



REVUE DES CALCULATEURS GES POUR L'AGRICULTURE ET LA FORET

*Guide d'aide au choix et à l'utilisation
des outils pour les évaluations
territoriales.*



Version 2.0

Auteurs

Vincent COLOMB (Auteur principal, IRD, UMR Eco&Sols)

Martial BERNOUX (Coordinateur, IRD, UMR Eco&Sols, martial.bernoux@ird.fr)

Louis BOCKEL (Chef de Projets, FAO)

Jean-Luc CHOTTE (IRD, UMR Eco&Sols)

Sarah MARTIN (ADEME, Service Agriculture et Forêt)

Cécile MARTIN-PHIPPS (ADEME, Direction de l'Action Internationale)

Jérôme MOUSSET (ADEME, Service Agriculture et Forêt)

Marianne TINLOT (Consultant Junior, FAO)

Ophélie TOUCHEMOULIN (Consultant Junior, FAO)

Juin, 2012

Disclaimer

Les appellations employées dans ce produit d'information et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO), de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) et de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) aucune prise de position quant au statut juridique ou au stade de développement des pays, territoires, villes ou zones ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites. La mention de sociétés déterminées ou de produits de fabricants, qu'ils soient ou non brevetés, n'entraîne, de la part de la FAO, l'ADEME et l'IRD, aucune approbation ou recommandation desdits produits de préférence à d'autres de nature analogue qui ne sont pas cités.

Les opinions exprimées dans ce produit d'information sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement celles de la FAO, l'ADEME et l'IRD.

Tous droits réservés. La FAO, l'ADEME et l'IRD encouragent la reproduction et la diffusion des informations figurant dans ce produit d'information. Les utilisations à des fins non commerciales seront autorisées à titre gracieux sur demande. La reproduction pour la revente ou à d'autres fins commerciales, y compris à des fins didactiques, pourra être soumise à des frais.

Ce rapport a été produit avec le support de l'équipe **EX-ACT** de la FAO (EX-Ante Carbon-balance Tool - www.fao.org/tc/exact), de l'UMR **Eco&Sols** (Écologie fonctionnelle et biogéochimie des sols et des agrosystèmes- <http://www.montpellier.inra.fr/ecosols>) et du projet **ClimAgri** mené par l'ADEME (www.ademe.fr)

Crédits photos ©: ADEME, Moizo Bernard – IRD (www.indigo.ird.fr),



Relecteurs externes associés

Eleanor MILNE (Université du Colorado)

Dipti THAPA (Banque Mondiale)

Carlos Eduardo PELLEGRINO CERRI (Université de São Paulo)



Rapport complet disponible sur:

<http://www.fao.org/tc/exact/exact-publications/documents-mentionnant-ex-act/fr/>



Table of contents

1	Résumé.....	4
2	Introduction.....	10
3	Méthodologie pour la revue	11
4	Couverture géographique des outils.....	13
5	Les développeurs de calculateurs.....	14
6	La méthodologie préconisée par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).....	Erreur ! Signet non défini.
7	Temps et compétences nécessaires	Erreur ! Signet non défini.
8	De nombreux calculateurs pour des objectifs différents.....	Erreur ! Signet non défini.
8.1	De la parcelle au territoire	Erreur ! Signet non défini.
8.2	Zone d'usage des calculateurs	Erreur ! Signet non défini.
9	Prise en compte du sol et du climat	Erreur ! Signet non défini.
10	Paramètres comptabilisés par les calculateurs.....	Erreur ! Signet non défini.
11	Résultats	34
12	Incertitudes	Erreur ! Signet non défini.
13	Contexte économique et politique de l'évaluation environnementale	Erreur ! Signet non défini.
14	Disponibilité des calculateurs et de leurs guides d'utilisation.	41
15	Conclusion.....	Erreur ! Signet non défini.
16	Liste des acronymes	Erreur ! Signet non défini.
17	Références	46

1 Résumé

Le changement climatique est reconnu comme un enjeu environnemental majeur de ce siècle. Les activités agricoles et forestières peuvent être à la fois des sources et des puits de gaz à effet de serre (GES). Dans la majorité des pays, ces activités sont à l'origine d'une part significative des émissions nationales, et représentent au niveau mondial environ 30% des émissions anthropiques. Afin d'atteindre les objectifs globaux et nationaux de réductions des émissions et en même temps de répondre aux enjeux de la sécurité alimentaire, les secteurs agricole et forestier sont contraints d'évoluer. En parallèle aux travaux méthodologiques du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), de nombreux outils d'évaluation des émissions de GES pour l'agriculture et la forêt ont été développés ces dernières années. Deneff *et al.* (2012) propose de regrouper les outils de la manière suivante: calculateurs, protocoles, guides d'utilisateur et modèles. Ce travail se concentre sur les calculateurs, c'est-à-dire des outils de calculs en ligne, ou sous Excel ou sous un autre format informatique qui permettent d'évaluer les émissions du secteur agricole et forestier. Ces calculateurs sont des outils « facile d'utilisation » et d'aide à la décision pour les acteurs de terrain par opposition aux modèles, plus complexes et destinés au monde de la recherche d'après la définition de Deneff *et al.* Cette revue s'intéresse plus spécifiquement aux calculateurs permettant de travailler à l'échelle du territoire, incluant donc plusieurs types de production : culture, élevage, forêt. Dix-huit calculateurs principaux ont été identifiés, parmi lesquels EX-ACT, Climagri®, Cool Farm Tool, Holos, USAID FCC et ALU. Les calculateurs identifiés ont été testés et analysés selon une grille de lecture. Un questionnaire a été envoyé aux développeurs de chaque outil afin de compléter et valider cette analyse.

Il apparaît que les différents calculateurs ont été développés avec des approches et des objectifs différents. Par ailleurs, chaque outil est adapté à un périmètre géographique défini. Afin d'aider les utilisateurs à choisir l'outil le plus adapté, ils ont été regroupés selon leur finalité de conception et leur objectif principal.

- **Sensibilisation**: des outils simples, ne nécessitant pas de formation particulière et avec une portée limitée. Ils mettent en évidence les principales sources de GES et ne proposent pas directement de solutions d'amélioration.
- **Reporting/inventaire** : des outils qui permettent de décrire et d'analyser en détail la situation actuelle. L'idée est de construire des bases de données de références, homogènes en termes de méthodologie, afin de permettre un suivi dans le temps, et une comparaison des territoires ou des exploitations. Ces références peuvent être une base afin d'élaborer des politiques climatiques adaptées. Ces outils doivent être en mesure d'intégrer une large diversité de pratiques.

- **Evaluation de projets:** Ces calculateurs permettent de comparer une situation initiale, avec une situation en présence et en absence de projet. Certains outils se concentrent sur les projets en lien avec les crédits carbone, alors que d'autres analysent sous l'angle carbone des projets avec d'autres finalités (développement rural etc.).
- **Calculateurs produits et filières :** L'objectif est de comparer des produits plutôt que des territoires, avec souvent une logique de marché (ex : étiquetage environnemental). Cela permet de comparer les émissions à niveau de production similaire. Les résultats sont exprimés en quantité de GES.kg⁻¹ de produit.

Tableau 1: Classification des calculateurs selon leurs objectifs et leur zone géographique

OBJECTIF DE L'UTILISATEUR		CALCULATEURS ET LEUR ZONE GEOGRAPHIQUE
Sensibilisation		Carbon Calculator for New Zealand Agriculture and Horticulture (NZ), Cplan v0 (UK); Farming Enterprise GHG Calculator(AUS); US cropland GHG calculator (USA).
Reporting/ Inventaire	Outils territoriaux	ALU (World); Climagri (FR), FullCam (AUS)
	Outils exploitation agricole	Diaterre(FR); CALM (UK); CFF Carbon Calculator (UK);IFSC (USA)
Evaluation de projets	Centrés sur les crédits carbone	Farmgas (AUS), Carbon Farming tool (NZ);Forest tools : TARAM (world), CO2 fix (world)
	Non centrés sur les crédits carbone	EX-ACT (World);US AID FCC (Developing countries), CBP (World), Holos(CAN), CAR livestock tools(USA)
Analyse de filière et de produits		Cool farm tool (Monde), Diaterre (FR), outils ACV et bases de données associées (SimaPro, ecoinvent, LCA food etc: données principalement pour les pays occidentaux)

AUS: Australia; CAN: Canada; FR: France, NZ: New Zealand; UK: United Kingdom; USA: Etats Unis; FullCam: un calculateur utilisé par l'Australie pour sa comptabilité carbone nationale. Il n'évalue que les flux de carbone, pas le N₂O ni le CH₄. Un calculateur territorial avec un haut niveau de précision, un couplage avec des bases de données et des modèle bio-physique.

Tous les calculateurs testés permettent d'identifier les sources principales de GES, à l'exception notable des changements d'utilisation des sols parfois ignorés. Tous ces calculateurs fournissent des résultats en tonne équivalent CO₂ (t-CO₂eq)¹ **mais les**

¹ CO₂ équivalent: L'unité CO₂ équivalent permet d'exprimer le forçage radiatif, ie l'impact sur le changement climatique, d'une substance (souvent GES) en comparaison au CO₂. Il est calculé à partir du Potentiel de Réchauffement Climatique (PRG) qui correspond au forçage radiatif relatif d'une substance par rapport au CO₂ pour une période donnée. Ainsi les valeurs officielles du GIEC pour les PRG sont : 21 pour le méthane (i.e. 1 kg de CH₄ a le même pouvoir radiatif que 21 kg de CO₂) et de 310 pour l'oxyde nitreux (N₂O), basé sur l'échelle du siècle.

différences méthodologiques et de périmètres considérés influencent significativement les résultats. Ainsi, il est impossible de réaliser des comparaisons directes entre les résultats de différents outils, même si ces résultats sont exprimés dans la même unité ($t\text{-CO}_2 \text{ eq.ha}^{-1}$). Pour une bonne interprétation des résultats, il est donc nécessaire de vérifier le périmètre de l'étude, les paramètres qui ont été pris en compte et de garder à l'esprit les **incertitudes**.

Les principaux enjeux concernant l'évaluation territoriale sont la prise en compte de **l'hétérogénéité des systèmes de production et la variabilité des processus biologiques impliqués dans les émissions de GES**. Le changement d'échelle, de l'exploitation agricole vers le territoire implique un changement dans la disponibilité des données. A l'échelle de la parcelle ou de l'exploitation, les données techniques sont facilement accessibles et peuvent généralement être fournies par l'agriculteur. A l'échelle territoriale, les données doivent être obtenues via des bases de données statistiques ou des dires d'experts, ce qui augmente les incertitudes. Pour la prise en compte des processus biologiques à l'origine des émissions, les calculateurs utilisent soit des modèles biophysiques (ex : Roth-C, Century), éventuellement liés à des données spatialisées, soit des facteurs d'émissions moyens fournis par le GIEC ou des études nationales. Le lien entre les modèles et les données SIG est en construction dans des projets comme GEFSOC et APEX. La prise en compte de la dynamique temporelle est particulièrement importante pour le carbone du sol et de la biomasse, qui concerne des quantités de CO_2 très importantes. La taille de ces réservoirs de carbone est impactée par les pratiques culturales et le type d'utilisation des terres. A l'avenir, les technologies d'imagerie et de détection à distance (ex : Images satellites, Spectroscopie proche infrarouge) devraient permettre un suivi précis et à bas coût, des changements de stocks de carbone du sol et dans la biomasse. Afin d'augmenter la précision des évaluations d'émissions de GES, il est nécessaire de poursuivre le développement des modèles mécanistiques et des méthodes de mesure simples et à bas coût. Ceci permettra d'obtenir des facteurs d'émissions précis pour l'ensemble des conditions pédo-climatiques et pour les processus biologiques.

Les sources d'émissions méritant une attention particulière lors des évaluations GES :

- Cultures : Fertilisation azotée, gestion des résidus, riziculture, travail et conversion des zones humides et tourbières, changement d'utilisation des terres et changement du mode de travail du sol (impact sur le stock de carbone).
- Elevage : Alimentation et prise en compte des GES dans la nourriture importée (% de pâture, soja), gestion des déjections et prise en compte des émissions de la fertilisation organique. Attribution des émissions des « fumiers » entre élevage et culture.
- Horticulture : prise en compte des infrastructures et des consommations d'énergie.
- Forêt : Carbone du sol, plantations vs forêts naturelles, déforestation.

Les calculateurs fournissent des résultats en quantité de CO₂eq.an⁻¹, CO₂eq.hectare⁻¹, CO₂eq.projet⁻¹ ou CO₂eq.quantité de produit⁻¹ (kg Matière Sèche, blé, lait etc.). L'indicateur le plus adapté doit être considéré en fonction des objectifs de chaque étude. Cependant le lien entre le niveau de production d'un territoire et ses émissions ne doit pas être ignoré au risque d'induire des « fuites ». En effet une baisse des émissions d'un territoire à la suite d'une baisse de son niveau de production a de forts risques d'être compensée par une augmentation des émissions sur un autre territoire. Il faut également garder à l'esprit la notion de permanence : certaines augmentations/réductions des émissions sont temporaires alors que d'autres sont permanentes dues à un changement de système de production. Enfin, un point très important, l'évaluation environnementale ne se réduit pas à l'évaluation des GES. La réduction des émissions de GES ne doit pas être faite au dépend des autres services éco-systémiques (ex : augmentation des pesticides, consommation d'eau, perte de la biodiversité etc.) et c'est bien la durabilité globale des systèmes qui doit être améliorée.

Pour les systèmes agricoles très productifs, l'évaluation de GES devrait se concentrer sur l'amélioration de l'efficacité des intrants par unité de production (exemple des engrais azotés). Pour les zones à faible productivité, la priorité peut être mise sur l'amélioration de la résilience des agro-systèmes et de la sécurité alimentaire, par l'amélioration des pratiques agronomiques. Il y a une complémentarité forte entre l'efficacité agronomique, les pratiques agro-écologiques et une « agriculture intelligente face au climat ».

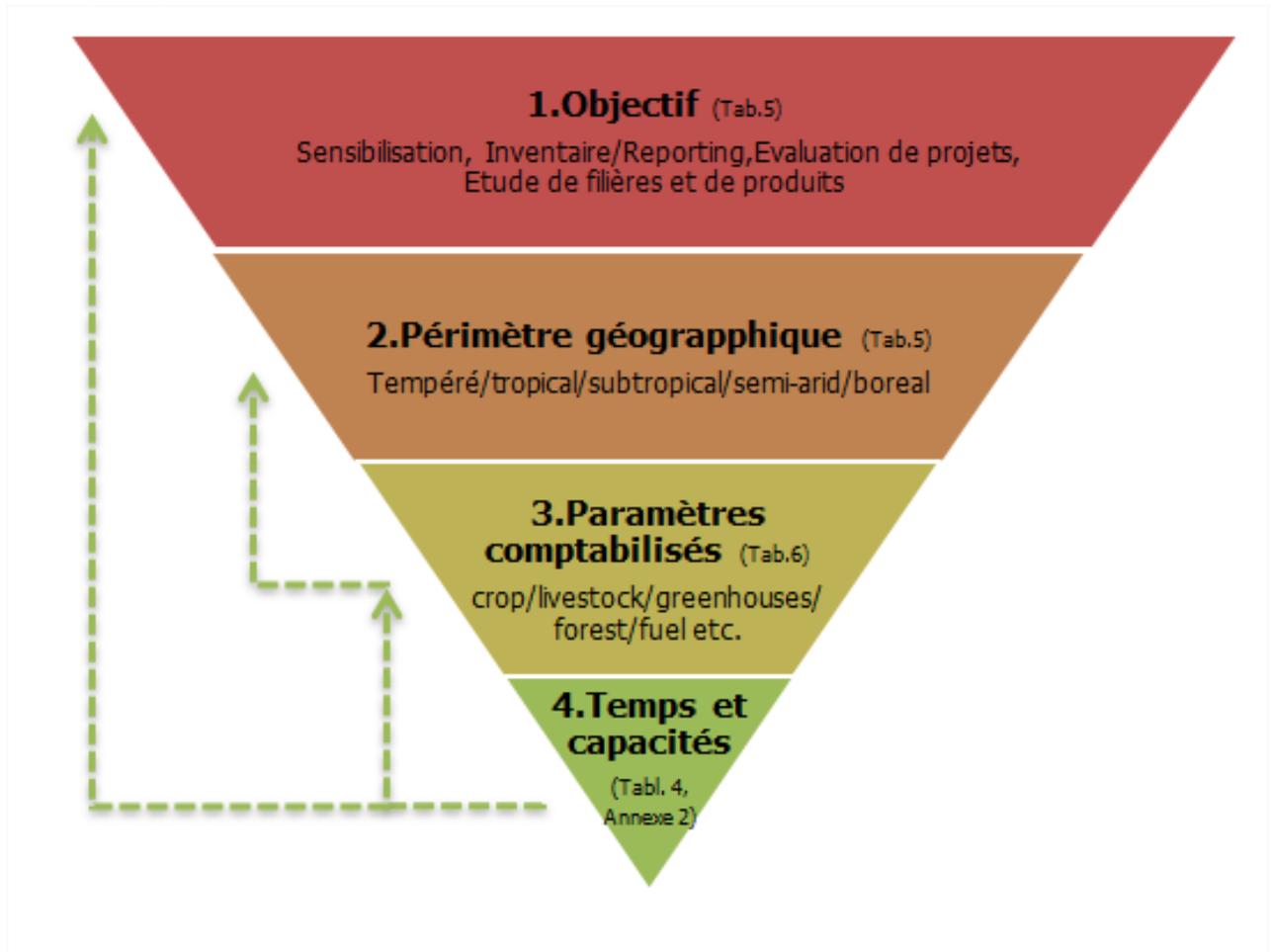
Une conclusion importante est que des calculateurs adaptés à chaque situation sont déjà disponibles, même si pour de nombreuses régions les résultats souffrent de très

hautes incertitudes et que les liens avec les paramètres socio-économiques manquent fortement. Le développement des outils est une manière d'aider les décideurs politiques et les porteurs de projets à mieux intégrer la dimension du changement climatique dans leurs choix. Les développeurs de calculateurs doivent garder à l'esprit la nécessité de développer des indicateurs pertinents, efficace en rapport avec l'objectif particulier de chaque étude, l'indicateur orientant l'interprétation. Une plus grande standardisation des méthodologies, à l'image des ACV qui suivent le référentiel ISO 14040 permettrait plus de clarté et de transparence dans l'interprétation des études. Cela permettrait de comparer plus facilement les évaluations GES et de créer des points de repères pour les non experts.

Pour conclure, en fonction de l'objectif des utilisateurs, chaque outil essaie de trouver le meilleur compromis entre ergonomie, consommation de temps et précision des résultats. Tant que les évaluations de GES seront principalement volontaires et que peu de conséquences économiques sont attendues (pas de taxe CO₂, affichage environnemental volontaire etc.), le coût et la complexité d'utilisation des calculateurs devraient rester limités. Si des politiques plus contraignantes sont instaurées, alors une amélioration de la standardisation et de la précision des résultats seront rapidement indispensables.

Suggestion de procédé pour le choix des calculateurs

L'utilisateur doit sélectionner les outils de manières de plus en plus restrictives selon les critères proposées, en s'appuyant sur les tableaux du rapport. Cependant, certains outils spécifiques n'étant pas disponibles, il sera obligé de s'orienter sur des outils plus généraux.



Mots clés: Gaz à effet de serre, calculateurs, évaluation environnementale

2 Introduction

Le changement climatique est reconnu comme l'un des enjeux environnemental majeur de ce siècle. Les secteurs agricoles et forestiers sont concernés par cet enjeu de plusieurs manières :

- 1) Les systèmes de production sont impactés par le changement de climat et doivent développer des stratégies d'adaptation.
- 2) Dans une partie importante du monde, l'agriculture dépend fortement d'intrants chimiques d'origine pétrolière, qui seront de plus en plus coûteux à l'avenir. D'autre part, la demande alimentaire croissante et le développement des bioénergies nécessitera une augmentation de la production globale.
- 3) La culture, l'élevage et la déforestation sont des sources majeures de GES.
- 4) La forêt et les terres agricoles peuvent être d'importants puits de carbone si des pratiques de gestion favorables sont utilisées.

Ainsi de nombreux outils de lutte contre le changement climatique ont été développés pour l'agriculture et la forêt. Deneff et al. (2012) classe ces outils de la manière suivante: les calculateurs, les modèles, les protocoles et les guides d'utilisateur. Ce rapport se concentre sur les calculateurs, c'est-à-dire les programmes web, Excel[®] ou autres, développés afin de calculer les émissions de GES des secteurs agricoles et forestiers. Les modèles, dans la définition de Deneff *et al* (2012). correspondent à des outils plus complexes, destinés à la compréhension des mécanismes et plutôt réservés aux chercheurs ; par opposition aux calculateurs qui doivent être accessibles et servir d'outils d'aide à la décision pour les politiques et porteurs de projets.

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) et l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) ont donc souhaité passer en revue ces différents calculateurs. L'objectif est d'aider les utilisateurs afin de choisir le calculateur le plus approprié à leur besoin, et de mettre en évidence les principales différences méthodologiques entre les calculateurs. Au final, l'objectif de ce travail est de promouvoir une plus grande transparence dans les « analyses carbone », une analyse critique des résultats par les utilisateurs et de proposer des pistes de développement pour les développeurs d'outils.

3 Méthodologie pour la revue

Cette synthèse a été réalisée en plusieurs étapes. Par une recherche internet et la lecture de publications, un grand nombre d'outils a été identifié (liste complète en Annexe 1). Les recherches bibliographiques ont été menées en anglais, français et espagnol. La majorité des calculateurs identifiés sont dédiés spécifiquement à un produit ou une filière (lait, viande, céréales, bois etc.), alors qu'un nombre plus restreint couvrent l'ensemble des secteurs (agriculture, élevage, foresterie, changement d'usage et déforestation etc.) A partir de cette liste étendue, seuls les calculateurs transversaux multi-activités ont été retenus pour l'étude, soit 18 au total (Tableau 2). Ces calculateurs pour exploitation agricole ou territoire ont été testés et comparés au regard de différents critères d'utilisation et de méthodologie. Un questionnaire pré-rempli a ensuite été envoyé aux développeurs d'outils afin de valider et compléter la grille de lecture. Le travail de synthèse de ces résultats est présenté ici.

Tableau 2 Liste des outils retenus pour l'analyse

calculateurs	Validation	Institut de développement	Responsable	Adresse mail
ALU	x	Colorado State University, (USA)	Stephen M. Ogle	ogle@nrel.colostate.edu
Calculateur AFD	no	Agence Francaise de Developpement (FR)		
CALM	x	Country land and Business Association (UK)	Derek Holliday	Derek.Holliday@cla.org.uk
Carbon Calculator for NZ Agriculture and Horticulture	x	AERU, Lincoln university (NZ)	Caroline Saunders	Caroline.Saunders@lincoln.ac.nz
Carbon Farming Calculator	x	Carbon Farming Group (NZ)	Clayton Wallwork	clayton@carbonfarming.org.nz
CBP; carbon benefit project	x	GEF, Colorado State University (USA)	Eleanor Milne Mark Easter	eleanor.milne@colostate.edu ; mark.easter@colostate.edu
CFF Carbon Calculator	x	Farm Carbon Cutting Toolkit (UK)	Jonathan Smith	jonathan@cffcarboncalculator.org.uk
Climagri®	x	ADEME, calculator developed by Solagro (FR)	Sarah Martin, Sylvain Doublet,	sarah.martin@ademe.fr sylvain.doublet@solagro.asso.fr
CoolFarmTool	x	Unilever Sustainable Agriculture, Sustainable Food Lab; University of Aberdeen (UK)	Jon Hillier (Aberdeen University)	j.hillier@abdn.ac.uk
CPLAN v2	x	SEE360 (UK)	Drew Coulter, Ron Smith & Jan Dick	drew@cplan.org.uk
Dia'terre®	x	ADEME (FR)	Audrey Trévisiol	audrey.trevisiol@ademe.fr
EX-ACT	x	FAO	Martial Bernoux, Louis Bockel	EX-ACT@fao.org , martial.bernoux@ird.fr , louis.bockel@fao.org
FarmGAS	yes	Australian Farm Institute (AUS)	Renelle Jeffrey	jeffrey@farminstitute.org.au
Farming Enterprise Calculator	x	Queensland university, Institute for Sustainable Resources (AUS)	Peter Grace	isr@qut.edu.au ;
Full CAM	no	Australian Government (AUS)	-	nationalgreenhouseaccounts@climatechange.gov.au
Holos	x	Agriculture and Agri-food Canada (CAN)	José M. Barbieri	Holos@agr.gc.ca
IFSC	yes	Peter University of Illinois (USA)	David Kovaicic, Peter McAvoy, Tim Marten, and Aaron Petri	pete@octagonal.org
USAID FCC	x	Winrock International (USA)	Felipe Casarim and Nancy Harris	carbonservices@winrock.org

Comment: Le calculateur Overseer n'a pas pu être testé par manque d'accessibilité

4 Couverture géographique des outils

L'ensemble des calculateurs identifiés ont été développés par des pays de l'Annexe 1 de la Convention sur le Changement Climatique (pays industrialisés) et la majorité se concentre donc sur des systèmes agricoles industrialisés. Les pays les plus actifs en termes de recherche sont les USA (bien que n'ayant pas ratifié le protocole de Kyoto), l'Australie, la Nouvelle Zélande, le Royaume Uni, le Canada, et la France. D'autres pays européens se concentrent plutôt sur des calculateurs spécifiques, notamment sur les biocarburants. Les calculateurs développés pour les « pays à faibles revenus » sont plutôt centrés sur les projets de développement et les « crédits carbone » (MDP). Il est intéressant de noter que certains pays émergents, fortement exportateurs tels le Chili ou l'Afrique du Sud développent leurs propres calculateurs pour leurs filières stratégiques (vin, agrumes etc.) ; peut-être afin d'anticiper l'évolution des réglementations des marchés occidentaux (éco-taxe, affichage environnemental etc.). Il est possible que certains calculateurs régionaux aient été ignorés s'ils n'étaient pas en anglais, français ou espagnol et non référencés dans ces langues. De nombreux cas d'étude ont été réalisés au Brésil, en Chine, en Inde et en Russie, des producteurs agricoles mondiaux majeurs. Cependant les calculateurs utilisés pour ces études proviennent systématiquement des institutions internationales ou des pays occidentaux, aucun calculateur spécifique à ces pays n'a pu être identifié. Aucun outil dédié pour l'Afrique du Nord ou le Moyen Orient n'a été trouvé non plus (calculateurs en langue arabes), alors que leur secteur agricole est particulièrement vulnérable au changement climatique.

Table 3 Les pays d'utilisation prioritaires des calculateurs

Pays d'utilisation (initial)	Principaux calculateurs identifiés*	Nombre total de calculateurs identifiés
Australie	FullCam; Farmgas; Farming Enterprise GHG Calculator; nombreux calculateurs filières spécifiques	>10
Canada	Holos	1
Chilie	Seulement des calculateurs filières	3
France	Climagri®, Dia'terre	3
Nouvelle Zélande	Carbon Calculator for New Zealand Agriculture and Horticulture; Carbon Farming calculator	2
Afrique du Sud	Spécifique au vin	1
Royaume uni	CALM; Cplan; CFF Carbon Calculator	4
USA	IFSC, principalement calculateurs filières (cultures, élevage, forêt etc.)	>10
Monde	EX-ACT; Cool Farm tool; calculateur AFD; CBP simple assessment; ALU	5
Pays en voie de Développement	USAID FCC	1

*seulement les calculateurs à l'échelle territoriale sont mentionnés ici. Le nombre total de calculateurs inclus ceux spécifiques à certaines filières ou produits.

5 Les développeurs de calculateurs

Plusieurs types d'acteurs développent des calculateurs « carbone ». Des équipes au sein des instituts de recherche publique fournissent gratuitement des calculateurs aux agriculteurs et aux décideurs politiques afin de mieux prendre en compte le changement climatique dans leurs stratégies. Elles mènent souvent en parallèle des travaux sur les mécanismes biophysiques impliqués dans les émissions de GES. Le secteur privé développe également ses outils. Ce sont généralement des calculateurs orientés sur l'analyse de produits, et développés dans le cadre des stratégies de développement durable des entreprises. Ces calculateurs peuvent être développés par des entreprises (ex : Cool Farm Tool) ou des filières (ex : vin), ils sont généralement accessibles gratuitement ou après un simple enregistrement. Les bureaux d'études ont également leurs calculateurs (ex : Cplan) ou peuvent utiliser des calculateurs officiels après l'obtention d'une licence et/ou une formation payante

(ex : Diaterre[®]). Enfin, des ONG ont développé des calculateurs pour sensibiliser les citoyens aux enjeux du changement climatique et promouvoir les pratiques durables.

6 La méthodologie préconisée par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)

Le GIEC est un groupe de scientifique international en charge de compiler et synthétiser l'ensemble des travaux concernant le changement climatique. Ils fournissent également des références et des guides de bonnes pratiques pour la comptabilité carbone (IPCC, 2006). Ces guides du GIEC sont mentionnés par tous les calculateurs de GES. Le GIEC distingue trois niveaux de comptabilité carbone. Le Tiers 1 correspond à une approche très macro, avec des facteurs d'émissions moyens fournis pour les grandes éco-régions du monde. L'approche Tiers 2 est assez similaire sauf que les données d'activités et les facteurs d'émissions utilisés sont plus précis, à l'échelle des états voire des régions. Enfin, l'approche Tiers 3 est bien plus détaillée et inclut la modélisation biophysique des phénomènes à l'origine des émissions de GES. Ces modèles sont disponibles actuellement que pour un nombre très limité de sources d'émissions et de zones pédo-climatiques.

Pour les émissions de CO₂ du secteur énergétique, de N₂O et de CH₄, l'approche générale est de multiplier une donnée d'activité (nombre d'animaux, surface, quantité de carburant etc.) par un facteur d'émission spécifique à chaque source. Pour les sources et les puits de CO₂ non énergétiques, l'IPCC préconise une approche selon la variation des stocks au cours du temps. Les émissions sont déduites des variations des quantités de carbone dans les différents compartiments : biomasse aérienne, biomasse souterraine, litière, bois mort et carbone du sol.

7 Temps et compétences nécessaires

Certains outils sont très simples à utiliser et la collecte des données est rapide, alors que d'autres nécessitent un investissement bien plus important. Ce n'est pas évident d'estimer précisément le temps nécessaire pour chaque outil ou chaque étude, car cela dépendra beaucoup du niveau souhaité de précision, de fiabilité, et de la disponibilité des données sur chaque territoire. Cependant, nous proposons une estimation permettant d'avoir une idée approximative et de comparer les outils entre eux (Tableau 4). Les compétences nécessaires correspondent à la fois aux compétences agronomiques/forestières et aux compétences informatiques pour l'utilisation de l'outil.

Tableau 4. Besoin en temps et en compétence

Calculateurs	Temps nécessaire à la réalisation d'une évaluation.	Compétence pour utiliser l'outil.
AFD calculator	++	+
ALU	++++	++++
CALM	++	++
Carbon benefit project CPB	+++	+++
Carbon Calculator for NZ Agriculture and Horticulture	+	+
Carbon Farming Group Calculator	+	+
CFF Carbon Calculator	++	+++
Climagri®	++++	++++
CoolFarmTool	++	++
CPLAN v2	++	++
Dia'terre®	++	++++
EX-ACT	+	++
FarmGAS	+++	+++
Farming Enterprise Calculator	+	+
FullCAM	++++	++++
Holos	+++	++
IFSC	+	+++
USAID FCC	+	++

Légende: + à ++++; de besoin minimal en temps (<1 jour)/compétence au besoin maximal de temps (>1 mois) /compétence (formation formelle obligatoire)

8 De nombreux calculateurs pour des objectifs différents

Une évaluation des GES peut être réalisée pour différentes raisons, selon les acteurs et les contextes locaux. Cette tentative de classification n'est pas stricte, et certains calculateurs peuvent donc correspondre à plusieurs catégories. Le but est de proposer une grille de lecture avec des critères clés pour guider l'utilisateur. Cette classification complète les typologies plus large proposées par la Coalition on Agricultural Greenhouse Gases (C-AGG, 2010; Driver et al., 2010a), celle de Post et al. (2001) sur les émissions des sols et celle de Milne et al. (2012) sur l'agriculture vivrière.

- Sensibilisation:

Une série de calculateurs principalement pour les agriculteurs et les conseillers agricoles. L'objectif est de sensibiliser à la problématique du changement climatique et au rôle de l'agriculture. Ces calculateurs sont très simples d'utilisation et permettent d'identifier les sources principales de GES en quelques clics. Ils sont généralement accessibles gratuitement sur internet. Ils suivent une approche de type Tiers 1, avec de fortes incertitudes. Ils excluent souvent le carbone du sol et les changements d'utilisation des terres. Exemple: *Carbon Calculator for New Zealand Agriculture and Horticulture (NZ)*, *Cplan v0 (UK)*; *Farming Enterprise GHG Calculator(AUS)*; *US cropland GHG calculator (USA)*.

- Reporting/inventaire:

Ces calculateurs peuvent fonctionner à l'échelle de l'exploitation agricole ou du territoire et doivent être en mesure de prendre en compte une large diversité de pratiques. Ils utilisent une approche Tiers 1 ou Tiers 2. L'objectif est d'avoir une description précise de la situation actuelle. L'utilisation d'une méthodologie homogène permet d'avoir une base de données comparable dans le temps et entre les exploitations ou territoires. Cette connaissance fine du territoire sous l'angle GES doit permettre la mise en place des politiques adaptées sur cet enjeu.

- Calculateurs territoriaux : Evaluation des émissions de GES souvent découlant d'une obligation légale. Les calculateurs doivent éviter les doubles comptes entre territoire et correspondre à des standards officiels. Ils ont de fortes incertitudes à cause des données d'activités et des facteurs d'émissions. Ils peuvent demander beaucoup de temps (des jours voire des mois de travail pour une étude), notamment pour la récolte des données. Exemple: *ALU (World)*; *Climagri® (FR)*
- Calculateur pour l'exploitation agricole: Pour connaître en détails la situation sur son exploitation et permet ensuite à l'agriculteur d'envisager une stratégie de réduction des émissions. Cependant ces calculateurs sont plus conçus pour le diagnostic que pour tester

facilement différents projets. Exemple: *Dia'terre*[®] (FR); *CALM* (UK); *CFF Carbon Calculator* (UK)

- Evaluation de projets

Les calculateurs pour l'évaluation de projet comparent la situation actuelle et une situation avec projet et sans projet. Ils peuvent être différenciés selon qu'ils sont destinés à des projets en rapport avec des crédits carbone ou non. Pour les projets dont l'objectif principal est la mitigation et le stockage du carbone, les outils devront être plus précis et souvent plus complexes d'utilisation, alors que pour les projets de développement rural (ex : sécurité alimentaire, restauration des terres dégradés, irrigation etc.), les outils doivent rester très accessibles et peu consommateurs de moyens. Ces calculateurs doivent prendre en compte l'ensemble des options pour la mitigation (dont le sol).

- Calculateurs pour les crédits carbone: Principalement pour les pays où l'agriculture est assujettie aux crédits carbone ou pour les projets dans le cadre du Mécanisme pour un Développement Propre (MDP). Exemple: *Farmgas (AUS)*, *Carbon Farming Calculator (NZ)*; *Forest tool : TARAM (world)*, *CO2 fix (world)*.
- Calculateurs non centrés sur les crédits carbone: Ces calculateurs permettent d'analyser différents types de projets sous l'angle carbone, en ciblant les modifications (pas de description exhaustive du territoire). Ils doivent être faciles d'utilisation et peu coûteux. Ils fournissent des informations aux gestionnaires, financeurs et acteurs des projets dans l'objectif d'améliorer la conception des projets sous l'angle carbone. Exemple: *EX-ACT (World)*; *US AID FCC (Developing countries)*, *CBP (World)*, *Holos (CAN)*, *CAR livestock tools (US)*
- Analyse de filière et de produits L'objectif est de comparer des produits plutôt que des territoires, avec souvent une logique de marché (ex : étiquetage environnemental). Cela permet de comparer les émissions à niveau de production similaires, et ainsi d'éviter le déplacement d'émissions vers d'autres territoires (fuites). Les résultats sont exprimés en quantité de GES par kg de produit. Généralement ces calculateurs vont intégrer la transformation et le transport. Exemple: *Cool farm tool (World)*; *Dia'terre[®] (FR)*, logiciels ACV couplés aux bases de données (*SimaPro[®]*, *Ecoinvent[®]*, *LCA food etc.*; données disponibles principalement pour les pays occidentaux.)

Tableau 5: Classification des calculateurs selon leurs objectifs et leur zone géographique

OBJECTIF DE L'UTILISATEUR		CALCULATEURS ET LEUR ZONE GEOGRAPHIQUES
Sensibilisation		Carbon Calculator for New Zealand Agriculture and Horticulture (NZ), Cplan v0 (UK); Farming Enterprise GHG Calculator(AUS); US cropland GHG calculator (USA).
Reporting/ Inventaires	Outils territoriaux	ALU (World); Climagri (FR), FullCam (AUS)
	Outils exploitation agricole	Diaterre(FR); CALM (UK); CFF Carbon Calculator (UK);IFSC (USA)
Evaluation de projets	Centrés sur les crédits carbone	Farmgas (AUS), Carbon Farming tool (NZ);Forest tools : TARAM (world), CO2 fix (world)
	Non centrés sur les crédits carbone	EX-ACT (World);US AID FCC (Developing countries), CBP (World), Holos(CAN), CAR livestock tools(USA)
Analyse de filière et de produits		Cool farm tool (Monde), Diaterre (FR), logiciels ACV et bases de données associées (SimaPro, ecoinvent, LCA food etc: données principalement pour les pays occidentaux)

AUS: Australia; CAN: Canada; FR: France, NZ: New Zealand; UK: United Kingdom; USA: Etats Unis; FullCam: un calculateur utilise par l'Australie pour sa comptabilité carbone nationale. Il n'évalue que les flux de carbone, pas le N₂O ni le CH₄. Un calculateur territorial avec un haut niveau de précision, un couplage avec des bases de données et des modèle bio-physique.

8.1 De la parcelle au territoire

Cette étude se concentre sur les calculateurs permettant une évaluation territoriale par la prise en compte de différentes activités de culture, d'élevage et de foresterie. Cette approche territoriale peut aller de l'exploitation agricole, jusqu'à la région ou le pays. Au niveau de l'exploitation agricole, des données précises peuvent être obtenues directement, et le nombre d'itinéraires techniques (ITK) est restreint pour chaque type de culture. Par contre, en travaillant sur des échelles plus grandes, les données doivent être obtenues dans des bases de données statistiques, et peuvent être difficiles à récolter. A l'échelle de territoires étendus, le recours aux dires d'experts pour estimer les pratiques est souvent nécessaire, ce qui augmente les incertitudes. C'est pour cela que différents calculateurs ont été développés en fonction de l'échelle de travail. Cependant, le niveau d'incertitude n'est pas corrélé de manière linéaire avec l'échelle de travail. En effet, il est souvent plus facile de récolter des données pour des territoires administratifs (région, état), que pour des bassins versants par exemple. Travailler à échelle « intermédiaire » permet également de lisser certaines hétérogénéités très locales (ex : type de sol, itinéraires techniques) grâce à l'utilisation de moyennes (Post et al., 2001).

Dans le cadre d'évaluations territoriales, il est préférable d'utiliser des calculateurs conçus pour cette échelle (cf Tableau 5). Cependant ces calculateurs ne sont pas toujours disponibles pour la zone d'étude. Il faut alors utiliser des calculateurs travaillant à l'échelle de l'exploitation, et simuler une « ferme régionale » ou « nationale ». Une estimation des pratiques moyennes ainsi que la démultiplication des systèmes de gestion peuvent être nécessaires (ex : simulation d'une ferme avec à la fois un système de production laitière intensif et un système extensif). Certains calculateurs ne permettent pas d'avoir les deux systèmes au sein d'une même ferme. Les calculateurs les plus détaillés pour le niveau de l'exploitation agricole posent également des problèmes pour l'évaluation territoriale car ils requièrent des données sur les ITK qui ne sont pas disponibles à l'échelle territoriale, ou des données trop hétérogènes pour permettre des moyennes pertinentes sur le territoire (ex : détails sur le machinisme agricole etc.).

8.2 Zone d'usage des calculateurs

La validité d'utilisation des calculateurs s'étend des zones régionales (ex : Queensland en Australie) à une validité mondiale (ex : EX-ACT). Certaines sources d'émissions sont spécifiques de contextes régionaux tels le brûlis des savanes ou des résidus de culture, la riziculture ou les tourbières. Les calculateurs globaux doivent permettre de prendre en compte l'ensemble de ces sources, alors que les calculateurs régionaux peuvent se concentrer sur les sources locales pertinentes. La disponibilité des données varie grandement selon les régions du monde. Les calculateurs « globaux » doivent donc se contenter d'indicateurs simples. Ils ont des difficultés à relier les émissions à des aspects économiques, alors que les calculateurs « régionaux » peuvent plus facilement être construits en anticipant les données disponibles et intégrer des indicateurs économiques pertinents. Les actions de mitigations à promouvoir dépendent grandement de chaque contexte régionale, des systèmes de productions et des contraintes socio-économiques spécifiques à chaque territoire. Ainsi il est plus facile pour les calculateurs régionaux de proposer et d'évaluer des stratégies d'amélioration. Cependant, comme mentionné précédemment, les investissements pour le développement des calculateurs sont très variables selon les pays et l'existence de calculateurs globaux est très utile afin de palier à l'absence d'outils spécifiques pour certaines zones.

9 Prise en compte du sol et du climat

En agriculture, plusieurs mécanismes d'émissions dépendent de l'environnement local, et en particulier du type de sol et du climat. Ces paramètres sont particulièrement importants concernant les émissions de N₂O (processus de nitrification-dénitrification) et le stockage du carbone dans les sols.

La bonne prise en compte des émissions du sol en agriculture est capitale. En effet, les émissions de N₂O des sols atteignent 40% des émissions agricoles totales, et le stockage/déstockage de carbone des sols est le puits global le plus important, avec la capacité de stocker ou relâcher l'équivalent de plusieurs années d'émissions anthropiques tous secteurs confondus (Baumert et al., 2005). Le temps de résidence du carbone dans les puits varie de quelques semaines à plusieurs milliers d'années selon le type de puits.

A l'échelle régionale et locale, le climat est généralement assez homogène. Il faut être vigilant sur les zones insulaires et montagneuses où les variations peuvent être assez importantes à petite échelle. D'autre part, les pratiques agricoles peuvent avoir un impact important sur les microclimats (ex : haies, résidus ou sol nu), impactant les processus biophysiques impliqués dans les émissions de GES, telle la volatilisation. Les facteurs d'émissions et les calculateurs disponibles actuellement n'ont pas une précision suffisante pour intégrer les impacts des variations du microclimat sur les émissions de GES des sols.

L'hétérogénéité des sols peut également être très importante à faible échelle, particulièrement concernant la teneur en carbone qui est fortement impactée par les pratiques agricoles. Aussi, afin de limiter les incertitudes pour les émissions des sols, l'approche au niveau de la parcelle semble plus appropriée que l'échelle de la ferme ou de la région.

Afin de prendre en compte dans les calculateurs les effets du sol et du climat sur les émissions, trois options sont possibles :

- Données d'entrée spécifiques définies par l'utilisateur.
- Utilisation de moyennes régionales ou nationales
- Couplage avec des outils de Système d'Information Géographique (SIG).

Les données les plus précises peuvent être obtenues en demandant à l'utilisateur de décrire son sol et son climat avec des paramètres clés tels que la température, les précipitations, le stock de carbone du sol, sa densité apparente, sa texture etc. Ces données doivent être obtenues à partir de lots d'échantillons afin de réduire les incertitudes, le nombre minimum de mesures étant décrit dans la littérature scientifique, en fonction de chaque paramètre (Post et al., 2001). Il faut être vigilant

sur les échelles temporelles et spatiales considérées lorsque l'on souhaite obtenir des valeurs pour la séquestration de carbone des pratiques agronomiques (Bernoux et al., 2006). La mesure directe en laboratoire de la quantité de carbone dans les sols est habituellement compliquée, lente et chère. A l'opposée, les paramètres cités précédemment (t° , précipitation, texture etc.) sont facilement mesurables sur le terrain et permettent d'utiliser des modèles biophysiques (une fois calibrés) afin de produire des valeurs fiables pour les émissions des sols et le stockage du carbone. Les principaux modèles de fonctionnement des sols et d'émissions de GES identifiés sont Century-Daycent (Del Grosso et al., 2001; Parton and Rasmussen, 1994), CERES-EGC (Gabrielle and Lehuger, 2009), RothC (Coleman and Jenkinson, 1999), DNDC (Giltrap et al., 2010), EPIC 5125 (Williams et al., 1984) et Socrates (Grace et al., 2006). Ces modèles « à compartiments » fonctionnent en considérant la dynamique de différents pools de matières organiques, avec une stabilité variable. Ces modèles fonctionnent à l'échelle de la parcelle et peuvent être utilisés pour des approches territoriales s'ils sont liés à des bases de données spatialisées (SIG). Ce lien entre les modèles et les SIG est en construction dans des projets comme GEFSOC et APEX. Le VCS (Verified Carbon Standard), qui valide des projets de crédits carbone, a récemment approuvé sa première méthodologie pour les « pratiques agricoles durables », méthodologie qui préconise d'utiliser le modèle Roth-C afin d'estimer les variations de stocks de carbone des sols (VCS, 2012).

Pour décrire les sols et le climat dans les calculateurs, des moyennes nationales sont souvent utilisées, ce qui correspond à l'approche Tiers 1 de l'IPCC de. Cependant ces moyennes cachent une forte hétérogénéité. Par exemple, en France les sols et le climat varient très fortement entre la région Méditerranéenne, les Alpes et le bassin Parisien. L'utilisation de données nationales à l'échelle d'une ferme induit donc de très fortes incertitudes sur les résultats.

L'approche SIG se développe avec la réalisation de cartes climatiques, de cartes des sols et plus généralement la récolte de nombreuses données spatialisées dans les différentes régions du globe. L'utilisation de SIG permet à l'utilisateur de sélectionner une zone, ce qui définit en même temps le type de climat et de sol décrit dans la base de données sous-jacente. La précision des valeurs dépend de la résolution de la base de données. Cette approche est la plus simple pour l'utilisateur, cependant elle ne permet pas de prendre en compte l'historique des pratiques agricoles. Actuellement peu de cartes des sols fournissent directement des valeurs pour le carbone du sol et pour estimer son potentiel de stockage. Cependant la plupart des cartes vont fournir les paramètres permettant d'utiliser les modèles pour calculer les émissions de N_2O ou de CO_2 . Les technologies de détections à courte distance et les satellites (ex : NIRS-MIRS) pourraient permettre à l'avenir d'obtenir des estimations pour de grandes échelles, et à bas coûts, des stocks de carbone des sols et de la biomasse (Post et al., 2001; Gomez et al., 2008). La variation de ces stocks dans le

temps permettra de connaître ces émissions avec une bonne précision. Pour l'imagerie aérienne et satellite, le principal problème est la couverture quasi-permanente des sols par des végétaux, qui empêche l'observation directe du sol. A courts termes, il paraît complexe d'obtenir des outils de mesure des flux de N₂O et CH₄ à bas coûts et pour de larges échelles.

Une méthodologie pour la planification et la vérification de l'évolution du carbone des sols à l'échelle régionale est proposée par Post et al. (2001). Saby et al. (2008) a décrit les dispositifs à mettre en place afin d'être en mesure de détecter les changements de carbone du sol pour chaque pays Européen. Ces études décrivent étape par étape les méthodes d'échantillonnage, d'analyse et d'extrapolation régionale afin de réduire les incertitudes dans la mesure du carbone du sol. Il reste des efforts considérables pour la plupart des pays afin de se doter d'outils de suivi capable d'identifier des changements de carbone sur une échelle de temps annuelle. Actuellement les réseaux de mesure permettent d'identifier avec une bonne fiabilité des changements des stocks de carbone du sol à l'échelle de 10 ans environ (Saby et al., 2008).

Un aspect important concernant le stockage du carbone dans les sols est la profondeur prise en compte. Pour le moment, le GIEC impose pour les inventaires nationaux de considérer au minimum une profondeur de 30 cm, mais indique que des changements significatifs peuvent avoir lieu sur la couche 30-50cm dans certaines conditions, notamment les sols tropicaux profonds (IPCC, 2006). Cette limite de 30cm est principalement due à des raisons pratiques (simplicité d'échantillonnage) et correspond à la profondeur de labour courante. En sachant que les racines des céréales peuvent atteindre plus d'1 mètre de profondeur, et celles des arbres plusieurs mètres, il est clair que dans certaines zones les processus impliquant les nutriments et le stockage du carbone peuvent avoir lieu bien au-delà de 30 cm même en conditions tempérées (Guo and Gifford, 2002). Certains auteurs décrivent des quantités de carbone importantes jusqu'à 3m de profondeur and montrent que jusqu'à 50% du carbone total pourrait se trouver sous la zone des 30 cm (Jobbágy and Jackson, 2000; Salomé et al., 2010). Ce sera particulièrement le cas dans les systèmes agroforestiers, où les racines des arbres sont forcées à se développer sous la culture, et pour les prairies qui ont un fort taux de renouvellement des racines profondes (Ramachandran Nair et al., 2009). A l'avenir, une meilleure prise en compte du carbone dans les horizons profonds du sol semble donc nécessaire, particulièrement sachant que ce carbone peut être stocké pour de plus longues périodes que le carbone superficiel (activité biologique réduite en profondeur). Il semblerait que les mécanismes impliquant le carbone du sol soient différents dans les horizons profonds et superficiels. Des études récentes ont observé une diminution du carbone stable à la suite d'un apport de carbone frais dans les horizons profonds. L'hypothèse principale est que l'apport de matière organique fraîche augmente

l'activité biologique, qui va dégrader la matière fraîche et les stocks de carbone plus stable (Fontaine et al., 2007). Ce phénomène appelé « priming-effect » n'est pas pris en compte dans les modèles actuels. De manière générale, il faut être vigilant avec l'utilisation des modèles de simulation de la matière organique des sols car ils peuvent fonctionner selon des profondeurs variables différentes des 30cm préconisés (Post et al., 2001). Les gains de précisions qui seraient permis par une intégration plus poussée de la dynamique du carbone organique des sols dans les calculateurs (carbone des horizons profonds, priming effect) doivent être comparés aux coûts d'obtention des données, et donc dépendre de l'objectif des calculateurs.

Les zones humides (principalement les tourbières), également appelés sols organiques, méritent une attention particulière. Ils contiennent de large quantité de carbone mais sont également des sources majeures d'émissions de CH₄, en raison des conditions d'anaérobie. Les émissions des zones humides résultent d'équilibres complexes entre les processus de méthanisation et d'oxydation, dépendant des communautés bactériennes du sol, de la végétation et des propriétés physiques du sol. Dans le cas de terrains drainés pour l'agriculture, on a une diminution des émissions de CH₄ et une augmentation des émissions de N₂O et CO₂. A l'opposée, la régénération des tourbières doit arriver au résultat inverse (Le Mer and Roger, 2001; Couwenberg, 2009; Couwenberg and Fritz, 2012). Dans les zones concernées par des zones humides, il est indispensable que les calculateurs incluent ces émissions (Tableau 6). Les valeurs fournies par le GIEC souffrent de fortes incertitudes et ont été critiquées (Couwenberg, 2009). Afin d'améliorer la précision des estimations, l'utilisation de modèles bio-physiques couplés aux calculateurs GES serait nécessaire, aucun calculateur identifié ne propose cela actuellement. L'autre source majeure de CH₄ provient de la riziculture. Due à son fort poids économique, la production de riz a été largement étudiée et de nombreux calculateurs ont développé des modules spécifiques pour ces émissions (Tableau 6).

L'urbanisation et la perte de terres agricoles affectent la plupart des régions du monde. Cependant peu d'information est disponible sur la dynamique du carbone en cas d'urbanisation (Pouyat et al., 2002). Les calculateurs ne prennent pas en compte spécifiquement l'urbanisation des terres pour le moment, bien que les terres urbanisées puissent être assimilées à des « terres dégradées » dans certains calculateurs.

Les principales causes d'émissions de carbone des sols sont encore débattues dans la communauté scientifique. Les preuves de l'impact des modes de gestion agronomiques sur le carbone du sol existent et sont prises en compte par quelques calculateurs (ex : Ex-act). Cependant des études récentes indiquent que le potentiel de stockage du carbone des sols a probablement été surestimé, principalement en Europe et concernant les pratiques de non-labour (Powlson et al., 2011). En effet, les changements de pratiques agronomiques peuvent induire une augmentation du

carbone des sols, mais également être partiellement ou complètement compensés par une augmentation des émissions de N₂O ou de CH₄ selon les conditions locales spécifiques (principalement le pH et l'oxygène disponible) (Rochette, 2008; Labreuche et al., 2011). Ceci n'est pas pris en compte par les calculateurs.

Les sols avec le plus fort potentiel de stockage de carbone seraient les sols dégradés, principalement présents dans l'hémisphère sud. Smith et al. (2008) estime que 75% du potentiel de stockage du carbone des terres a lieu dans les pays en voie de développement.

Un aspect important concernant le carbone du sol est que l'augmentation de la matière organique des sols permet une meilleure conservation de l'eau et des nutriments et ainsi améliore la fertilité globale des systèmes (Hunt et al., 1996; Rawls et al., 2003; Lal, 2006). Ces « rétroactions positives » ne sont pas incluses dans les calculateurs. Les développeurs d'Ex-act sont actuellement en train de travailler sur le développement de modules pour l'eau et le carbone dans ce but, mais il manque encore des références quantitatives afin de relier l'augmentation du carbone du sol avec une amélioration des rendements pour chaque écosystème (Bernoux 2012, communication personnelle).

Enfin, certaines études indiquent qu'au niveau global, la principale cause pour les pertes de carbone du sol serait le changement climatique (Bellamy et al., 2005). Ainsi il serait intéressant que les calculateurs ne considèrent pas seulement le climat actuel pour estimer les émissions et le potentiel de stockage des sols, mais considèrent également le climat futur, et son impact sur la modification de l'activité biologique des sols. Des modèles climatiques globaux pourraient être utilisés avec cet objectif (Cubasch et al., 2001; Ruosteenoja et al., 2003; Marti et al., 2005; Wang, 2005).

10 Paramètres comptabilisés par les calculateurs

Un point majeur révélé par cette étude est le manque d'homogénéité concernant les périmètres d'étude pris en compte. En effet, chaque calculateur GES prend en compte des sources différentes. Certains incluent l'énergie, d'autres les infrastructures et le transport, certains les émissions suite à l'apport d'azote par la fixation symbiotique, d'autres le carbone du sol, etc. Ceci empêche toute comparaison directe entre des études faites avec différents calculateurs. Pour une meilleure interprétation des résultats, l'utilisateur a besoin de connaître des valeurs de références (ex : émissions moyennes par ha de céréale en Europe), rarement fournis par les guides d'utilisateurs. Tant qu'il n'y aura pas de standardisation des périmètres et des méthodes, ces références ne seront pas disponibles.

Ces différences de périmètre peuvent impacter fortement le résultat final (Soil Association Producer Support). Cependant, dans la plupart des situations, les calculateurs prennent bien en compte les principales sources de GES et les variations de périmètres ont peu d'impact sur le résultat final, comme indiqué par des études comparatives de différents calculateurs sur une même situation (Soil Association Producer Support; FAO, 2010).

Les études d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) indiquent que l'étape agricole est l'étape principale d'émissions de GES pour la majorité des produits alimentaires (Weber and Matthews, 2008; Roy et al., 2009; Virtanen et al., 2010). Ainsi le transport (sauf si par avion); la transformation et l'emballage (sauf si verre ou métal) ne sont généralement pas des étapes clés en termes d'émissions de GES pour l'alimentation.

La source la plus significative manquante dans plusieurs calculateurs est l'émission ou le stockage de CO₂ liées aux changements de stocks de carbone du sol et de la biomasse suite à un changement d'usage des terres. Ceci peut avoir un impact très important sur le résultat final, particulièrement si on a des conversions entre de la forêt ou des prairies vers de la grande culture ou de l'urbanisation. A l'échelle globale, la déforestation représente à elle seule 11% des émissions de GES anthropiques (Van der Werf et al., 2009). Par exemple, dans des conditions européennes, pendant une période de 20 ans, les émissions de CO₂ annuelles dues à la perte de carbone du sol et de la biomasse, suivant la conversion d'une prairie ancienne à de la grande culture, sont aussi importantes que l'ensemble des émissions annuelles pour l'activité de production de blé (fertilisation, carburant etc.) (Figure 1). Après 20 ans on considère que le sol a atteint un nouvel équilibre et qu'il ne reste plus que les émissions liées à la production (Arrouays et al., 2002; Guo and Gifford, 2002). Malgré l'importance du poste « changement d'usage des terres », plusieurs calculateurs l'ignore pour des raisons pratiques, de simplification méthodologique ou pour des raisons de permanence (le changement d'utilisation des terres est réversible).

Le changement d'affectation (ou changement d'usage) des sols direct (CASd) peut être comptabilisé de manière objective : si un projet favorise un changement d'affectation sur un territoire, le changement des stocks de carbone de ce territoire peut alors être comptabilisé. Cependant, il peut être argumenté que ce changement va avoir un impact sur d'autres territoires, en se basant sur le fait que la demande en alimentation n'est pas flexible. Cependant, les changements d'usage des terres ne dépendent pas uniquement de l'équilibre offre/demande, mais également de nombreux paramètres socio-économiques. L'augmentation de la production peut être obtenue soit par une augmentation des rendements (intensification : changement des pratiques mais pas de changement d'usage) ou par l'extension des zones cultivées. Sur le terrain, les facteurs déterminants les changements d'usage des sols peuvent être l'accès à la propriété, les capacités de production et d'investissement ou

encore les lois et réglementations nationales avec la capacité des états à les faire appliquer ; bien plus que la demande alimentaire globale voire locale. Ainsi, il est très difficile d'établir un lien de causalité clair entre les changements sur un territoire et les conséquences sur un autre, parfois à des milliers de kilomètres (ex : cas des bioénergies ou du soja pour l'élevage bovin). Ces changements, appelés indirects (CASI) peuvent être calculés par des modèles économiques ou de l'évaluation conséquentielle (évaluation basée sur dires d'experts). Bien qu'il soit clair qu'il existe des interactions, la quantification précise de ces changements indirects est donc extrêmement difficile et représente un enjeu majeur pour le domaine de l'évaluation environnementale (Lambin et al., 2001; Veldkamp and Lambin, 2001; Lapola et al., 2010; Plevin et al., 2010; De Cara et al., 2012). Actuellement, seuls les changements directs sont parfois pris en compte par les calculateurs.

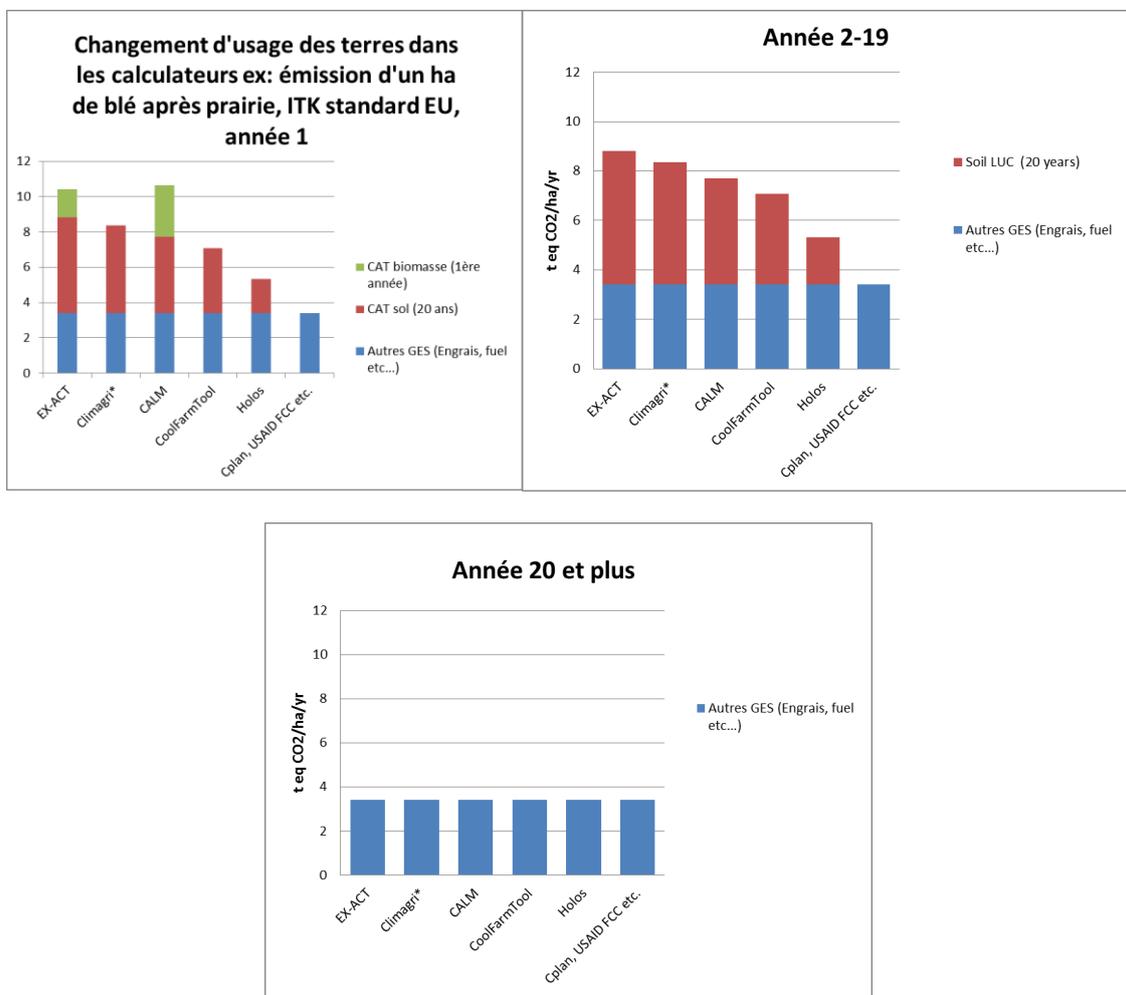


Figure 1 Prise en compte du changement d'usage des sols direct

La comptabilisation des émissions de N₂O des sols diffère selon les calculateurs, avec un impact significatif sur les résultats. Le GIEC recommande que toutes les émissions de N₂O résultants de modification anthropique du cycle de l'azote (N) soient prises en compte. Les apports d'azote (N) anthropiques sont : les engrais de synthèse, les déjections des animaux et autres engrais organiques, la fixation biologique d'azote par les légumineuses, la déposition d'azote et la minéralisation des résidus de culture laissés au champ. Les quantités de N₂O émises dépendent des conditions pédo-climatiques locales, qui influencent les processus de nitrification/dénitrification (IPCC, 2006). Pour la fixation biologique, le GIEC considère qu'il n'y a pas d'évidences en ce qui concerne les émissions de N₂O, et que cette source peut donc être négligée. Concernant les calculateurs, certains considèrent l'ensemble des sources de N, alors que d'autres se contentent de comptabiliser les apports d'engrais minéraux et/ou organiques. Ainsi, il est important de bien vérifier quelles sont les sources de N prises en compte dans les calculateurs, et de l'indiquer dans les rapports avec les résultats.

L'autre différence majeure concernant les émissions de N₂O des sols est la différenciation entre émissions directes et indirectes. Les émissions directes sont celles qui ont lieu sur la parcelle à la suite d'apports azotés, alors que les émissions indirectes résultent du déplacement d'une partie de ces intrants azotés par le sol et les eaux de surface. Les procédés à l'origine des émissions indirectes sont le lessivage, l'érosion de surface, la volatilisation et re-déposition de l'azote. Au final, les émissions indirectes peuvent être aussi élevées que les émissions directes dans des systèmes intensifs (Hénault et al., 1998; Mosier et al., 1998). Il faut être vigilant pour éviter les doubles comptes lorsqu'on différencie les sources directes et indirectes. Certains calculateurs font cette différenciation, alors que d'autres l'ignorent. Pour l'instant, il est possible d'identifier chaque processus dans le cycle de l'azote mais les facteurs d'émissions spécifiques pour chaque processus manquent, donc la différenciation n'impacte pas fortement sur les résultats. Ainsi, si la prise en compte des émissions directes et indirectes permet d'améliorer un peu la précision, c'est principalement la bonne prise en compte de l'ensemble des sources de N qui influence le résultat final. Encore une fois, la meilleure manière d'améliorer l'estimation des émissions de N₂O lors du cycle de l'azote est probablement le développement de modèles mécanistes. Ces modèles pourraient fournir des facteurs d'émissions plus précis, ou être directement couplés aux calculateurs.

Les systèmes agroforestiers sont particulièrement difficiles à prendre en compte dans les calculateurs. Le GIEC ne fournit pas de facteurs d'émissions ou de méthodologies spécifiques pour ces systèmes dans leur ensemble. Ainsi, la majorité des calculateurs considèrent un système de culture annuel contigu à un système pérenne ou forestier. Ceci ne prend pas en compte les interactions entre la culture et les arbres, qui ont pourtant un impact important sur le stockage du carbone. Dans notre étude, les calculateurs étant décrits comme « incluant les systèmes agroforestiers » sont ceux

dans lesquels l'utilisateur peut clairement définir, dans leur ensemble, les systèmes agroforestiers.

La transformation des récoltes sur l'exploitation est souvent intégrée, mais mal identifiée dans les calculateurs. En effet, les principaux procédés de transformation sur l'exploitation sont le séchage, le refroidissement, le chauffage et la cuisson. Ils peuvent être pris en compte dans les modules de consommation d'énergie, avec le gaz et l'électricité. Les émissions pour les matériaux et les machines associées ne sont jamais incluses. Ces aspects concernant la transformation mériteraient d'être améliorés dans les calculateurs car ces sources peuvent permettre des gains de GES considérables, en améliorant le fonctionnement des tanks à lait ou en passant à de l'énergie renouvelable pour le séchage du foin par exemple. Le potentiel de gains de GES dépendra souvent du « contenu carbone » du mix électrique local.

Tableau 6a Activités prises en compte dans les calculateurs

Tools	Cultures tempérées	Cultures tropicales	Riz	Prairies	Elevage laitier (bovin)	Autres élevage	Arbres isolées, haies, agroforesterie	Production pérenne (verges, vigne)	Horticulture et production sous serre.	Forêt
AFD calculator	x	x	non	x	x	x	non	non	non	non
ALU	x	x	x	x	x	x	x	x	non	x
CALM	x	non	non	x	x	x	non	x	non	x
Carbon benefit project CPB	x	x	x	x	x	x	x	x	non	x
Carbon Calculator for NZ	x	non	non	x	x	x	non	x	non	non
Carbon Fming Group Calc.	x	non	non	x	x	x	non	non	non	x
CFF Carbon Calculator	x	non	non	x	x	x	x	x	x	x
Climagri®	x	non	non	x	x	x	x	x	x	x
CoolFarmTool	x	x	x	x	x	x	non	x	x	x
CPLAN v2	x	non	non	x	x	x	non	x	non	x
Dia'terre®	x	non	non	x	x	x	x	x	non	non
EX-ACT	x	x	x	x	x	x	Pas vrmt	x	x	x
FarmGAS	x	non	non	x	non	x	x	x	partielmt	non
Farming Enterprise Calculator	x	x	non	x	x	bovins+ovins	non	non	non	non
FullCAM	x	x	non	x	non	non	non	non	non	x
Holos	x	non	non	x	x	x	x	x	non	non
IFSC	x	non	non	x	x	x	non	non	partielmt	non
USAID FCC	x	x	non	x	x	X sauf volaille	x	x	non	x

Tableau 6b Sources de GES prises en comptes

Calculateurs	Infrastructure CO ₂	Carburants fossiles et électricité CO ₂	Emissions de N ₂ O des sols après apports d'engrais minéraux et orga.	Emissions entérique CH ₄	Déjections CH ₄	N ₂ O dû à l'N de la fixation biologique des légumineuses.	N ₂ O dû à l' N des résidus	Emissions incorporées (engrais, fourrages et concentrés etc.)
AFD calculator	x	x	x	x	x	non	non	x
ALU	non	non	x	x	x	non	x	non
CALM	non	x	x	x	x	x	x	Seulmt engrais
Carbon benefit project CPB	non	non	x	x	x	non	x	non
Carbon Calculator for NZ Agriculture and Horticulture	non	X	x	x	x	non	non	x
Carbon Farming Group Calculator	non	x (calc. Associé)	x (pas les engrais mnrx)	x	x	non	non	non
CFF Carbon Calculator	x très détaillé	x	x	x	x	x	x	x
Climagri®	Machines, pas bâtiments	x	x	x	x	non	x	x
CoolFarmTool	non	x	x	x	x	x	x	x
CPLAN v2	non	x	x	x	x	x	x	non
Dia'terre®	x	x	x	x	x	non	x	x
EX-ACT	x	x	x	x	x	non	non	oui: engrais non: alimentation Ale
FarmGAS	non	non	x	x	x	x	x	non
Farming Enterprise Calculator	non	x (carburant, pas l'électricité)	x	x	x	non	non	non
FullCAM	non	non	non	non	non	non	non	non
Holos	non	x	x	x	x	non	x	x
IFSC	non	x	x	x	x	non	non	oui: engrais non: alimentation Ale
USAID FCC	non	non	non	non	non	non	non	non

Calculateurs	Brulis, émissions GES hors CO2	Riz CH ₄	Changemnt des stocks de C du sol en cas de changement d'usage des sols (CASd).	Changemnt des stocks de C de la biomasse (aérienne et sous-terrine) lors de CASd	Changemnt des stocks de C du sol suite à modification des pratiques (résidus, labour)	Zones humides CH ₄	Transformation hors de l'exploitation (CO ₂ principalement, mais aussi HFC, PFC etc.)	Transport CO ₂	Production d'énergie renouvelable (solaire, éolien, biocarburants etc.)
AFD calculator	non	non	non	seulmt déforestation	non	non	non	x	non
ALU	x	x	x	x	x	x	non	non	non
CALM	non	non	x	X (forêt)	non	x	non	non	x
Carbon benefit project CPB	x	x	x	x	x	x	non	non	non
Carbon Calculator for NZ Agriculture and Horticulture	non	non	non	non	non	non	non	non	non
Carbon Farming Group Calculator	non	non	non	x (forêt)	non	non	non	non	non
CFF Carbon Calculator	non	non	x	x	x	x	x	x	x (pas de détails)
Climagri®	non	non	non, possibilité de calcul indirect	x	non	non	non	non	non (seulmt biodiesel+biogaz)
CoolFarmTool	x	x	x	x	x	non	x	x	x
CPLAN v2	non	non	x	x	non	non	non	non	non
Dia'terre®	non	non	x	non	non	non	non	non	x
EX-ACT	x	x	x	x	x	x	non	non	non
FarmGAS	x	non	non	x (biom.aérienne)	non	non	non	non	non
Farming Enterprise Calculator	non	non	non	non	x seulmt résidus ("socrate" model)	x	non	non	non
FullCAM	non	non	x	x	x	non	non	non	non
Holos	non	non	Seulmt sols agricoles : culture/prairie/jachère ; pas de déforestation	x (biom.aérienne)	x (modèle century)	x	non	non	non
IFSC	non	non	x (seulmt cultures annuelles, COMET-VR)	Partiellemnt	x (cf COMET-VR model)	x	non	x	x
USAID FCC	x	x	non	x	x	X	non	non	non

11 Résultats

Les résultats sont exprimés selon différentes unités. Ils peuvent être en tonne équivalent CO₂ (t-CO₂eq).an⁻¹ ; t-CO₂eq.projet⁻¹ (plusieurs années) ; t-CO₂eq.ha⁻¹.an⁻¹ ; t-CO₂eq.kg de produits⁻¹ (Tableau 7). Les résultats peuvent être exprimés en valeur nette (Emissions – Stockage) ou fournir les deux valeurs. Il faut être vigilant à ne pas mélanger les tonnes de carbone et celles de CO₂ (facteur 44/12). Certains calculateurs fournissent des résultats pour une seule situation, alors que d'autres comparent la situation actuelle, une situation « avec projet » et « sans projet » (aussi appelée « Business as usual » ; BAU). L'unité dans laquelle est fourni le résultat oriente leur interprétation.

En tenant compte du contexte global, avec une demande croissante et le risque de transfert de pollutions, il semble pertinent de distinguer l'agriculture « industrielle » de « l'agriculture de subsistance ».

L'agriculture industrielle est tournée vers le marché, elle est très productive et fournit une partie considérable de la nourriture mondiale. L'enjeu principal pour ce type d'agriculture est d'utiliser plus efficacement les intrants et de réduire son empreinte par kg de produit fourni. Ainsi, les résultats d'évaluations devraient toujours être reliés d'une certaine manière au niveau de productivité, c'est-à-dire produire des indicateurs de type t-CO₂eq. Kg de produits⁻¹ ; t-CO₂eq. Kg MS⁻¹ (matière sèche) ; t-CO₂eq.calorie⁻¹ ; t-CO₂eq. protéines⁻¹ etc. Plusieurs calculateurs développent cette approche ; les outils ACV, des calculateurs avec des émissions de GES par kg de produit, Climagri[®] avec un indicateur « de Potentiel nourricier » du territoire etc. Ces méthodologies nécessitent des règles d'allocation ou des indicateurs de productivités très généraux (ex : matière sèche) pour les fermes avec plus d'une production : ex lait et viande, ou encore les bioénergies avec les co-produits (Hospido et al., 2003; Schau and Fet, 2008; Cherubini et al., 2009). Ces résultats reflètent ainsi l'efficacité de la production. Se passer de ces indicateurs de productivité entraîne un fort risque de déplacement des émissions. En effet un projet qui diminuerait les émissions de GES proportionnellement à la productivité induit un risque de l'augmentation des émissions sur un autre territoire, et peut même dégrader le bilan global en cas de changement d'usage des terres induit (CASI).

Une manière efficace de réduire l'impact environnemental de l'agriculture serait de réduire les pertes. En effet, les pertes après récolte restent encore très élevées de nos jours. Réduire ces pertes par l'amélioration des capacités de stockage, des chaînes logistiques et la réduction du gaspillage sont des options efficaces sur le plan économique et environnemental. On pourrait intégrer ces aspects en estimant les rendements au niveau du consommateur plutôt qu'à la sortie des champs.

A l'opposé, pour les projets orientés vers du développement rural, la productivité agricole n'est pas une préoccupation d'ordre globale mais plutôt un enjeu socio-économique local. L'objectif premier est d'améliorer les conditions de vie des populations. L'indicateur en t-CO₂eq. Kg de produits⁻¹ est donc moins approprié. Des indicateurs plus orientés sur des critères socio-économiques seraient plus appropriés, tels que t-CO₂eq.\$⁻¹ ; t-CO₂eq.emploi créé⁻¹ ; t-CO₂eq.point d'IDH (indice de développement humain) etc. Des liens avec les méthodologies utilisées en ACV sociales seraient pertinents (Feschet et al., 2010). De tels indicateurs permettraient de promouvoir des « chemins de développement » bas carbone pour les « pays à faible revenus ». Aucune démarche en ce sens n'a été identifiée concernant les calculateurs GES actuels. Pour l'instant, les calculateurs pour les petits producteurs et les pays en voie de développement se concentrent principalement sur des projets de crédits carbone et les manières d'obtenir des bénéfices monétaires en échange de réductions d'émissions comparées à un scénario de référence.

Les calculateurs GES peuvent également être couplés avec des outils économiques. Ainsi Ex-act a été utilisé avec des « courbes de coûts marginaux », qui fournissent des indications sur le coût des mesures de mitigation. Ces études peuvent indiquer quelles actions sont favorables au niveau économique, lesquelles ont un coût acceptable et lesquelles sont inadaptées. Cela permet également la comparaison de projets de mitigation entre différents secteurs. Les études économiques indiquent que le stockage du carbone et la réduction de la déforestation sont parmi les options les plus efficaces pour lutter contre le changement climatique (Smith et al., 2008). Des études estiment le potentiel de mitigation en fonction des niveaux de taxe carbone ou des crédits carbone. Ainsi Smith et al. (2008) trouve un potentiel de réduction de respectivement 0,64 ; 2,24 et 16 Gt CO₂-eq.an⁻¹ pour un prix de 20, 50 ou 100 US\$.tCO₂⁻¹. Etant donné que les émissions mondiales de 2004 s'élèveraient à 49 Gt CO₂-eq.an, ceci indique une réduction théorique de 30% des émissions annuelles pour un prix à 100\$ la tonne de carbone.

Enfin, les calculateurs « carbone » sont des outils d'évaluation environnementale monocritère. Lors de l'analyse des résultats GES et la mise en place de plan d'actions, il faut être particulièrement vigilant sur de possibles effets indésirables collatéraux (C-AGG, 2010). En effet certaines solutions permettant d'améliorer l'empreinte carbone peuvent impacter négativement la biodiversité (ex : grandes plantations de biocarburants), augmenter la consommation d'eau ou induire des risques sanitaires (ex : hormone de croissance). Le développement d'une agriculture et foresterie plus durable implique des modes de gestion améliorant les performances environnementales globales des systèmes. Des méthodes multicritères qui peuvent être combinées avec le bilan carbone sont en cours de développement, dont l'ACV et les études d'impacts.

Tableau 7: Types de résultats fournis par les calculateurs

Calculateurs	GES/ha	GES/produit ex: GES/ kg blé, GES/1000 l lait)	GES/projet, comparaison de scénarios	Autres résultats (uniquement GES pour l'exploitation/territoire)
ALU				X
Calculateur AFD			X	X
CALM				X
Carbon Calculator for NZ Agriculture and Horticulture	X	X		
Carbon Farming Calculator				X
CBP; carbon benefit project	X		X	
CFF Carbon Calculator				X
Climagri®	X			
CoolFarmTool	X	X		
CPLAN v2				X
Dia'terre®	X	X		
EX-ACT	X		X	
FarmGAS	X	X	X	
Farming Enterprise Calculator				X
Full CAM				X
Holos	X		X	
IFSC				X
USAID FCC			X	

*Les calculateurs sont classés selon les résultats qu'ils affichent. En effet, la plupart des calculateurs ont un peu de flexibilité et il est parfois possible manuellement ou en démultipliant les fichiers de comparer des projets, des fermes ou de calculer des résultats en GES.kg de produits⁻¹ même si le calculateur ne fournit pas la valeur directement. Certains calculateurs tels Climagri® fournissent des indicateurs de productivités alternatifs au GES.kg de produits-1 (« potentiel nourricier »).

12 Incertitudes

La recherche sur les incertitudes est un vaste domaine, avec de nombreux travaux basés sur des approches statistiques et de la typologie avancée (Rypdal and Winiwarter, 2001; Winiwarter and Rypdal, 2001; Gibbons et al., 2006; Ramírez et al., 2008; C-AGG, 2010). L'idée ici n'est pas de fournir une information détaillée sur le calcul des incertitudes mais plutôt de voir comment elles sont prises en compte dans les calculateurs et mentionnées à l'utilisateur final.

L'incertitude totale résulte de trois sources d'incertitudes : les incertitudes sur les données d'activités (également appelées données d'inventaires), les incertitudes liées à la variabilité inter-annuelle (climat et pratiques agronomiques) et les incertitudes sur les facteurs d'émission (Gibbons et al., 2006). Les incertitudes peuvent être très importantes pour le secteur agricole, supérieur à 100% selon la source d'émission considérée. Certains calculateurs mentionnent ces incertitudes, d'autres non.

A l'échelle de la ferme, il y a peu d'incertitude sur les données d'inventaires car elles sont directement fournies par l'agriculteur. Au niveau du territoire ou de la région, les données proviennent de bases statistiques ou d'avis d'experts, les incertitudes peuvent donc être élevées. Les calculateurs de GES n'estiment jamais les incertitudes sur les données d'activité, c'est à l'utilisateur d'en être conscient. Il n'est pas toujours aisé d'évaluer l'ampleur de ces incertitudes et leur impact sur le résultat final. Une manière de réduire cet impact et de fonctionner par processus itératif, en s'assurant une qualité des données d'activité maximales pour les postes avec un fort impact sur le résultat, tels que le nombre d'animaux ou les quantités d'intrants azotés.

L'incertitude inter-annuelle peut être réduite en utilisant des données climatiques et des pratiques moyennes sur plusieurs années. La variation climatique intra-annuelle (ex : répartition des pluies), qui interfère avec les pratiques agronomiques induit également des incertitudes. Par exemple, due à des conditions climatiques différentes, pour la même quantité d'azote, le taux de nitrification-dénitrification peut être supérieur certaines années par rapport à d'autre. Seuls des modèles biophysiques à pas de temps journalier ou mensuel peuvent prendre en compte cela, les calculateurs fonctionnant à l'échelle annuelle ne le peuvent pas.

Enfin, les incertitudes liées aux facteurs d'émissions sont souvent mentionnées par les calculateurs. Le GIEC fournit des valeurs d'incertitudes avec chaque facteur d'émission, ces incertitudes pouvant être très élevées comme pour le N₂O émis suite à l'application d'engrais azoté (IPCC, 2006) (Figure 2). Passer d'une approche de type tiers 1 vers le tiers 3 permet de réduire ces incertitudes.

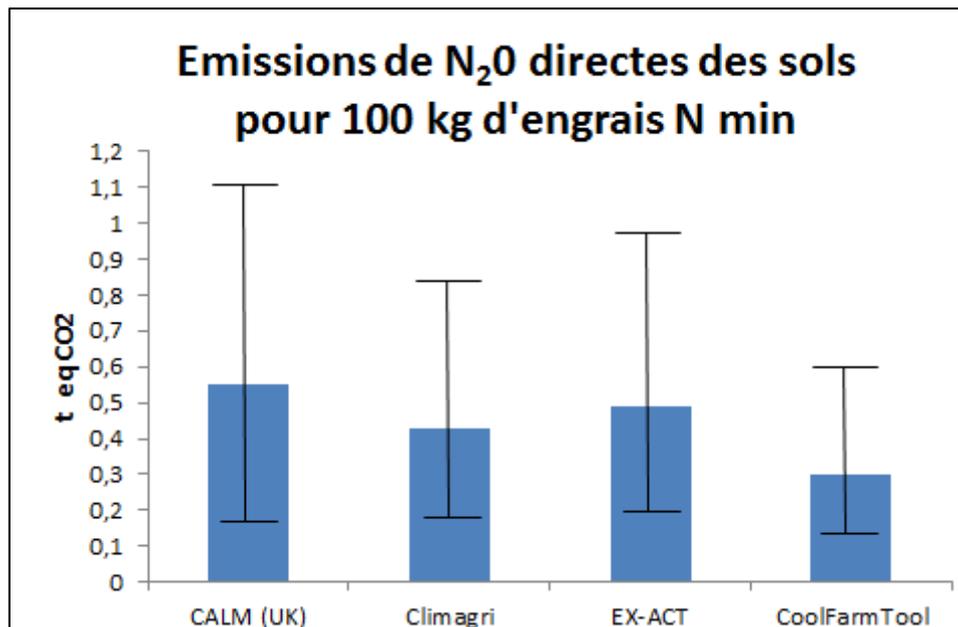


Figure 2 Incertitudes sur les émissions de N₂O après application d'engrais N.

Au regard du haut niveau d'incertitude concernant les émissions pour les secteurs agricole et forestier, ces incertitudes doivent être mentionnées, particulièrement lors de la comparaison de deux projets ou deux territoires (Tableau 8). Cependant, afin de permettre une bonne interprétation, l'utilisateur devrait avoir des explications sur les causes d'incertitudes. Le niveau acceptable d'incertitude dépend de la question posée, à l'échelle territoriale les questionnements sont généralement plus génériques qu'à l'échelle de l'exploitation et le niveau d'incertitude acceptable est donc plus élevé.

Tableau 8 Prise en compte des incertitudes dans les calculateurs

Calculateurs*	Aucune valeur d'incertitude fournie	Estimation quantitative des incertitudes (des FE)
ALU	x	
Calculateur AFD	x	
CALM	x	
Carbon Calculator for NZ Agriculture and Horticulture	x	
Carbon Farming Calculator	x	
CBP; carbon benefit project		x
CFF Carbon Calculator	x	
Climagri®	x	
CoolFarmTool	x	
CPLAN v2		x
Dia'terre®	x	
EX-ACT		x
FarmGAS		x
Farming Enterprise Calculator		x
Full CAM	x	
Holos	x	
IFSC	x	
USAID FCC	x	

* De nombreux développeurs de calculateurs sont en train d'inclure les incertitudes dans leur outil pour les prochaines versions (ex. ALU, en mi-2012).

13 Contexte économique et politique de l'évaluation environnementale

Ce travail met en évidence un niveau d'incertitude élevé associé aux résultats et des différences méthodologiques significatives entre les calculateurs. Cependant, l'ensemble des calculateurs fourni des ordres de grandeurs cohérents et permettent d'identifier les principaux postes d'émissions de GES, avec l'exception notable des changements d'usage des sols. Ce niveau de détail est, actuellement, d'une certaine manière suffisant sachant que la réduction des émissions et la séquestration du

carbone sont principalement des actions volontaires, avec peu d'enjeux financiers, même pour les crédits carbone. Ainsi, tous les calculateurs sont d'une certaine manière des outils de sensibilisation, avec peu d'enjeux concernant la précision des résultats, et sachant que les options pour la mitigation sont déjà bien connues à l'avance par les experts.

Ceci pourrait changer si

- Les bailleurs de fond intégraient un critère d'émission de GES fort pour leur choix de financement de projets (de développement ou autre).

- Le marché des crédits carbone intégrait les secteurs de l'agriculture et de la forêt avec des coûts et bénéfices significatifs associés aux émissions de GES et au stockage du carbone.

- L'affichage environnemental se développait et devenait obligatoire sur de grands marchés, fournissant un avantage comparatif.

- Des taxes environnementales et barrières douanières étaient mises en place sur des grands marchés.

Si une ou plusieurs de ces options d'ordres politiques étaient mises en place, les méthodologies des outils, et notamment les incertitudes et les transferts d'impacts deviendraient des enjeux majeurs.

Les Projets de type Mécanisme pour un Développement Propres (MDP) ont été critiqués pour leur complexité et leur coût de transaction élevé. En parallèle, des systèmes volontaires de crédits carbone se sont développés, avec des méthodologies simplifiées. Ceci montre l'importance de trouver un bon équilibre entre la précision et la complexité. Des méthodologies standardisées avec des incertitudes élevées peuvent être temporairement acceptables mais empêche les comparaisons sectorielles. Cela pénalise les investissements pour la mitigation dans le secteur agricole au profit des secteurs avec un potentiel d'économie d'énergie pour lesquels les incertitudes sont très faibles (ex : transport, bâtiment) (Driver et al., 2010b). Dans la vérification des actions de mitigation, il peut être choisi de vérifier les stocks additionnels effectifs, soit on peut s'en tenir aux pratiques. Ainsi, aux Etats-Unis, la bourse du carbone de Chicago avait choisi de rémunérer les agriculteurs pour des « pratiques favorables au climat » plutôt que de mesurer les gains de GES réellement réalisés.

La mise en place d'actions et de régulations pour limiter le changement climatique est un processus à double sens. Tant que la volonté politique est faible, il y a peu d'intérêt à développer des outils détaillés et complexes, mais tant que les méthodologies et les outils de mesures fiables ne sont pas disponibles, les décideurs politiques ne peuvent pas obliger les acteurs économiques à faire des choix

fortement orientés par le critère carbone. Ainsi, une évolution des législations et le développement des outils sont complémentaires, l'un ne peut aller sans l'autre.

Enfin, il y a également une forte complémentarité entre les politiques sur le changement climatique et les enjeux de sécurité alimentaire. Sur le long terme, limiter le changement climatique protège les zones agricoles les plus vulnérables, particulièrement pour les zones semi-arides. Cependant, ceci peut paraître comme un enjeu global, qui dépasse largement la portée des pays les plus affectés, qui sont souvent faiblement émetteurs de GES. Pourtant, le stockage du carbone dans les sols est une action locale efficace afin d'augmenter la résilience des agro-systèmes, et justifie pleinement l'investissement pour une agriculture peu émissive dans des pays en voie de développement.

14 Disponibilité des calculateurs et de leurs guides d'utilisation.

La plus part des calculateurs sont disponibles et peuvent être obtenus soit directement sur les sites web (Tableau 9), soit en s'adressant aux développeurs (Table 1 et Annexe 2 pour les contacts). La description des calculateurs est généralement fournie sur les sites web, avec parfois quelques exemples d'études de cas. La description de certains calculateurs et certains cas d'étude sont également disponibles dans des revues scientifiques à comité de lecture, gage de qualité méthodologique (Hillier et al. (2011) pour Cool Farm Tool, Bernoux et al. (2010) et Branca et al. (2012) pour EX-ACT).

Tableau 9: Liste des calculateurs et site web

Tools	Site web
AFD calculator	http://www.afd.fr/home/projets_afd/AFD-et-environnement/changement_climatique/Mesures_Impacts_Climat
ALU	http://www.nrel.colostate.edu/projects/ALUsoftware/software_description.html
CALM	http://www.cla.org.uk/Policy_Work/CALM_Calculator/
Carbon benefit project CPB	http://www.unep.org/ClimateChange/carbon-benefits/cbp_pim/
Carbon Calculator for NZ Agr. and Horti.	http://www2.lincoln.ac.nz/carboncalculator/
Carbon Farming Group Calculator	http://www.carbonfarming.org.nz/calculators/
CFF Carbon Calculator	http://www.cffcarboncalculator.org.uk/carboncalc
Climagri®	http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=24979
CoolFarmTool	http://www.unilever.com/aboutus/supplier/sustainablesourcing/tools/
CPLAN v2	http://www2.cplan.org.uk/index.php?_load=page&_pageid=3
Dia'terre®	http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=24390
EX-ACT	http://www.fao.org/tc/exact/ex-act-home/fr/
FarmGAS	http://www.farminstitute.org.au/calculators/farm-gas-calculator
Farming Enterprise Calculator	http://www.isr.qut.edu.au/greenhouse/index.jsp
FullCAM	http://www.climatechange.gov.au/government/initiatives/ncat.aspx
Holos	http://www4.agr.gc.ca/AAFC-AAC/display-afficher.do?id=1226606460726&lang=eng
IFSC	http://web.extension.illinois.edu/dsi/projectdetail.cfm?NodeID=4035&type=Research
USAID FCC	http://winrock.stage.datarg.net/CarbonReporting/Project/Index/

15 Conclusion

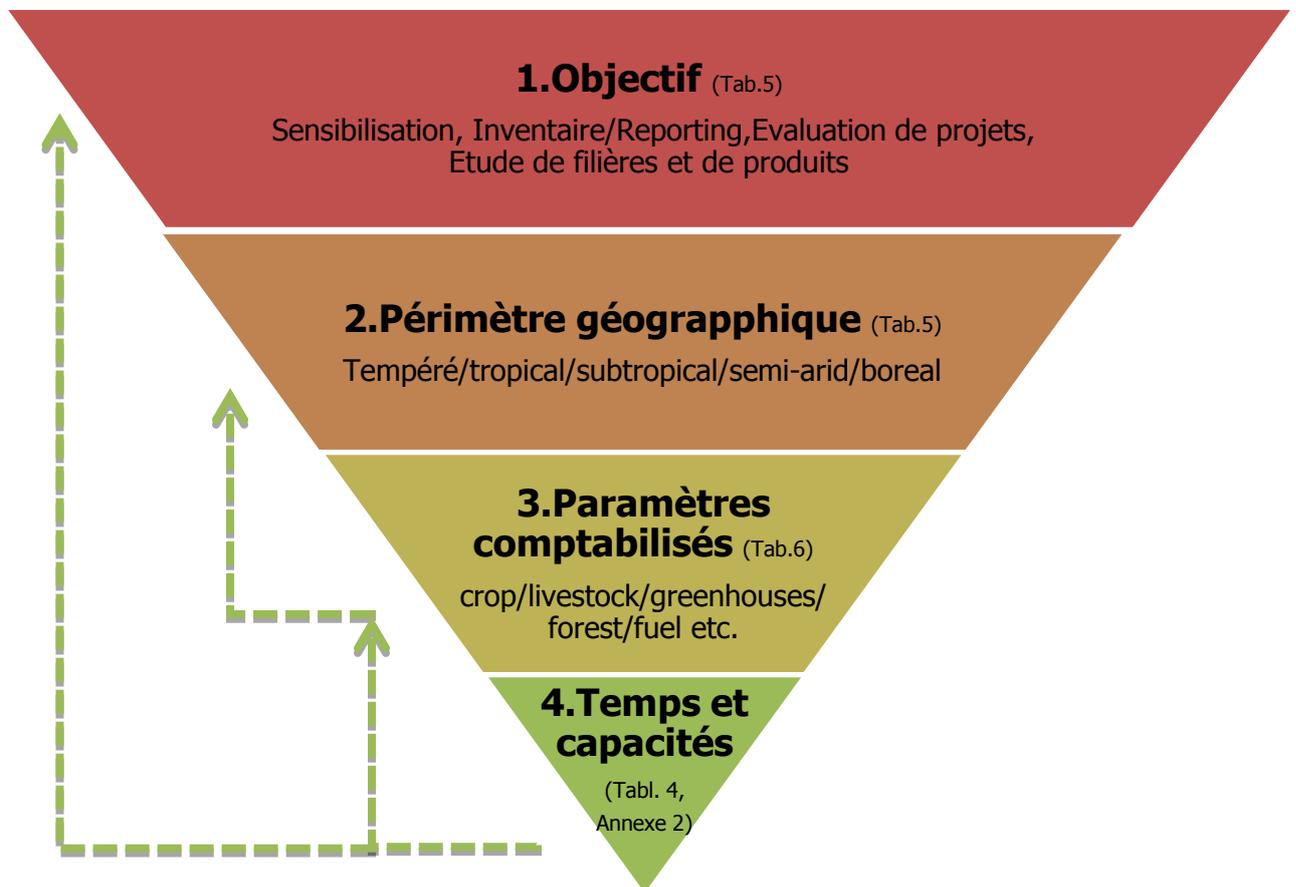
Cette revue des calculateurs nous indique que tous les calculateurs testés permettent d'identifier les principales sources d'émissions de l'agriculture, à l'exception parfois des zones avec des changements d'usage des sols. Cependant, les méthodologies manquent d'homogénéité et ne permettent pas de faire des comparaisons directes entre des études faites avec les différents calculateurs. En effet, bien que tous les calculateurs se réfèrent aux travaux du GIEC, ceci ne suffit pas à assurer une approche homogène car le GIEC fournit seulement un cadre général, avec des méthodologies différentes selon le niveau de détail souhaité. Seules des études comparatives entre différents calculateurs sur un même cas permettent de bien évaluer les différences au niveau des résultats. Ces études sont parfois disponibles et confirment la capacité des calculateurs testés à fournir des ordres de magnitudes cohérents (Soil Association Producer Support; FAO, 2010). Pour la bonne interprétation des résultats il est absolument nécessaire de connaître le périmètre pris en compte, et lors de la comparaison de projets de garder en tête les incertitudes.

Il apparaît que des calculateurs sont disponibles pour évaluer les activités agricoles et forestières dans chaque zone du monde. Le niveau de précision est encore restreint mais les développeurs d'outils travaillent activement à l'amélioration des calculateurs. La tendance est à l'élargissement des options (itinéraires techniques, utilisation des terres etc.), des sources de GES comptabilisées et des périmètres géographiques de validité. L'amélioration de la précision demande plus de données d'entrées, et plus de temps pour réaliser les études. Ainsi, un équilibre doit être trouvé entre efficacité et précision. La multiplication des outils témoigne de cette recherche du compromis optimal. Ainsi il ne semble pas qu'un calculateur va s'imposer au détriment des autres car ils ont des objectifs distincts. Cependant, il existe tout de même une certaine concurrence entre quelques calculateurs avec des objectifs et des zones géographiques d'utilisations similaires ou qui se recoupent.

Pour plus de détails sur les calculateurs carbone et les méthodologies, le lecteur peut également se référer au travail de la "Coalition on Agricultural Greenhouse Gases"(C-AGG) qui travaille sur les enjeux carbone pour l'agriculture reliés aux mécanismes de marché (C-AGG, 2010; Driver et al., 2010a) et à d'autres synthèses récentes complémentaires (Denef et al., 2012; Milne et al., 2012). Une page web qui reprendrait l'ensemble des calculateurs avec leurs principales caractéristiques serait très utile pour les porteurs de projets et les conseillers agricoles.

Choisir son calculateur carbone en 4 étapes :

1. Définir l'objectif principal de son évaluation environnementale, et identifier un groupe d'outils. (Tableau 5)
2. Choisir sa zone géographique et voir si un calculateur spécifique est disponible. (Tableau 5)
3. Vérifier que le périmètre et les principales sources (forêt, sol, CAS etc.) prises en compte dans le calculateur retenu sont adaptés à l'objectif de l'étude (Tableau 6), si le calculateur local n'est pas adapté il faut choisir un calculateur plus global.
4. Vérifier le temps et les compétences disponibles (tableau 4, Annexe 2)



16 Liste des acronymes

ACV : Analyse de cycle de vie

ADEME: Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

C-AAG: Coalition on Agricultural Greenhouse Gases

CAS: Changement d'affectation des sols

FAO: Organisation des Nations Unies pour l'agriculture et l'alimentation

GES: Gaz à effet de serre

GIEC: Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

HDI: Indice de développement Humain

IRD: Institut de Recherche pour le Développement

ITK: Itinéraire technique

MDP : Mécanisme pour un Développement Propre

MIRS: Medium Infra-Red Spectroscopy

N: Azote (nitrogen)

NIRS: Near Infra-Red Spectroscopy

PRG: Pouvoir de réchauffement global

SIG : Système d'Information Géographique

SOM: Soil Organic Mater

tC: Tonne de Carbon

tCO₂ eq : Tonne CO₂ équivalent

VCS: Verified Carbon Standard

17 Références

- Arrouays, D., Balesdent, J., Germon, J., Jayet, P., Soussana, J., Stengel, P., and Bureau, D. 2002. Contribution à la lutte contre l'effet de serre : stocker du carbone dans les sols agricoles de France?
- Baumert, K. A., Herzog, T., and Pershing, J. 2005. "Navigating the numbers: Greenhouse gas data and international climate policy," World Resources Inst.
- Bellamy, P. H., Loveland, P. J., Bradley, R. I., Lark, R. M., and Kirk, G. J. D. 2005. Carbon losses from all soils across England and Wales 1978–2003. *Nature* **437**, 245-248.
- Bernoux, M., Branca, G., Carro, A., Lipper, L., Smith, G., and Bockel, L. 2010. Ex-ante greenhouse gas balance of agriculture and forestry development programs. *Scientia Agricola* **67**, 31-40.
- Bernoux, M., Feller, C., Cerri, C., Eschenbrenner, V., Cerri, C., Roose, E., Lal, R., Barthès, B., and Stewart, B. 2006. Soil carbon sequestration. *Soil erosion and carbon dynamics*, 13-22.
- Branca, G., Hissa, H., Benez, M. C., Medeiros, K., Lipper, L., Tinlot, M., Bockel, L., and Bernoux, M. 2012. Capturing synergies between rural development and agricultural mitigation in Brazil. . *Land Use Policy* **in press**.
- C-AGG 2010. "Carbon and Agriculture: Getting Measurable Results,"http://www.c-agg.org/docs/CAGMR_complete.pdf.
- Cherubini, F., Bird, N. D., Cowie, A., Jungmeier, G., Schlamadinger, B., and Woess-Gallasch, S. 2009. Energy-and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations. *Resources, Conservation and Recycling* **53**, 434-447.
- Couwenberg, J. 2009. Emission factors for managed peat soils: an analysis of IPCC default values. *Emission factors for managed peat soils: an analysis of IPCC default values*.
- Couwenberg, J., and Fritz, C. 2012. Towards developing IPCC methane 'emission factors' for peatlands (organic soils). *Mires and Peat* **10**.
- Cubasch, U., Meehl, G., Boer, G., Stouffer, R., Dix, M., Noda, A., Senior, C., Raper, S., and Yap, K. 2001. Projections of future climate change. , *in: JT Houghton, Y. Ding, DJ Griggs, M. Noguer, PJ Van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and CA Johnson (eds.): Climate Change 2001: The Scientific Basis: Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel*, 526-582.
- De Cara, S., Goussebaïle, A., Grateau, R., Levert, F., Quemener, J., Vermont, B., Bureau, J. C., Gabrielle, B., Gohin, A., and Bispo, A. 2012. Revue critique des études évaluant l'effet des changements d'affectation des sols sur les bilans environnementaux des biocarburants.
- Denef, K., Paustian, K., Archibeque, S., Biggar, S., and Pape, D. 2012. Report of Greenhouse Gas Accounting Tools for Agriculture and Forestry Sectors. *Interim report to USDA under Contract No. GS23F8182H*.
- Driver, K., Haugen-Kozyra, K., and Janzen, R. 2010a. Agriculture Sector Greenhouse Gas Practices and Quantification Review.
- Driver, K., Haugen-Kozyra, K., and Janzen, R. 2010b. Agriculture Sector Greenhouse Gas Quantification Protocol Benchmarking.
- FAO 2010. "Comparing results of Carbon balance appraisal using on-going Bio-Carbon fund projects,"<http://www.fao.org/tc/exact/validation-des-resultats/projets-du-fond-biocarbon/en/>.
- Feschet, P., Loeillet, D., Macombe, C., and Garrabé, M. 2010. Fruits and vegetables supply chains specificities and stakes as element of discussion on Social-LCA.

- Fontaine, S., Barot, S., Barré, P., Bdioui, N., Mary, B., and Rumpel, C. 2007. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature* **450**, 277-280.
- Gibbons, J. M., Ramsden, S. J., and Blake, A. 2006. Modelling uncertainty in greenhouse gas emissions from UK agriculture at the farm level. *Agriculture, ecosystems & environment* **112**, 347-355.
- Gomez, C., Viscarra Rossel, R. A., and McBratney, A. B. 2008. Soil organic carbon prediction by hyperspectral remote sensing and field vis-NIR spectroscopy: An Australian case study. *Geoderma* **146**, 403-411.
- Guo, L., and Gifford, R. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology* **8**, 345-360.
- Hénault, C., Devis, X., Lucas, J., and Germon, J. 1998. Influence of different agricultural practices (type of crop, form of N-fertilizer) on soil nitrous oxide emissions. *Biology and Fertility of Soils* **27**, 299-306.
- Hillier, J., Walter, C., Malin, D., Garcia-Suarez, T., Mila-i-Canals, L., and Smith, P. 2011. A farm-focused calculator for emissions from crop and livestock production. *Environmental Modelling & Software*.
- Hospido, A., Moreira, M. T., and Feijoo, G. 2003. Simplified life cycle assessment of galician milk production. *International Dairy Journal* **13**, 783-796.
- Hunt, P., Karlen, D., Matheny, T., and Quisenberry, V. 1996. Changes in carbon content of a Norfolk loamy sand after 14 years of conservation or conventional tillage. *Journal of soil and water conservation* **51**, 255-258.
- IPCC, I. 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 4: Agriculture, Forestry, and Other Landuse. *OECD Press, Paris (2006)* **475**, 505.
- Jobbágy, E. G., and Jackson, R. B. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological applications* **10**, 423-436.
- Labreuche, J., Lellahi, A., Malaval, C., and Germon, J. C. 2011. Impact of no-tillage agricultural methods on the energy balance and the greenhouse gas balance of cropping systems. *Impact des techniques culturales sans labour TCSL sur le bilan energetique et le bilan des gaz a effet de serre des systemes de culture* **20**, 204-215.
- Lal, R. 2006. Enhancing crop yields in the developing countries through restoration of the soil organic carbon pool in agricultural lands. *Land Degradation & Development* **17**, 197-209.
- Lambin, E. F., Turner, B. L., Geist, H. J., Agbola, S. B., Angelsen, A., Bruce, J. W., Coomes, O. T., Dirzo, R., Fischer, G., Folke, C., George, P. S., Homewood, K., Imbernon, J., Leemans, R., Li, X., Moran, E. F., Mortimore, M., Ramakrishnan, P. S., Richards, J. F., Skånes, H., Steffen, W., Stone, G. D., Svedin, U., Veldkamp, T. A., Vogel, C., and Xu, J. 2001. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change* **11**, 261-269.
- Lapola, D. M., Schaldach, R., Alcamo, J., Bondeau, A., Koch, J., Koelking, C., and Priess, J. A. 2010. Indirect land-use changes can overcome carbon savings from biofuels in Brazil. *Proceedings of the national Academy of Sciences* **107**, 3388-3393.
- Le Mer, J., and Roger, P. 2001. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review. *European Journal of Soil Biology* **37**, 25-50.
- Marti, O., Braconnot, P., Bellier, J., Benshila, R., Bony, S., Brockmann, P., Cadule, P., Caubel, A., Denvil, S., and Dufresne, J. 2005. The new IPSL climate system model: IPSL-CM4.
- Milne, E., Neufeldt, H., Smalligan, M., Rosenstock, T., Malin, D., Easter, M., Bernoux, M., Ogle, S., Casarim, F., Pearson, T., Bird, N., Steglich, E., Ostwald, M., Deneuf, K., and

- Paustian, K. 2012. "Methods for the quantification of net emissions at the landscape level for developing countries in smallholder contexts.."
- Mosier, A., Duxbury, J., Freney, J., Heinemeyer, O., and Minami, K. 1998. Assessing and mitigating N₂O emissions from agricultural soils. *Climatic change* **40**, 7-38.
- Plevin, R. J., Jones, A. D., Torn, M. S., and Gibbs, H. K. 2010. Greenhouse gas emissions from biofuels' indirect land use change are uncertain but may be much greater than previously estimated. *Environmental Science & Technology*.
- Post, W. M., Izaurralde, R. C., Mann, L. K., and Bliss, N. 2001. Monitoring and verifying changes of organic carbon in soil. *Climatic change* **51**, 73-99.
- Pouyat, R., Groffman, P., Yesilonis, I., and Hernandez, L. 2002. Soil carbon pools and fluxes in urban ecosystems. *Environmental Pollution* **116**, Supplement 1, S107-S118.
- Powlson, D., Whitmore, A., and Goulding, K. 2011. Soil carbon sequestration to mitigate climate change: a critical re-examination to identify the true and the false. *European Journal of Soil Science* **62**, 42-55.
- Ramachandran Nair, P., Mohan Kumar, B., and Nair, V. D. 2009. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **172**, 10-23.
- Ramírez, A., de Keizer, C., Van der Sluijs, J. P., Olivier, J., and Brandes, L. 2008. Monte Carlo analysis of uncertainties in the Netherlands greenhouse gas emission inventory for 1990–2004. *Atmospheric Environment* **42**, 8263-8272.
- Rawls, W., Pachepsky, Y. A., Ritchie, J., Sobecki, T., and Bloodworth, H. 2003. Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma* **116**, 61-76.
- Rochette, P. 2008. No-till only increases N₂O emissions in poorly-aerated soils. *Soil and Tillage Research* **101**, 97-100.
- Roy, P., Nei, D., Orikasa, T., Xu, Q., Okadome, H., Nakamura, N., and Shiina, T. 2009. A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. *Journal of Food Engineering* **90**, 1-10.
- Ruostenoja, K., Carter, T. R., Jylhä, K., and Tuomenvirta, H. 2003. Future climate in world regions: an intercomparison of model-based projections for the new IPCC emissions scenarios. Vol. 644. Finnish Environment Institute Helsinki.
- Rypdal, K., and Winiwarter, W. 2001. Uncertainties in greenhouse gas emission inventories--evaluation, comparability and implications. *Environmental Science & Policy* **4**, 107-116.
- Saby, N., Bellamy, P. H., Morvan, X., Arrouays, D., Jones, R. J. A., Verheijen, F. G. A., Kibblewhite, M. G., Verdoodt, A., Üveges, J. B., and FREUDENSCHUB, A. 2008. Will European soil-monitoring networks be able to detect changes in topsoil organic carbon content? *Global Change Biology* **14**, 2432-2442.
- Salomé, C., Nunan, N., Pouteau, V., Lerch, T. Z., and Chenu, C. 2010. Carbon dynamics in topsoil and in subsoil may be controlled by different regulatory mechanisms. *Global Change Biology* **16**, 416-426.
- Schau, E., and Fet, A. 2008. LCA studies of food products as background for environmental product declarations. *The International Journal of Life Cycle Assessment* **13**, 255-264.
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., and Rice, C. 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **363**, 789-813.
- Soil Association Producer Support Carbon footprint calculators – a case study comparison review, "http://www.swarmhub.co.uk/downloads/pdf/carbon_project/footprint_calculators.pdf."
- Van der Werf, G., Morton, D. C., DeFries, R. S., Olivier, J. G. J., Kasibhatla, P. S., Jackson, R. B., Collatz, G., and Randerson, J. 2009. CO₂ emissions from forest loss. *Nature Geoscience* **2**, 737-738.

- VCS 2012. "Approved VCS Methodology VM0017," <http://www.v-c-s.org/sites/v-c-s.org/files/VM0011%20IFM-LtpF%20Carbon%20Planet%20FINAL%2021%20MAR%202011.pdf>.
- Veldkamp, A., and Lambin, E. F. 2001. Predicting land-use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **85**, 1-6.
- Virtanen, Y., Kurppa, S., Saarinen, M., Mäenpää, I., Mäkelä, J., and Grönroos, J. 2010. Carbon footprint of food-an approach from national level and from a food portion.
- Wang, G. 2005. Agricultural drought in a future climate: results from 15 global climate models participating in the IPCC 4th assessment. *Climate Dynamics* **25**, 739-753.
- Weber, C. L., and Matthews, H. S. 2008. Food-miles and the relative climate impacts of food choices in the United States. *Environmental Science & Technology* **42**, 3508-3513.
- Winiwarter, W., and Rypdal, K. 2001. Assessing the uncertainty associated with national greenhouse gas emission inventories:: a case study for Austria. *Atmospheric Environment* **35**, 5425-5440.