'un territoire.

Les autres perspectives, issues des remarques des utilisateurs comme de nos propres observations, sont reportées ici à destination des développeurs d'une potentielle nouvelle version de l'outil. L'intégration de ces remarques reste soumise au financement de nouveaux projets s'y consacrant.

### 4.1 ERGONOMIE

- Dans les cartes après calcul, surligner le contour des parcelles dont l'usage a changé dans le scénario ;
- Mettre en place un bouton pour réinitialiser l'entièreté d'un scénario ;
- Pour la sélection des parcelles à réaffecter à un nouvel usage, combiner sélection à la souris avec sélection par usage du sol ;
- Mieux mettre en exergue le mode de sélection des parcelles actuellement utilisé ;

- Dans les cartes « Ressources », proposer les repères habituellement utilisés : cadastre, limites communales, zones protégées...

### 4.2 FONCTIONNALITÉS

- Pouvoir sélectionner soi-même une zone d'étude, plus restreinte que la totalité du territoire ;
- Permettre à un utilisateur d'utiliser ses propres géométries pour la carte des usages, des climats et des sols, par exemple en insérant les shapefiles correspondants directement dans l'interface ;
- Mettre en place un système de sauvegarde provisoire, hors connexion de l'utilisateur, en cas de bug informatique (coupure réseau...)
- Autoriser la comparaison entre deux scénarios simulés par l'utilisateur.

### 4.3 RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

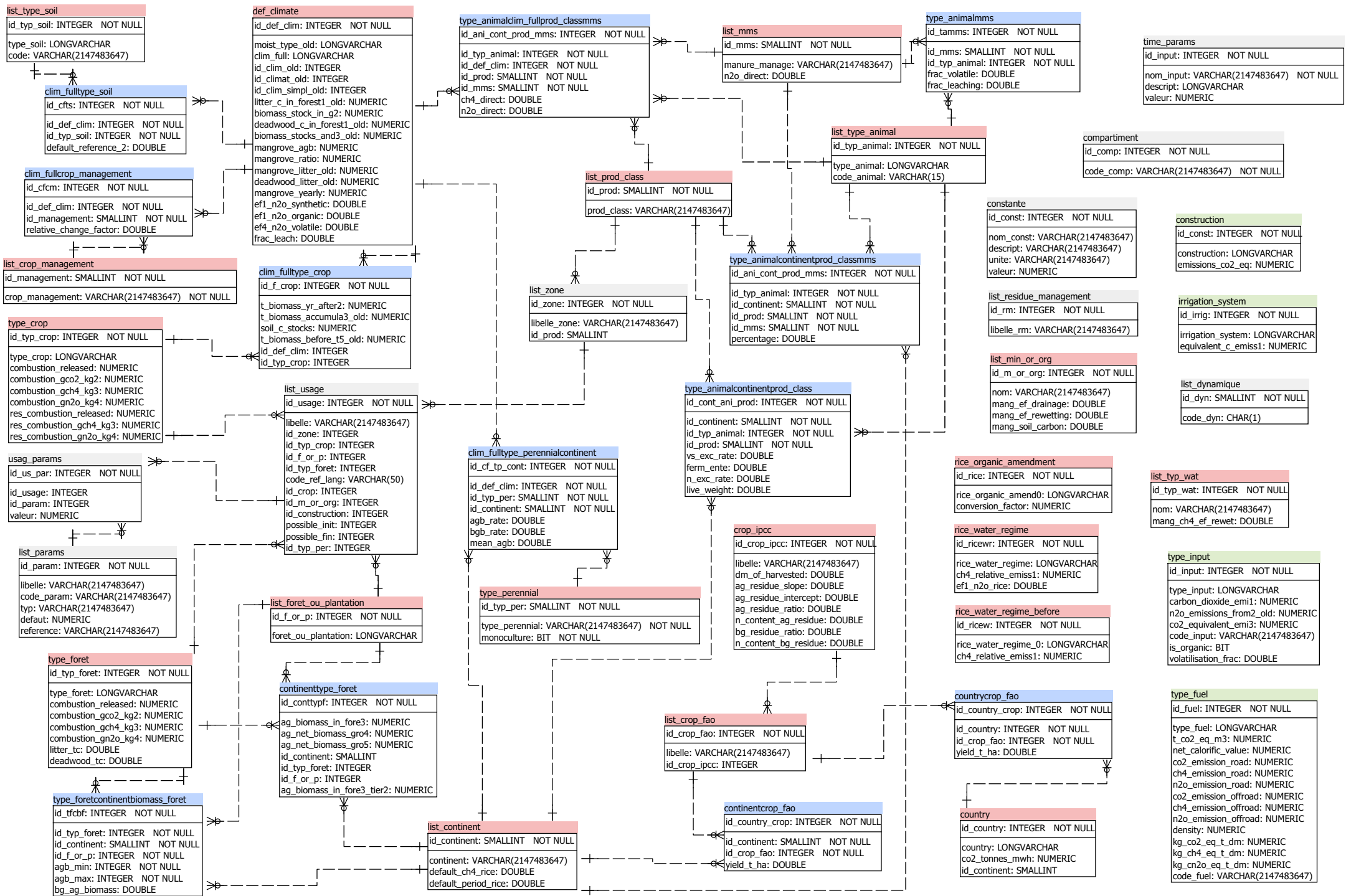
- Mettre en place une documentation d'usage, et la mettre en valeur sur l'interface ;
- Estimer et afficher des incertitudes dans les tableaux de synthèse ;
- Proposer des graphiques en sus des tableaux de synthèse ;
- Mettre en place une aide à l'interprétation des tableaux de synthèse ;
- Dans le tableau de synthèse, mettre en option le détail des réaffectations pour chaque type de changement d'usage - par exemple, « Forêt vers Mosaïque de cultures » dans le compartiment Déforestation ;
- Etablir des cartes des potentiels de stockage et déstockage de carbone.

---

## A SCHÉMA PHYSIQUE DE BASE DE DONNÉES

Le schéma physique de base de données est donné en page suivante.

- Les entêtes rouges indiquent les tables dites catégorielles, contenant les libellés uniques de tous les items de chaque catégorie utilisée par le GIEC pour ventiler ses données, et les identifiants correspondants ;
- Les entêtes bleues correspondent aux tables de croisement du GIEC, où les données sont ventilées en fonction des catégories définies dans les tables catégorielles ;
- Les entêtes vertes indiquent les tables de référence ne provenant pas du GIEC ;
- Les entêtes grises correspondent aux tables auxiliaires, ajoutées pour le fonctionnement de l'outil.



## BIBLIOGRAPHIE

1. Allo, M. *Usages et changements d'usages des sols agricoles : impacts sur les stocks de carbone organique du sol en milieu volcanique tropical. Approche spatiale et bilan des gaz à effet de serre à l'île de La Réunion* thèse de doct. (Université de Montpellier, 2019).
2. Colomb, V. *et al.* Selection of appropriate calculators for landscape-scale greenhouse gas assessment for agriculture and forestry. *Environmental Research Letters* **8** (2013).
3. Dupuy, S., Gaetano, R. & Le Mézo, L. Mapping land cover on Reunion Island in 2017 using satellite imagery and geospatial ground data. *Data in Brief* **28** (2020).
4. FAO. *Ex-Ante Carbon-balance Tool | EX-ACT - Guidelines* Second edition - Tool version 9. 200 p. isbn : 978-92-5-136233-4 (FAO, 2022).
5. Fick, S. E. & Hijmans, R. J. WorldClim 2 : new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* **37**, 4302-4315 (2017).
6. Forster, P. *et al.* *The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity in Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* pp. 923-1054 (Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom et New York, NY, USA, 2021).
7. IPCC. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4 : Agriculture, Forestry and Other Land Use* isbn : 4-88788-032-4 (IGES, Japan, 2006).
8. IPCC. *2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories : Wetlands* isbn : 978-92-9169-139-5 (IPCC, Switzerland, 2014).
9. IPCC. *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4 : Agriculture, Forestry and Other Land Use* isbn : 978-4-88788-232-4 (IPCC, Switzerland, 2019).
10. Lal, R. Carbon emission from farm operations. *Environment International* **30**, 981-990 (2004).
11. Raunet, M. *Le milieu physique et les sols de l'île de la Réunion. Conséquences pour la mise en valeur agricole* 515 p. (CIRAD, 1991).
12. Todoroff, P., Albrecht, A., Allo, M., Thuriès, L. & Tillard, E. *C@RUN : séquestration de carbone dans les sols agricoles réunionnais : évaluations, modélisation et potentiels d'atténuation du changement climatique* rapp. tech. (CIRAD-IRD, 2019).