Programme REACCTIF
« REcherche sur l'Atténuation du Changement ClimaTique par l'agrIculture et la Forêt »

***PROJET SOCLE:** SOIL ORGANIC CARBON CHANGES IN LCA, WHICH EVALUATIONS TO IMPROVE ENVIRONMENTAL ASSESSMENTS?*

APPLICATION DE DIFFERENTES METHODES POUR LA PRISE EN COMPTE DE L'EVOLUTION DU STOCK DE CARBONE ORGANIQUE EN ACV SUR 5 FILIERES AGRICOLES

Avril 2019

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par :

Auteurs : **Aurélie Tailleur, Anthony Benoist, Cécile Bessou, Armelle Gac, Caroline Godard, Julie Lebas de Lacour**
Contributeurs : Joachim Boissy, Céline Bustany, Pierre Mischler, Armando Caldeira Pires, Sandra Vuillermet

N° de contrat : 1360C0097

Date d'exécution : 12/2014-12/2017

Coordination technique ADEME : Vincent Colomb – Direction\Service : Évaluation Environnementale et écoconception, Filières alimentaires\Service Foret, Alimentation, Bioéconomie

ADEME
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

LIVRABLE DE PROJET

cirad
ARVALIS Institut du végétal
INSTITUT DE L'ELEVAGE idele
AGRO TRANSFERT RESSOURCES ET TERRITOIRES

REMERCIEMENTS

Nous remercions chaleureusement les membres du comité de pilotage listés ci-dessous :

NOMS	*INSTITUTS*	*THEMES*
Antonio Bispo	ADEME	Sol + animation transversale
Vincent Colomb		ACV + animation transversale
Manuel Martin	INRA Infosol Orléans	Sol + animation transversale
Pascal Carrere	UREP Clermont-Ferrand	Sol, Prairies
Katja Klumpp		
Samy Ait-Amar	ACTA	ACV, inventaire
Raia Massad	INRA ECOSYS	Modélisation + animation transversale
Sandra Eady	CSIRO	ACV, Sol
Etienne Mathias	CITEPA	LULUC, inventaire
Colas Robert		
Claire Cornillier	FCBA	Forêt + animation transversale
Martial Bernoux	IRD	LULUC, inventaire
Bruno Mary	INRA Laon	Modèle de culture, Carbone, Sol
Sophie Penavayre	IFV	Cultures pérennes, ACV
Hayo Van der Werf	INRA Rennes	ACV, Sol
Eric Ceschia	CESBIO (CNES/CNRS/UPS/IRD)	Modèle de culture, télédétection, Albedo

CITATION DE CE RAPPORT

ADEME. Aurélie Tailleur, Anthony Benoist, Cécile Bessou, Armelle Gac, Caroline Godard, Julie Lebas de Lacour, 2018, Application de différentes méthodes pour la prise en compte de l'évolution du stock de carbone organique en ACV sur 5 filières agricoles Projet SOCLE, soil organic carbon changes in LCA, which evaluations to improve environmental assessments? 108p.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Contenu

1. Introduction 8

1.1. Contexte du projet SOCLE 8

1.2. Les objectifs du projet SOCLE 8

1.3. Contenu et organisation du rapport 9

2. Méthodes 10

2.1. Les 5 filières et objectifs retenus dans les cas d'étude 10

2.2. Les critères retenus pour la sélection des cas d'études 10

2.3. Description des problématiques traitées 10

2.4. Cas d'étude - Filière grandes cultures 11

2.5. Cas d'étude - Filière élevage 13

2.6. Cas d'étude - Filière vigne 18

2.7. Cas d'étude - Filière canne à sucre 20

2.8. Cas d'étude - Filière soja 21

2.9. Les méthodes ACV appliquées et les objets d'analyse étudiés 23

2.9.1. Les méthodes ACV appliquées 23

2.9.2. Analyse de sensibilité pour les différentes filières 25

3. Résultats 31

3.1. Analyse transversale par objet d'analyse 31

3.1.1. Comparaison générale des méthodes appliquées à des LUC et des LMC 31

3.1.2. Répartition temporelle des impacts de transformation 34

3.1.3. Impacts évalués avec l'ACV dynamique : comparaison et sensibilité aux méthodes retenues pour estimer la dynamique de l'évolution des stocks de carbone suite à un changement 36

3.1.4. Sensibilité sur les données d'entrée 38

3.1.5. Sensibilité au choix de l'état référence 42

3.1.6. Source de données pour identifier les transformations 45

3.1.7. Influence de la prise en compte des émissions d'azote liées au déstockage de carbone dans le sol 46

3.2. Analyse par filière 48

3.2.1. Analyse pour les cas d'étude grandes cultures 48

3.2.2. Analyse pour les cas d'étude élevage 49

3.2.3. Analyse pour le cas d'étude vigne 53

3.2.4. Analyse pour le cas d'étude canne à sucre 59

3.2.5. Analyse pour le cas d'étude soja 62

4. Recommandations65

5. Fiche thématique - Application de la méthode IPCC tier 1 pour déterminer les stocks de carbone du sol de différents usages : limites perçues et questions posées 69

5.1. Principes et intérêt de la méthode 69

5.2. Correspondances entre domaines climatiques, régions climatiques et zones écologiques 69

5.3. Prairie temporaire = culture ou prairie? 73

5.4. Correspondance entre pratiques spécifiques et catégories proposées 74

5.5. Des incohérences internes 80

5.6. Des valeurs par défaut éloignées de celles de la littérature, de mesures ou simulations 80

6. Fiche thématique - Utilisation du modèle AMG pour déterminer les stocks de carbone du sol de différents usages 82

6.1. Principe du modèle 82

6.2. Les outils basés sur le modèle AMG 83

6.3. Domaine de validité 83

6.3.1. Situations pédo-climatiques 83

6.3.2. Cultures et pratiques couvertes 84

6.4. Les données d'entrée nécessaires 85

6.5. Développement en cours et à venir 85

6.6. Points forts et points de vigilance pour une utilisation en vue d'alimenter des ACV 86

7. Fiche thématique – Obtention de dynamiques d'évolution de stock de carbone du sol 87

7.1. Utilisation de relevés expérimentaux de terrain 88

7.2. Utilisation de modèles mécanistes 88

7.2.1. Modèles et ACV dynamique 88

7.2.2. Utilisation du modèle Siméos-AMG 89

7.2.3. Conclusion sur les modèles et leur utilisation 90

7.3. Utilisation de données de la littérature 92

7.3.1. Situations rencontrées 92

7.3.2. Exploitation des données de la littérature 92

7.3.3. Conclusions sur l'utilisation des données de la littérature97

7.4. Conclusion 98

8. Fiche thématique - Spécificité des cultures pérennes : Cycle de vie des pérennes, ACV et stocks de carbone 99

8.1. Les caractéristiques spécifiques des pérennes qui influencent les résultats de l'ACV 99

8.2. Recommandations pour la modélisation du cycle pérenne en ACV 101

8.3. Spécificités des méthodes de prise en compte des stocks de carbone 102
8.3.1. Méthode IPCC 102
8.3.2. Méthode de Müller-Wenk et Brandão 103
8.3.3. Méthode ACV dynamique 103
9. Fiche thématique - Obtention et analyses des données sols des essais PCQE 104
9.1. Dispositif PCQE et protocole expérimental de suivi de la teneur en matière organique 104
9.2. Sélection des parcelles et scénarios pour la construction des cas d'étude 104
9.3. Comparaison des stocks de carbone mesurés et modélisés avec AMG 105
9.4. Conclusion 105
10. Fiche thématique - allocation entre culture d'une succession culturale 106
10.1. Contexte 106
10.2. Choix retenu dans la bibliographie 106
10.3. Description de la règle d'allocation testée 106
11. Références 108

Liste des figures et tableaux

FIGURE 1 : PERIMETRE DU SYSTEME D'ELEVAGE, POUR L'ETUDE DES DYNAMIQUES DE CARBONE, DANS SOCLE 15
FIGURE 2 : PRINCIPALES REGIONS DE PRODUCTION DE LA CANNE A SUCRE AU BRESIL EN ROUGE. SOURCES NIPE-UNICAMP, IBGE AND CTC 20
FIGURE 3 : SITUATION DE L'ETAT DU MATO GROSSO, AU BRESIL, EN REGION CENTRE-OUEST (SOURCE IBGE) 21
FIGURE 4 : RESULTATS DES CAS D'ETUDE POUR LES SCENARIOS DE CHANGEMENTS D'USAGES DES SOLS, POUR LES METHODES ILCD / IPCC ET MW&B 32
FIGURE 5 : RESULTATS DES CAS D'ETUDE POUR LES SCENARIOS DE CHANGEMENTS DE PRATIQUES, POUR LES METHODES ILCD / IPCC ET MW&B 32
FIGURE 6 : COMPARAISON DES RESULTATS D'IMPACTS DE TRANSFORMATION OBTENUS AVEC LA METHODE ILCD / IPCC ET L'ACV DYNAMIQUE 33
FIGURE 7 : COMPARAISON DES EFFETS RELATIFS DU CHOIX DE LA METHODE DE REPARTITION TEMPORELLE DES IMPACTS DE TRANSFORMATION - EXEMPLE DU SCENARIO *SOFT WHEAT 1 [WTP] : TI-NOTI (LMC)* 34
FIGURE 8 : SENSIBILITE DES RESULTATS DES CAS D'ETUDE AU MODE DE REPARTITION TEMPORELLE DES IMPACTS DE TRANSFORMATION, CAS DE L'IMPACT DE TRANSFORMATION SELON LA METHODE ILCD/IPCC (REFERENCE = REPARTITION LINEAIRE UNIFORME SUR 20 ANS)..... 35
FIGURE 9 : COMPARAISON DE L'IMPACT TRANSFORMATION CALCULE AVEC LA METHODE IPCC/ILCD (BASE 1), LA METHODE D'ACV DYNAMIQUE ET LA METHODE IPCC/ILCD EN REPARTISSANT L'IMPACT SUR 90% DU TEMPS NECESSAIRE A L'OBTENTION DE L'EQUILIBRE DE C DU SOL ATTEINT A 100 ANS. 36
FIGURE 10 : RAPPORT ENTRE LES IMPACTS TRANSFORMATION CALCULES PAR LA METHODE IPCC/ILCD REPARTIS DEGRESSIVEMENT SUR 90 % DE D ET AVEC LA METHODE ACV DYNAMIQUE..... 37
FIGURE 11 : SENSIBILITE A LA DYNAMIQUE DE C DE L'IMPACT TRANSFORMATION : RATIO ENTRE L'IMPACT CALCULE AVEC UNE DYNAMIQUE ALTERNATIVE DE C ET CELLE ISSUE DES MODELES POUR LA VIGNE ET LE SOJA. 38
FIGURE 12 : SENSIBILITE DE L'IMPACT TRANSFORMATION (VALABLE POUR IPCC ET MW&B) AUX DONNEES D'ENTREE POUR L'EVALUATION DES STOCKS DE CARBONE, DANS LES CAS DE CHANGEMENT D'OCCUPATION 39
FIGURE 13 : SENSIBILITE DE L'IMPACT TRANSFORMATION (VALABLE POUR IPCC ET MW&B) AUX DONNEES D'ENTREE POUR L'EVALUATION DES STOCKS DE CARBONE, DANS LES CAS DE CHANGEMENT DE PRATIQUES 39
FIGURE 14 : SENSIBILITE DE L'IMPACT TRANSFORMATION (VALABLE POUR IPCC ET MW&B) AUX DONNEES D'ENTREE POUR L'EVALUATION DES STOCKS DE CARBONE, DANS LES CAS DE CHANGEMENT DE PRATIQUES POUR LES OCCUPATIONS IMPLIQUANT DE LA PRAIRIE (CAS ELEVAGE)..... 40
FIGURE 15 : SENSIBILITE DE L'IMPACT OCCUPATION (MW&B) AUX DONNEES D'ENTREE POUR L'EVALUATION DES STOCKS DE CARBONE, DANS LES CAS DE CHANGEMENT D'OCCUPATION ET DE PRATIQUES 41
FIGURE 16 : SENSIBILITE DE L'IMPACT TRANSFORMATION (MW&B) AUX DONNEES D'ENTREE POUR L'EVALUATION DES TEMPS DE REGENERATION, DANS LES CAS DE CHANGEMENT D'OCCUPATION ET DE PRATIQUES..... 42
FIGURE 17 : SENSIBILITE DES IMPACTS OCCUPATION ET TRANSFORMATION MW&B OBTENUS POUR DIFFERENTES HYPOTHESES DE VEGETATION NATURELLE, EN RELATIF PAR RAPPORT AUX RESULTATS D'INVENTAIRE (HORS FLUX DE CO_2 DU SOL) 43
FIGURE 18 : SENSIBILITE DES IMPACTS OCCUPATION ET TRANSFORMATION MW&B AU CHOIX DE LA REFERENCE, COMPARAISON DES RESULTATS POUR UNE REFERENCE FORET ET DES REFERENCES REGIONALES ISSUES DU RMQS 44
FIGURE 19 : SENSIBILITE DES IMPACTS OCCUPATION ET TRANSFORMATION MW&B AU CHOIX DE LA REFERENCE, COMPARAISON DES RESULTATS POUR UNE REFERENCE FORET ET UNE REFERENCE SOL ARTIFICIALISE. 45
FIGURE 20 : COMPARAISON DE DES SURFACES EN TRANSFORMATION OBTENUES EN FONCTION DES SOURCES BLONK CONSULTANTS, 2013 . 46
FIGURE 21: INFLUENCE DES EMISSIONS DIRECTES DE N_2O SUR LES EMISSIONS LIEES AUX LUC ET LMC : EMISSIONS EN CO2E/UF SELON LA METHODE IPCC TIER 1 SANS ET AVEC L'ADDITION DES EMISSIONS DE N_2O 47
FIGURE 22 : IMPACT SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE DU LAIT ET DE LA VIANDE BOVINE, AVEC ET SANS PRISE EN COMPTE DES FLUX DE CARBONE DU SOL AVEC LES METHODES IPCC ET MW&B (RELATIVEMENT A L'IMPACT SANS PRISE EN COMPTE DU LULUC EXPRIME EN KG EQ CO_2/ KG FPCM OU KG POIDS VIF) 50
FIGURE 23 : RESULTATS D'IMPACT SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE AVEC LA METHODE MW&B POUR LES OCCUPATIONS ET SYSTEMES COMPLETS EN BOVIN LAIT ET BOVIN VIANDE (EN KG EQ. CO_2 / HA) 51
FIGURE 24 : RESULTATS D'IMPACT SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE AVEC LA METHODE ILCD POUR LES OCCUPATIONS ET SYSTEMES COMPLETS EN BOVIN LAIT ET BOVIN VIANDE, EN QUANTIFIANT LES VARIATIONS DE STOCKS AVEC LE TIER 1 IPCC OU LE TIER 2..... 52
FIGURE 25 : INTEGRATION DE L'IMPACT TRANSFORMATION CALCULE AVEC LA METHODE IPCC ET LES VALEURS DE STOCK A L'EQUILIBRE DE L'IPCC PAR DEFAUT A L'INVENTAIRE CHANGEMENT CLIMATIQUE. 53
FIGURE 26 : SENSIBILITE DE L'IMPACT DE TRANSFORMATION CALCULE AVEC LA METHODE IPCC AUX STOCKS DE C DU SOL ET DE LA BIOMASSE 54
FIGURE 27 : COMPARAISON DES IMPACTS ADDITIONNELS DE TRANSFORMATION, CALCULES AVEC LA METHODE IPCC ET MÜLLER-WENK ET BRANDÃO (MW&B) ET L'IMPACT D'OCCUPATION, CALCULE AVEC LA METHODE MW&B..... 55
FIGURE 28 : SENSIBILITE AU CHOIX DE L'ETAT DE REFERENCE POUR LA METHODE MW&B. 56
FIGURE 29 : SENSIBILITE A LA SOURCE DE DONNEES DE STOCK DE C. 57
FIGURE 30 : SENSIBILITE A LA VALEUR DU TEMPS DE REGENERATION..... 58

FIGURE 31: IMPACTS CHANGEMENT CLIMATIQUE PAR UF AVEC ILCD/IPCC ET MW&B NORMALISES PAR RAPPORT A L'IMPACT PAR UF SANS LA PRISE EN COMPTE DES LUC ET LMC 60
FIGURE 32: SENSIBILITE AUX DONNEES DE STOCKS DES PRECEDENTS ET USAGES 61
FIGURE 33: SENSIBILITE AUX PARAMETRES DE REPARTITION TEMPORELLE DES IMPACTS DE TRANSFORMATION 62
FIGURE 34 : IDENTIFICATION DES CATEGORIES DE CLIMAT SELON IPCC 2006 70
FIGURE 35 : EXEMPLES DE DYNAMIQUES DE C SIMULEES AVEC AMG POUR UN MEME SYSTEME DE CULTURE (AVANT ET APRES HARMONISATION DES DONNEES D'ENTREE DU MODELE). 89
FIGURE 36 : EXEMPLE D'UNE DYNAMIQUE DE C DU SOL RECONSTITUEE A PARTIR DE MESURES DE STOCK DE C SUR LA ZONE CULTIVEE (CAS DU SOJA) : A GAUCHE DONNEES EXPERIMENTALES POUR 7 PARCELLES ; A DROITE, EVOLUTION DES STOCKS DE C DU SOL RECONSTITUES AVEC LE MODELE HENIN-DUPUIS POUR LA ZONE A PARTIR DES DONNEES EXPERIMENTALES. 89
FIGURE 37 : EVOLUTION DU STOCK DE C DU SOL SIMULEE AVEC AMG ET ROTH-C POUR UN CHANGEMENT D'USAGE GARRIGUE A VIGNE LABOUREE, SARMENTS EXPORTES. 91
FIGURE 38 : UTILISATION COMBINEE DES MODELES ROTH-C ET AMG POUR EVALUER LES STOCKS DE C A L'EQUILIBRE ET LES DYNAMIQUES DE C DU SOL 91
FIGURE 39 : SYNTHESE DES DONNEES SYNCHRONES DISPONIBLES D'EVOLUTIONS DE STOCKS DE CARBONE DU SOL APRES CONVERSION EN NON-LABOUR POUR LA CULTURE DU SOJA 93
FIGURE 40 : SYNTHESE DES DONNEES DIACHRONES DISPONIBLES D'EVOLUTIONS DE STOCKS DE CARBONE DU SOL APRES CONVERSION EN NON-LABOUR POUR LA CULTURE DU SOJA 93
FIGURE 41 : TRAITEMENT REALISE SUR LES DONNEES DIACHRONES DES PARCELLES 1 A 6 DE SOJA APRES CONVERSION EN NON-LABOUR ... 95
FIGURE 42 : TRAITEMENT REALISE SUR LES DONNEES DIACHRONES DES PARCELLES 1, 2, 5 ET 6 DE SOJA APRES CONVERSION EN NON-LABOUR 95
FIGURE 43 : REPRESENTATION DES DYNAMIQUES D'EVOLUTION DES STOCKS DE CARBONE OBTENUES APRES TRAITEMENT DES DONNEES DIACHRONES DES PARCELLES DE SOJA APRES CONVERSION EN NON-LABOUR 97
FIGURE 44 : REPRESENTATION DE L'EVOLUTION DU RENDEMENT, REEL ET MODELISE, D'UN VERGER DE POMMES DE LA PROVINCE DE CUNEO (ITALIE DU NORD), SUR L'ENSEMBLE DE SON CYCLE DE VIE, DIVISE EN SIX PHASES DE PRODUCTION. (CERUTTI ET AL., 2014, D'APRES CERUTTI ET AL. 2011). 100
FIGURE 45 : ÉVOLUTION DES STOCKS DE CARBONE DES SOLS DES PARCELLES T5 ET T6, COMPARAISON VALEURS MESUREES ET MODELISEES AVEC AMG 105

TABLEAU 1: DESCRIPTION GENERALE DES FILIERES ET PROBLEMATIQUES 10
TABLEAU 2 : DESCRIPTION GENERALE DES PARCELLES PCQE T6 ET T5 11
TABLEAU 3 : LES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES SYSTEMES GRANDES CULTURES 13
TABLEAU 4 : LES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES CAS D'ETUDE ELEVAGE 14
TABLEAU 5 : DESCRIPTION DES SCENARIOS ETUDIES POUR LES ROTATIONS DES SYSTEMES D'ELEVAGE 17
TABLEAU 6 : LES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DE L'INVENTAIRE DU CAS D'ETUDE VIGNE BASE SUR L'INVENTAIRE AGRIBALYSE. 18
TABLEAU 7 : DESCRIPTION DES SYSTEMES « VIGNE » ETUDIES. 19
TABLEAU 8 : DESCRIPTION GENERALE DES SCENARIOS RELATIFS A LA CANNE A SUCRE 21
TABLEAU 9 : DESCRIPTION GENERALE DES CAS D'ETUDE SOJA 22
TABLEAU 10 : DESCRIPTION GENERALE DES SCENARIOS RELATIFS AU SOJA 23
TABLEAU 11 : LES METHODES ACV DU PROJET SOCLE 23
TABLEAU 12: OBJETS D'ANALYSE ET OPTIONS ASSOCIEES 26
TABLEAU 13 : OBJETS D'ANALYSES/PARAMETRES TESTES PAR FILIERE 29
TABLEAU 14 : AVANTAGES COMPARES DES METHODES IPCC / ILCD ET MÜLLER-WENK AND BRANDÃO (2010) 66
TABLEAU 15 : FACTEURS D'USAGE ET DE PRATIQUES POUR L'APPLICATION D'IPCC TIER 1 SUR LES ROTATIONS DES SYSTEMES D'ELEVAGE 77
TABLEAU 16: FACTEURS D'USAGE ET DE PRATIQUES POUR L'APPLICATION D'IPCC TIER 1 SUR LES ROTATIONS DES SYSTEMES D'ELEVAGE 78
TABLEAU 17 : VALEURS DES COEFFICIENTS DE PRATIQUES ET D'USAGES POUR L'APPLICATION D'IPCC TIER 1 SUR LES PRAIRIES PERMANENTES 79
TABLEAU 18 : ENSEMBLES DES SOURCES DE DONNEES UTILISEES POUR CHAQUE CAS D'ETUDE ET APPORT 87
TABLEAU 19 : TYPE ET SOURCE DE DONNEES DISPONIBLES POUR LA DESCRIPTION DES DYNAMIQUES DE CARBONE POUR LES PRODUITS CANNE A SUCRE ET SOJA 92
TABLEAU 20 : CARACTERISATION DES DYNAMIQUES D'EVOLUTION DES STOCKS DE CARBONE OBTENUES APRES TRAITEMENT DES DONNEES DIACHRONES DES PARCELLES DE SOJA APRES CONVERSION EN NON-LABOUR 97
TABLEAU 21 : PHASES DE PRODUCTION CONSIDEREES DANS LA BASE DE DONNEES AGRIBALYSE 1.3. POUR LA VIGNE EN INTEGRE EN LANGUEDOC ROUSSILLON. 99
TABLEAU 22 : EXEMPLES DE PRATIQUES CULTURALES SUR DES SYSTEMES PERENNES EN LIEN AVEC L'EVOLUTION DES STOCKS DE CARBONE DES SOLS ET DE LA BIOMASSE 101
TABLEAU 23 : ITINERAIRE TECHNIQUE DES PARCELLES T5 ET T6 DU DISPOOSTIF PCQE DE LA JAILLIERE 104

1. Introduction

1.1. Contexte du projet SOCLE

L'agriculture et les changements d'usage des sols représentent environ 30% des émissions de gaz à effet de serre ou GES à l'échelle globale (Baumert et al., 2005 ; Smith et al., 2007). Usages et changements d'usage sont intrinsèquement liés du fait du socle commun qu'ils affectent, le sol. Plus de 57% des émissions de carbone dues à l'agriculture et aux changements d'usage des sols sont issues du déstockage de carbone du sol (Lal, 2004).

D'autre part, le carbone en lien avec la matière organique du sol joue un rôle essentiel notamment dans le maintien de la fertilité et de la résistance à l'érosion du sol ou dans le devenir des polluants dans l'environnement (Arrouays et al., 2002 ; Lal, 2004 ; Germon et al., In INRA 2009). La prise en compte du devenir du carbone du sol en fonction d'une activité agricole nécessite donc une approche holistique, l'analyse de cycle de vie (ACV).

Malgré de récents développements, l'application de l'ACV au secteur agricole suscite toujours des questions scientifiques et méthodologiques (Reap et al., 2008), particulièrement sur les impacts liés à l'usage et au changement d'usage des sols (Lindeijer, 2000 ; Milà i Canals et al., 2007a ; Kløverpris et al., 2008 ; Koellner et al,. 2013b). Si des cadres méthodologiques ou réglementaires existent (IPCC, ILCD, PAS2050, MDP, RED etc.), ils ne s'appuient pas tous sur un consensus scientifique unique et ne sont pas immédiatement applicables pour améliorer les ACV agricoles. Ce manque de consensus et de prise en compte holistique de l'usage des sols dans l'ACV contrastent avec les enjeux majeurs liés au rôle potentiel du carbone du sol dans le changement climatique.

1.2. Les objectifs du projet SOCLE

A la lumière du contexte, il apparaît que :

i. la prise en compte du carbone du sol et des impacts de l'usage et du changement d'usage sur ce carbone est primordiale ;
ii. des cadres méthodologiques et des données sont disponibles ;
iii. ces méthodes ne sont pas encore harmonisées et valorisées pour une intégration opérationnelle et une caractérisation des impacts dans les ACV agricoles.

Le projet SOCLE a pour objectif de pallier ce manque en faisant coïncider les informations issues des différentes approches et méthodes afin d'intégrer le carbone du sol et l'influence des usages et changements d'usage des sols dans l'ACV des produits agricoles. Cette intégration doit être cohérente (en accord avec le cadre ACV et en valorisant les résultats de recherche qui sont aboutis et consensuels) et complète (en étant attentif aux effets antagonistes ou en cascade lorsque le rôle du carbone du sol est considéré dans l'impact changement climatique, qualité du sol, etc.).

Les objectifs séquentiels de SOCLE sont :

1. Dresser un état des lieux et une étude comparative des méthodologies existantes parmi les références bibliographiques et lignes directrices afin de mettre en évidence les différences en termes d'hypothèses, de mise en œuvre, de domaine de validité et de portée des résultats ;
2. Identifier les enjeux méthodologiques et scientifiques liés aux objectifs d'application des diverses méthodes ;
3. Tester et comparer différentes options méthodologiques à intégrer dans l'ACV et évaluer leurs influences quant aux résultats pour différentes filières ;
4. Faire des recommandations sur les meilleures options méthodologiques.

1.3. Contenu et organisation du rapport

Ce rapport présente les tests et l'analyse des résultats réalisés dans le cadre de la tâche 3 du projet.

Ces travaux font suite à l'état des lieux et l'analyse critique des méthodologies existantes, conduites dans le cadre de la tâche 2 du projet (cf. Benoist and Bessou (2018)). Ceux-ci ont en particulier abouti à :

- Une description du cadre conceptuel de prise en compte de l'usage des sols en ACV et une analyse de ces principales limites ; et
- Une cartographie et revue critique des méthodes disponibles pour la prise en compte dans les ACV du lien usage des sols et changement climatique dans la bibliographie. Cette revue est également élargie aux méthodes proches sur le plan conceptuel, considérant soit les stocks de carbone des sols mais vis-à-vis d'autres enjeux environnementaux, relatifs à la qualité des sols, soit la question du cycle du carbone et de son effet sur le changement climatique, mais de manière non spécifique aux usages et changements d'usages des sols et au stockage de carbone des sols.

Sur la base de cette revue bibliographique, trois méthodes ont été retenues dans le cadre de la tâche 2 afin d'en tester l'opérationnalité et la sensibilité des méthodes les plus abouties, robustes et prometteuses disponibles à ce jour pour faire le lien entre l'usage des sols, le stockage/déstockage de carbone des sols et l'impact changement climatique. Il s'agit des méthodes suivantes :

- le Tier 1 IPCC 2006, recommandé pour l'ACV par l'ILCD ;
- la méthode Müller-Wenk & Brandão, 2010, recommandée par les travaux de l'UNEP-SETAC ; et
- l'ACV dynamique (Levasseur, 2011), encore en développement mais qui présente l'avantage d'être une réponse générique aux problématiques de prise en compte du cycle du carbone, dans lesquelles s'intègrent la prise en compte des impacts des usages et changements d'usages des sols sur les stocks de carbone.

Les travaux conduits dans le cadre de la tâche 3 visent à mettre en œuvre ces trois méthodes sur des filières contrastées, en vue d'évaluer leur opérationnalité, la possibilité de prendre en compte les spécificités de chacune des filières, et leur sensibilité vis-à-vis de différents paramètres. Les cinq filières retenues se différencient en particulier par le type de production, leur cycle de production, le contexte pédoclimatique et la disponibilité des données. Chacune de ces filières a fait l'objet de tests communs. Certaines questions plus spécifiques ont été traitées à l'échelle d'une ou de quelques filières.
Par ailleurs, à travers les cas d'étude, la sensibilité aux paramètres suivants a été également testée : la détermination des changements d'usage, le choix des valeurs de stocks et des états de références, et les modes de répartition temporelle des impacts de transformation.

Le rapport présente les différents tests réalisés et une analyse synthétique des résultats (analyse transversale et synthèse des résultats pas cas d'étude). Il s'accompagne par ailleurs de fiches thématiques ayant pour objectifs de fournir des retours d'expérience et recommandations sur différentes problématiques rencontrées au cours de ces tests.

2. Méthodes

2.1. Les 5 filières et objectifs retenus dans les cas d'étude

Cinq filières ont été retenues pour la diversité des situations et questions méthodologiques qu'elles peuvent soulever, du fait de leur type de production, de leur cycle de production, ou de la disponibilité des données.

2.2. Les critères retenus pour la sélection des cas d'études

Les critères utilisés pour sélectionner les cas d'étude sont les suivants :

- Prise en compte cultures annuelles, pluriannuelles, pérennes, produits animaux,
- Prise en compte de la rotation (avec uniquement des cultures annuelles ou avec des cultures temporaires)
- Prise en compte de productions tempérées et tropicales,
- Disponibilité de données d'inventaires de cycle de vie (ICV) ou de données permettant d'établir des ICV,
- Possibilité d'étudier des scénarios contrastés (ex : enherbement, fertilisation organique, gestion des résidus, travail du sol, gestion des prairies,…) afin d'évaluer la sensibilité des méthodes vis-à-vis des pratiques culturales ou de gestion des sols identifiées,
- Disponibilité de mesures expérimentales ou de données permettant la modélisation pour évaluer la sensibilité des méthodes à la nature des données d'inventaire utilisées (données expérimentales, données issues de modèles, données issues de la bibliographie).

2.3. Description des problématiques traitées

Le tableau ci-dessous résume les différentes problématiques traitées pour chacun des cas d'étude.

Tableau 1: Description générale des filières et problématiques

Filière	Problématiques
Grandes cultures (maïs fourrage et blé tendre)	*-> choix des références (mesures expérimentales, modélisation, bibliographie)* *-> allocation entre cultures d'une succession culturale, dont prairie temporaire* *-> prise en compte du changement d'occupation des sols* *-> production des références permettant d'être utilisées pour les ACV de produits animaux* *-> test sur des scénarios contrastés en termes de pratiques*
Lait et viande	*-> prise en compte de la prairie temporaire* *-> prise en compte du changement d'occupation des sols (à l'échelle de la succession culturale* *-> tester différentes proportions de prairies et de maïs et différents potentiels agronomiques* *-> choix des références pour des matières premières non étudiés dans les cas d'étude (tourteau de soja)* *-> choix des références sur prairie permanente*
Vigne	*-> questions spécifiques aux cultures pérennes (durée de la culture, prise en compte de ses différentes phases, …)* *-> stockage de C dans la biomasse* *-> Impact des pratiques culturales (travail du sol, apport de résidus de culture et enherbement),* *-> reconstitution des dynamiques pluri-annuelles de C*

Soja	*-> questions spécifiques aux cultures en zones tropicales* *-> prise en compte du changement d'occupation des sols* *-> enjeux forts sur les changements d'occupation des sols* *-> produit d'importation*
Canne à sucre	*-> questions spécifiques aux cultures en zones tropicales* *-> prise en compte du changement d'occupation des sols*

2.4. Cas d'étude - Filière grandes cultures

Les cas d'étude grandes cultures sont issues de données d'expérimentation des essais Pratiques Culturales et Qualité des Eaux (PCQE), implantés sur la station expérimentale ARVALIS Institut du végétal de La Jaillière (Loire Atlantique) en 1987. Des parcelles de ce dispositif ont été retenues du fait de la disponibilité des données, afin de pouvoir utiliser des modèles simulant l'évolution du stock de carbone : analyses de sol, rendements de chaque espèce cultivée et interventions techniques effectuées depuis 1987.

Deux scénarios en termes d'itinéraire technique (ITK 5 et ITK 6) pratiqués sur une rotation maïs fourrage / blé tendre de deux parcelles du dispositif ont été retenus car étant à la fois représentatifs de pratiques dans la région et contrastés en termes de restitution de matière organique.

La conduite culturale effectuée sur la parcelle T6 (ITK 6) est fréquente en région Pays de la Loire (Tableau 2). En effet, selon les données de l'enquête pratique culturale du SSP de 2011, dans des rotations avec une dominante blé tendre et maïs fourrage, 78% des surfaces sont labourées et seulement 13% reçoivent des apports organiques. Ce scénario est plutôt défavorable en termes de restitution de matière organique et de travail du sol contrairement à l'ITK 5.

Tableau 2 : Description générale des parcelles PCQE T6 et T5

Carte d'identité	Parcelle PCQE T6	Parcelle PCQE T5
Type de produit	Blé tendre d'hiver et maïs ensilage	Blé tendre d'hiver et maïs ensilage
Région géographique	France, Pays de la Loire, Loire Atlantique, La Jaillière	France, Pays de la Loire, Loire Atlantique, La Jaillière
Région climatique	T° moy annuelle = 12°C ; Précipitations/ETP = 1.04	T° moy annuelle = 12°C ; Précipitations/ETP = 1.04

Type de sol	Luvisol → sol argileux très actif	Luvisol → sol argileux très actif
Caractéristiques itk	Prairie de 1987 à 1995 Rotation MF/BTH à partir de 1996 Pas de couverts ni de PRO avant 2007 TCSL à partir de 2007 (apports fumier bovin, couverts) Pailles exportées	Rotation BTH/MF TCLS Couverts intermédiaires Apports de fumier ou lisier bovin Pailles exportées
Rendement moyen	Blé : 73.9 q/ha ; maïs : 13.1 t MS/ha	Blé : 74 q/ha ; maïs : 11.1 t MS/ha
Rendement lissé	Blé : 73.9 q/ha ; maïs : 12.4 t MS/ha	Blé : 76.1 q/ha ; maïs : 13.2 t MS/ha

Les pratiques et les rendements peuvent varier fortement au cours du temps en fonction des contextes climatiques et de production (exemple : disponibilité en matière organique, pression adventices, structure du sol,…). Différents types de simulation ont été conduits, afin de pouvoir observer les écarts entre les deux types d'approche :

- des simulations tenant compte de ces données réelles. Cependant, les variations d'itinéraires techniques peuvent être considérées comme des changements de pratique dans les lignes directrices de l'IPCC. Il paraissait toutefois intéressant d'exploiter ces données, ces changements de pratiques pouvant être couramment observés sur des systèmes agricoles réels.
- des simulations s'appuyant sur des scénarios lissés en moyennant les apports en PRO, en azote minéral, les rendements, les différentes interventions de travail du sol et les restitutions de carbone par les couverts intermédiaires. Des données lissées sont couramment utilisées dans les études ACV, lorsque les données réelles ne sont pas disponibles. Cette harmonisation des données aura un impact sur les estimations des stocks de carbone du sol par AMG (dites données spécifiques dans la grille de résultats) et sur les résultats de l'ACV dynamique. En revanche, les résultats obtenus avec la méthode IPCC seront identiques, celle-ci n'étant pas suffisamment fine pour prendre en compte des variations de pratiques annuelles.

Ces données ont été utilisées pour la mise en œuvre des méthodes sur cinq cas d'étude :

- **System_NC_1 et 2** : Deux cas d'étude sans changements de pratique ni d'usage. Ces deux cas d'étude décrivent respectivement les systèmes ITK 6 et ITK 5.
- **System_LMC_1 et 2** : Un scénario avec des données d'itinéraire technique réelles (System_LMC_1) et un autre avec ces mêmes données lissées (System_LMC_2). Dans ces deux scénarios, il s'agit de quantifier l'impact d'un changement de pratique, d'un itinéraire avec des restitutions de carbone faible, correspondant au cas le plus fréquent selon les statistiques du SSP de 2011, à un itinéraire plus favorable, mis également en œuvre dans la région.
- **System_LUC_1** : Il s'agit de quantifier l'impact d'un changement d'usage observé dans la région et notamment sur les parcelles étudiées, c'est-à-dire la transformation d'une praire permanente en terre cultivée (dans le cas d'étude, ITK 5).

Tableau 3 : Les principales caractéristiques des systèmes grandes cultures

Système étudié	Inventaires	Situation précédente	Situation actuelle	Raison du choix
NC 1	Soft wheat 1 [WTp] (NC) Silage maize 1 [WTp] (NC)	Pas de fertilisation organique, pas de couvert intermédiaire, labour		Etudier les impacts d'un système dans son fonctionnement actuel
NC 2	Soft wheat 2 [WTp] (NC) Silage maize 2 [WTp] (NC)	Fertilisation organique, couvert intermédiaire, technique culturale simplifiée		
LMC 1	Soft wheat 1 [WTp] : Ti-NoTi (LMC) Silage maize 1 [WTp] : Ti-NoTi (LMC)	Fertilisation organique occasionnelle, couvert intermédiaire occasionnel, labour	Fertilisation organique, couvert intermédiaire, technique culturale simplifiée	Etudier les impacts de changement de pratiques en considérant deux méthodes différentes : - prise en compte de l'ITK réellement pratiqué (avec une alternance de pratique, des variations de rendement), - un scénario lissé
LMC 2	Soft wheat 2 [WTp] : Ti-NoTi (LMC) Silage maize 2 [WTp] : Ti-NoTi (LMC)	NC 1	NC 2	
LUC 1	Soft wheat [WTp] : Gr-Cr (LUC) Silage maize [WTp] : Gr-Cr (LUC)	prairie	NC2	Etudier les impacts d'un changement d'usage

2.5. Cas d'étude - Filière élevage

Les cas d'étude Elevage concernent la production bovine laitière et bovine allaitante.
Deux systèmes laitiers en polyculture-élevage situés en Loire-Atlantique sont étudiés. Ils se distinguent par leur potentiel agronomique et par la part de la surface en maïs fourrage dans la surface fourragère principale.
Ces cas d'étude sont basés sur des Cas-type du dispositif Insosys-Réseau d'élevage :

- CT1A - LAIT SPECIALISE SILO OUVERT – BON POTENTIEL
- CT3C - LAIT SPECIALISE HERBAGER - ZERO MAÏS, FAIBLE POTENTIEL

Par ailleurs, un élevage naisseur de broutards[1] dans la région charolaise a été retenu.
Ce cas d'étude est basé sur le Cas-type du dispositif Insosys-Réseau d'élevage :

- CT11060 BV - BROUTARDS REPOUSSES

Ces cas type représentent des modèles de fermes cohérents et représentatifs des pratiques de leur type de système et de leur région. La description de leurs pratiques culturales a été complétée par de l'expertise d'agronomes régionaux.
L'objectif de ces choix de situation était d'obtenir des situations contrastées et représentatives des modes de production de lait et de viande en France.

Chaque ferme est composée d'un ensemble de rotations, cohérentes par rapport à la conduite de l'élevage (pâturage, alimentation des animaux).
Le
Tableau 4 ci-après reprend les principales caractéristiques des cas retenus, dont les modes d'occupation du sol (surface labourable en rotation, prairie).

[1] Un broutard est un jeune veau male qui est élevé sous la mère, nourrit de lait et d'herbe jusqu'à son sevrage ; moment auquel il est vendu à un élevage d'engraissement

Tableau 4 : Les principales caractéristiques des cas d'étude élevage

Cas-type	Occupations	Surface (ha)	Production (L de lait ou kg poids vive)	Cheptel (UGB)
Système bovin lait de plaine conventionnel Zone fourragère > 30 % Haut potentiel	Maïs/Blé/Prairies Temporaires (5 ans)	6,3	477000 L	90
	Maïs/Maïs/Blé/Prairies Temporaires (5 ans)	24		
	Maïs/Blé/culture intermédiaire moutarde	26,2		
	Prairies permanentes améliorées	5,6		
Système bovin lait de plaine conventionnel Zone fourragère < 10 % Bas potentiel	Mais/Raygrass Italien/ Prairies Temporaires (5 ans)	42	304750 L	75
	Prairie Temporaire 6 ans	27		
	Prairies permanentes	6,8		
Système broutard conventionnel en zone charolaise	Blé/Orge/Prairies Temporaires (5 ans)	35	33 510 kg	102
	Prairies permanentes	65		

Les systèmes laitiers choisis sont basés sur les inventaires de la base de données Agribalyse 1.3 suivants (chaque système génère trois coproduits : du lait, des vaches de réforme et des veaux) :

- Système laitier, conventionnel, spécialisé de plaine, herbe (5 à 10% maïs / SFP)
    - 1 kg Cow milk, conventional, lowland milk system, silage maize more than 30%, at farm gate/FR U
    - 1 kg Cull cow, conventional, lowland milk system, silage maize more than 30%, at farm gate/FR U
    - 1 p Conventional lowland milk system, silage maize more than 30%, animal class 1, at farm/FR U
- Système laitier, conventionnel, spécialisé de plaine de l'ouest, maïs dominant (>30% maïs / SFP)
    - 1 kg Cow milk, conventional, lowland milk system, silage maize 5 to 10%, at farm gate/FR U
    - 1 kg Cull cow, conventional, lowland milk system, silage maize 5 to 10%, at farm gate/FR U
    - 1 p Conventional lowland milk system, silage maize 5 to 10%, animal class 1, at farm/FR U

En viande, le cas d'étude choisi est basé sur les inventaires de la base de données Agribalyse 1.3 (ce type de système génère deux coproduits : des vaches de réforme et des broutards) :

- 1 kg Suckler cull cow, conventional, suckler cow system, less than 1.2 LU per ha, at farm gate/FR U
- 1 p Conventional suckler cow system, less than 1.2 LU per ha, animal class 1, at farm/FR U

Ce sont les systèmes d'élevage dans leur ensemble qui sont étudiés dans SOCLE, considérant la production de ces coproduits, et intégrant l'ensemble des surfaces de l'exploitation d'élevage nécessaires (Figure 1). Le périmètre est donc ici élargi par rapport aux inventaires Agribalyse (périmètre atelier).

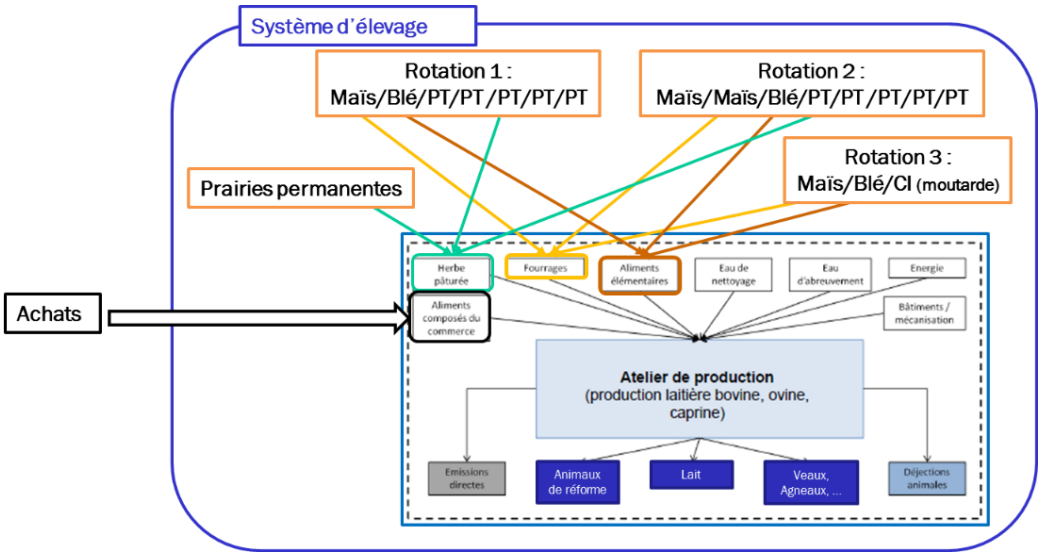


Figure 1 : Périmètre du système d'élevage, pour l'étude des dynamiques de carbone, dans SOCLE

Dans les pratiques actuelles, les surfaces en rotation sont labourées. Différentes variantes des cas d'étude ont été définies pour être en mesure d'évaluer les effets de pratiques qui, a priori, influencent l'évolution du stock de carbone dans le sol.

Pour chaque rotation, un changement d'un usage A à un usage B a été étudié. Ici, il s'agissait de l'arrêt de la pratique du labour sans changement dans l'apport organique (labour -> non labour). Il a en effet été choisi de simuler le passage d'un état courant à un état amélioré. Les prairies permanentes ne subissent pas de changement particulier à part pour le scénario S13, qui passe d'une gestion courante à une gestion améliorée. Le tableau ci-après (

Tableau 5) reprend l'ensemble des scénarios étudiés pour les cas d'élevage.

Tableau 5 : Description des scenarios étudiés pour les rotations des systèmes d'élevage

Systèmes	nom du scenario	Situation précédente (Usage A)	Situation actuelle (Usage B)	Raison du choix
Milk1 [WTpM] : Ti-NoTi (LMC)	Rot1 - Milk1 [WTpM] : Ti-NoTi (LMC)	Rotation Maïs/Blé/Prairies Temporaires (5 ans) Labour – Fertilisation organique	Rotation Maïs/Blé/Prairies Temporaires (5 ans) Non labour – Fertilisation organique	Changement de pratiques avec accroissement du stockage de C
	Rot2 - Milk1 [WTpM] : Ti-NoTi (LMC)	Rotation Maïs/Maïs/Blé/Prairies Temporaires (5 ans) Labour – Fertilisation organique	Rotation Maïs/Maïs/Blé/Prairies Temporaires (5 ans) Non labour – Fertilisant organique	
	Rot3 - Milk1 [WTpM] : Ti-NoTi (LMC)	Mais/Blé et culture intermédiaire (moutarde) Labour – Fertilisation organique	Maïs/Blé/Blé Non labour – Fertilisant organique	
	Gr - Milk1 [WTpM]	Prairie permanente	Prairie permanente	Dynamique de stockage de C sans changement
Milk2 [WTpM] : Ti-NoTi (LMC)	Rot1 - Milk2 [WTpM] : Ti-NoTi (LMC)	Rotation Mais/RayGrass Italien/Prairie Temporaire (5 ans) Labour – Fertilisation organique	Rotation including temporary grassland (Mais/Prairie Temporaire 6 ans) Non labour – Fertilisant organique	Changement de pratiques avec accroissement du stockage de C
	Rot2 - Milk2 [WTpM] : Ti-NoTi (LMC)	Prairie temporaire resemée	Prairie temporaire resemée	Dynamique de stockage de C sans changement
	Gr - Milk2 [WTpM]	Prairie permanente	Prairie permanente	
Beef [WTpM] : Ti-NoTi (LMC)	Rot1 - Beef [WTpM] : Ti-NoTi (LMC)	Rotation Blé/Orge/Prairies Temporaires (5 ans) Labour – Fertilisation organique	Rotation Blé/Orge/Prairies Temporaires (5 ans) Non labour – Fertilisant organique	Changement de pratiques avec accroissement du stockage de C
	Gr - Beef [WTpM] : N-Imp (LMC)	Prairie permanente	Prairie permanente – variation des pratiques, fertilisation	variation de la dynamique de stockage de C

LUC / LMC ? : Land Use Change (Changement d'Occupation) or Land Management Change (Changement de pratique)

2.6. Cas d'étude - Filière vigne

Dans le projet SOCLE, la vigne a été retenue pour traiter de la déclinaison des méthodes retenues suite à l'étude bibliographique sur un exemple de culture pérenne tempérée.

Les différents scénarios du cas d'étude « vigne » sont basés sur les inventaires de la base de données Agribalyse 1.3. En effet, ces systèmes de production représentent les vignobles français pour lesquels une synthèse des données existantes au niveau national a été effectuée, notamment une harmonisation des itinéraires techniques et caractéristiques clés des vignobles (durée de vie, fertilisation, type de taille,…) en métropole. Parmi les situations types d'Agribalyse, la vigne du Languedoc Roussillon conduite en intégré a été retenue, car elle est cultivée en conditions méditerranéennes, ce qui constitue des conditions climatiques généralement observées dans les autres zones de production de raisin au niveau mondial. Le sol considéré pour l'étude est un limon sableux, avec des cailloux (teneur de 20%).

L'inventaire Agribalyse prend en compte les différentes phases du cycle de vie de la vigne : pépinière, implantation, montée en production, pleine production et destruction. Il inclut i/ les processus de travail du sol, d'implantation et de destruction de la vigne et de ses infrastructures (piquets, fils zingués), de fertilisation, de gestion des pathogènes et ravageurs, ii/ les machines et hangars de parking, iii/ tous les intrants tels que les jeunes ceps de vigne, les fertilisants minéraux et organiques, les matières actives, l'eau d'irrigation (pour la pépinière) et les carburants ainsi que le transport à la ferme, iv/ les émissions directes issues de la combustion des carburants, de l'abrasion des pneus, et les autres émissions directes au champ. Sont exclus de l'inventaire tous les processus advenant après récolte ainsi que tous les travaux manuels (taille, ébourgeonnage,…etc.), le transport du raisin au pressoir, les outils de travail manuel et le remplacement des ceps. Le tableau (Tableau 6) ci-après reprend les principales caractéristiques de l'inventaire utilisé dans les scénarios des cas d'étude vigne.

Dans les pratiques actuelles en Languedoc Roussillon, le sol est travaillé, il n'y a pas d'herbe sur l'inter-rang, et les sarments issus de la taille sont exportés. Différentes variantes du cas d'étude ont été définies pour être en mesure d'évaluer les effets de pratiques qui, a priori, influencent l'évolution du stock de carbone dans le sol et dans la biomasse de la vigne. De plus, l'effet d'un changement d'usage du sol pour mettre la vigne en culture, et ce, à partir de différentes couvertures possibles a été étudié. Le tableau ci-après (Tableau 7) reprend l'ensemble des 5 systèmes étudiés pour la vigne.

Les effets d'apports de produits organiques sur le carbone organique du sol (cependant, les apports d'éléments nutritifs de ces produits sont pris en compte dans l'inventaire de base) n'a pas été une option retenue. En effet, les références existant actuellement ne sont pas suffisamment étayées sur ces effets, en particulier faute de données expérimentales en vigne de suivi pluriannuel du stock de C du sol en conditions d'apports de produits organiques et dans des contextes de sol variés.

Tableau 6 : Les principales caractéristiques de l'inventaire du cas d'étude vigne basé sur l'inventaire Agribalyse.

Caractéristiques	Raisin intégré Languedoc Roussillon			
Type de produit	Raisin de cuve (tous cépages et vins confondus)			
Région géographique	France, Languedoc Roussillon			
Région climatique	T° moyenne annuelle régionale = 12.7°C P/ETP moyenne annuelle = 0.7 (données Agri4Cast – JRC)			
Type de sol	Limon sableux et caillouteux CaCo3 = 1/1000			
Caractéristiques itk		Implantation/ destruction	Montée en production	Pleine production
	Durée de la phase	1 an (en fin et début de cycle	2 ans	30 ans

		de production)		
	Fertilisation minérale (/ha/an)	150 U P_2O_5 300 U K_2O	20 U N 20 U K_2O	30 U N 12 U P_2O_5 50 U K_2O
	Fertilisation organique (/ha/an)	30 t compost	30 U N 20 U P_2O_5 30 U K_2O	10 U N 5 U P_2O_5 5 U K_2O
	Travail du sol	Décompactage Labour Herse et Chisel	Labour Herse rotative Herse	Labour Herse
Rendement par phases		0 kg/an sur 1 an	5250 kg/an sur 2 ans	10 500 kg/an sur 30 ans
Rendement moyen annuel	320250 kg/ha sur 32 ans soit 10008 kg/ha/an			

Tableau 7 : Description des systèmes « vigne » étudiés.

Système étudié	Situation précédente	Situation actuelle	Raison du choix
Vine [WTpD]: Fo-Pe (LUC)	Forêt méditerranéenne	Vigne en production intégrée, sol travaillé, inter-rang nu, sarments exportés	Evaluer l'effet d'un changement d'usage à partir d'une des végétations naturelles possibles
Vine [WTpD]: Sc-Pe (LUC)	Garrigue	Vigne en production intégrée, sol travaillé, inter-rang nu, sarments exportés	Evaluer l'effet d'un changement d'usage à partir d'une des végétations naturelles possibles
Vine [WTpD]: NoTi-Ti (LMC)	Vigne en production intégrée, **sol non travaillé**, inter-rang nu, sarments exportés	Vigne en production intégrée, **sol travaillé**, inter-rang nu, sarments exportés	Vérifier et quantifier l'effet supposé déstockant d'un travail du sol
Vine [WTpD]: Exp-NoExp (LMC)	Vigne en production intégrée, sol travaillé, inter-rang nu, **sarments exportés**	Vigne en production intégrée, sol travaillé, inter-rang nu, **sarments retournés au sol**	Vérifier et quantifier l'effet supposé positif sur le stockage de C dans le sol du retour des sarments
Vine [WTpD]: BaS- CoS (LMC)	Vigne en production intégrée, sol travaillé, **inter-rang nu**, sarments exportés	Vigne en production intégrée, **sol non-travaillé**, **inter-rang enherbé**, sarments exportés	Vérifier et quantifier l'effet supposé positif sur le stockage de C dans le sol de l'enherbement du rang (on suppose qu'on ne travaille pas l'inter-rang)

2.7. Cas d'étude - Filière canne à sucre

Présentation générale du cas d'étude et des scénarios étudiés

Les données pour l'inventaire de la production de canne à sucre sont extraites de données Ecoinvent et d'une étude ACV sur le bioéthanol issu de canne à sucre au Brésil (Caldeira-Pires et al., 2013; Ecoinvent). Le Brésil est un producteur majeur de canne à sucre. Celle-ci est principalement cultivée dans les régions Centre-Sud et le Nord-Est du pays (Figure 2). Dans le cas d'étude choisi pour SOCLE, la région de production est le Centre-Sud, où les principaux types de couvert végétal, aujourd'hui majoritairement anthropisés, sont la savane ou cerrado et le cerradão qui est une étape de régénération intermédiaire entre le cerrado et la forêt.

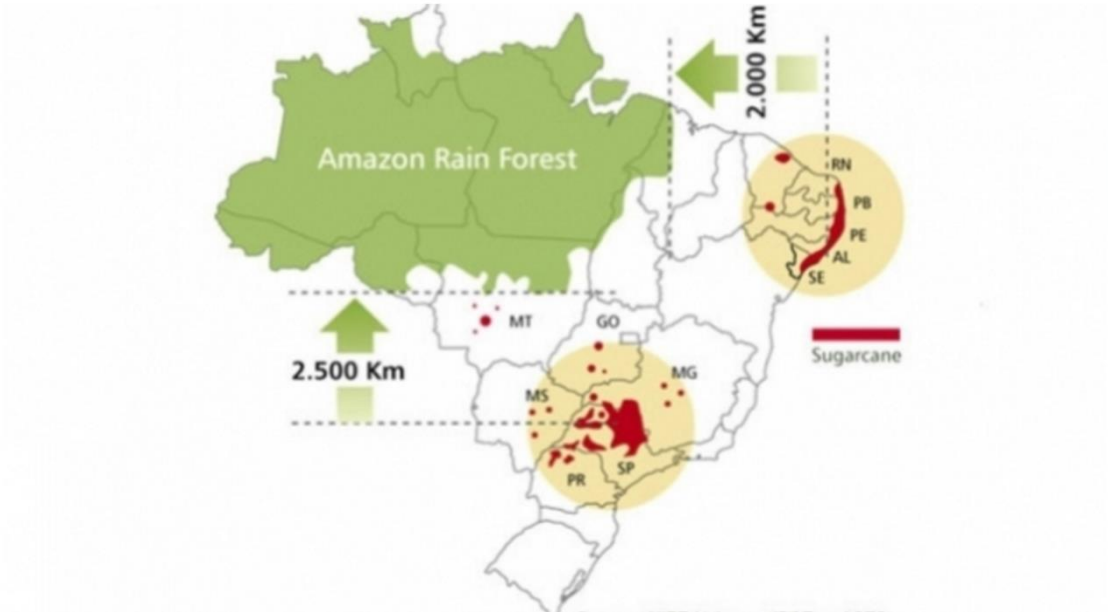


Figure 2 : principales régions de production de la canne à sucre au Brésil en rouge. Sources NIPE-Unicamp, IBGE and CTC

Pour les besoins du projet SOCLE, seul l'impact en CO_2 équivalent par hectare cumulé au point de sortie de champ des tiges de canne à sucre a été comptabilisé.

La canne à sucre est produite selon un cycle d'exploitation de 4 à 5 ans. Après une préparation du sol, la canne est semée et la première coupe de tige de canne à sucre a lieu après environ 15 mois. Les repousses sont coupées une fois par an jusqu'à 5 coupes au total avant une replantation car la canne perd rapidement en productivité. Communément la parcelle est brûlée afin de faciliter la coupe manuelle des tiges. Les préoccupations environnementales ont emmené les gouvernements fédéraux et décentralisés à introduire des décrets pour limiter cette pratique de brûlis (Macedo et al., 2008). Il était donc intéressant de tester l'impact potentiel de l'arrêt du brûlis en termes de stockage/déstockage du carbone du sol. La fréquence de coupe, les modalités de brûlis et la durée relativement courte du cycle au regard des dynamiques de carbone du sol nous ont finalement emmenés à considérer la canne à sucre comme une culture annuelle plutôt qu'une culture pérenne.

Les 4 scénarios testés dans SOCLE sont résumés dans le Tableau 8.

Deux changements d'usage théoriques furent testés :

1. depuis une forêt primaire vers des pratiques courantes
2. depuis une savane, assimilée au cerrado local, vers des pratiques courantes.

La pratique courante dans les champs de canne à sucre consiste à brûler les résidus avant l'extraction des tiges de canne à sucre exploitables. Nous avons donc testé deux types de changement de pratiques :

1. un passage du courant (Burn) vers un système sans brûlis (NoBurn=NoExp)
2. un passage du nouveau système sans brûlis (NoBurn=NoExp) vers un système d'export des résidus (Exp).

Tableau 8 : Description générale des scénarios relatifs à la canne à sucre

Scenarios	Previous	Current
SCane [TrM]: Fo-Cr (LUC)	Forest	Burn
SCane [TrM]: Sa-Cr (LUC)	Savanna	Burn
SCane [TrM]: Burn-NoBurn (LMC)	Burn	NoBurn=NoExp
SCane [TrM]: NoExp-Exp (LMC)	NoBurn = NoExp	100% export

2.8. Cas d'étude - Filière soja

Le choix de la région de production pour le soja a été réalisé après une analyse de la littérature en termes de données disponibles (stockage de carbone du sol et inventaire de cycle de vie), et d'importance pour la culture. L'Etat du Mato Grosso, au Brésil, a alors été retenu. En effet, cet état est le plus producteur au Brésil, avec 30 % des surfaces occupées par la culture de soja. En termes de végétation, le Mato Grosso se situe dans une région dite de « tension écologique » ou écotone, à l'intermédiaire entre deux biomes « Amazone » et « Cerrado ». Ces deux biomes correspondent à une végétation dominante, respectivement la « forêt tropicale équatoriale » et la « savane arborée » (voir Figure 3).

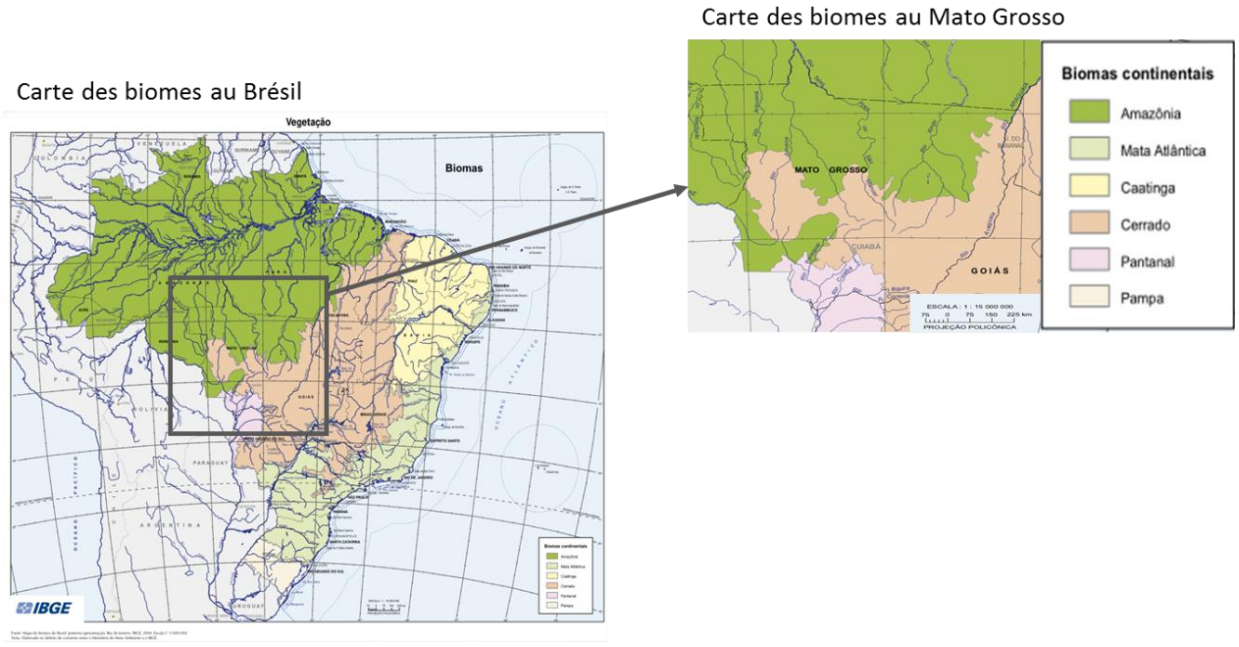


Figure 3 : Situation de l'Etat du Mato Grosso, au Brésil, en région Centre-Ouest (source IBGE)

Les données d'inventaire utilisées pour ce cas d'étude ont été reprises de la base de données Agribalyse (version 1.3 d'avril 2016), elle-même basée sur le projet Ecoalim pour ce qui concerne la production de soja. Les deux processus utilisés sont représentatifs de la région Centre-Ouest du Brésil, ce qui inclut le Mato Grosso, pour une culture avec ou sans labour (*Soybean grain, no tillage, Centerwest BR*, et *Soybean grain, tillage, Centerwest BR*). Deux modifications ont été apportées à ces processus avant leur ré-utilisation dans le cadre du projet Socle :

- La suppression des flux de transformation et des impacts associés, l'objectif du projet étant de prendre en compte ces impacts selon différentes méthodologies et sources de données ; et
- Une mise à jour du rendement, soit de 3 t/ha au lieu de 2,7 t/ha, afin d'être plus en accord avec les études et données disponibles concernant le stockage de carbone du sol.

L'unité fonctionnelle (UF) de ces inventaires est « 1 kg de graines de soja produites au Mato Grosso, à la porte de ferme ».

Les données collectées pour ce cas d'étude, en termes de pratiques culturales et de stockage de carbone, sont issues de différentes études et donc de différents sites, et de valeurs moyennes. Elles ne sont donc pas représentatives d'une seule réalité. Les principaux éléments de description de ces pratiques sont donnés dans le Tableau 9 suivant.

Tableau 9 : Description générale des cas d'étude soja

Carte d'identité	Soja, avec ou sans labour
Type de produit	Soja
Région géographique	Brésil, Etat du Mato Grosso
Région climatique	Zones climatiques IPCC *Tropical Moist Forest* et *Tropical Wet Forest*
Type de sol	Généralement oxisols
Caractéristiques itk	Pour la culture avec labour : monoculture Pour la culture sans labour : rotations longues, représentatives de pratiques de conservation
Rendement moyen	3 t/ha

La zone d'étude définie au sein du Brésil, le Mato Grosso, est située sur l'arc dit de déforestation, zone intermédiaire entre deux types de biomes vulnérables aux changements d'usage : le biome « Amazone » et le biome « Cerrado ». Le choix de changement d'usages des sols retenu dans le cadre de ce cas d'étude est donc une déforestation, d'une forêt native vers la culture de soja.

En termes de pratiques culturales, le principal changement observé et étudié dans la littérature est une adoption de pratiques de conservation, marquée notamment, pour ce qui concerne le stockage de carbone, par un arrêt du labour.

Par conséquent, les différents scénarios considérés dans le cadre du projet Socle sont :

- 4 scénarios de changements d'usages : déforestation de la végétation naturelle à la culture du soja, avec ou sans labour, pour les deux zones climatiques du Mato Grosso ; et
- 2 scénarios de changements de pratiques : passage d'une monoculture de soja à des pratiques de conservation, marqué en particulier par un arrêt du labour, pour les deux zones climatiques du Mato Grosso.

Ces six scénarios sont décrits dans le Tableau 10 suivant. Les codes donnés dans ce tableau sont ensuite utilisés dans la suite du rapport pour désigner ces scénarios.

Tableau 10 : Description générale des scénarios relatifs au soja

Scénarios	Usage précédent	Usage actuel / étudié	Région climatique IPCC
Soy [TrW]: Fo-Cr (LUC)	Forêt	Soja (avec labour)	Climat équatorial (« Tropical wet »)
Soy [TrW]: Fo-Cr(NoTi) (LUC)	Forêt	Soja (sans labour)	Climat équatorial (« Tropical wet »)
Soy [TrW]: Ti-NoTi (LMC)	Soja (avec labour)	Soja (sans labour)	Climat équatorial (« Tropical wet »)
Soy [TrM]: Fo-Cr (LUC)	Forêt	Soja (avec labour)	Climat tropical humide (“Tropical moist”)
Soy [TrM]: Fo-Cr(NoTi) (LUC)	Forêt	Soja (sans labour)	Climat tropical humide (“Tropical moist”)
Soy [TrM]: Ti-NoTi (LMC)	Soja (avec labour)	Soja (sans labour)	Climat tropical humide (“Tropical moist”)

2.9. Les méthodes ACV appliquées et les objets d’analyse étudiés

2.9.1.Les méthodes ACV appliquées

Les méthodes ACV appliquées pour les cas d’étude ont été sélectionnées à la suite des conclusions du rapport de revue critique sur les méthodes (1er livrable du projet). Elles sont listées (Tableau 11) et détaillées ci-après.

Tableau 11 : Les méthodes ACV du projet SOCLE

Méthodes retenues
IPCC/ILCD
Müller-Wenk & Brandão, 2010 (MW&B)
ACV dynamique

2.9.1.1. La méthode IPCC / ILCD

L’approche IPCC est une méthode pour préparer un inventaire annuel de gaz à effet de serre, notamment utilisable dans les secteurs agricoles et forestiers. Les détails de cette méthode sont regroupés dans le volume 4 des recommandations du Groupe d’experts Intergouvernemental sur l’Evolution du Climat (GIEC, ou IPCC en anglais) de 2006. Développé en 1988 par Bert Bolin et récompensé par le Prix Nobel de la Paix, cet organisme est ouvert à tous les pays de l’ONU. C’est aujourd’hui la méthode la plus utilisée pour les bilans sur le changement climatique et elle assure donc une comparaison aisée entre plusieurs cas de plusieurs pays.

Selon cette méthode, l’impact sur le réchauffement climatique induit par une variation de stock de carbone (du sol ainsi que de la biomasse) sur une année donnée est estimé par la différence de stocks entre les deux usages et divisé par le laps de temps de la transition des stocks de carbone d’équilibre de l’ancien au nouvel usage. Une valeur de 20 ans est proposée par défaut. Elle comptabilise par ailleurs des émissions de N_2O induites par le destockage de carbone de sol, estimées à partir d’une quantité d’azote disponible, elle-même déterminée à partir de la perte de carbone étudiée et du ratio C:N du sol (de Klein et al. 2006)..

Les recommandations de l'ILCD s'appuient partiellement sur la méthode IPCC. Elles se différencient cependant par les deux points suivants :

- la méthode de répartition temporelle des impacts induits par la transformation (dégressif sur 20 ans ou sur une autre durée, correspondant au temps nécessaire pour atteindre 90 % de la variation théorique de stocks de carbone des sols),
- non mention de la biomasse aérienne et des émissions de N_2O induites par un déstockage de carbone.

Cette méthode propose par ailleurs trois niveaux (Tiers 1, 2 et 3) de détermination des stocks en fonction des informations à la disponibilité de l'utilisateur.

2.9.1.2. La méthode Muller-Wenk & Brandão (2010)

La méthode MW&B est tirée d'un article scientifique (Müller-Wenk & Brandão, 2010). Elle considère l'impact des usages et changements d'usages des sols sur le transfert de CO_2 entre la végétation, le sol et l'atmosphère. Cette méthode prend en compte la variation de stockage de carbone (dans le sol et la biomasse), comparativement à un usage de référence, et les temps de régénération nécessaires pour le rétablissement des stocks après changement d'usage ou après occupation d'un sol. Des facteurs de caractérisation sont proposés pour certains usages et changements d'usage, pour six zones climatiques différentes à l'échelle globale.

Les principes de calcul de la méthode MW&B sont donnés ci-après, selon le type d'impact considéré :

1) Caractérisation de l'impact de transformation

Le facteur de caractérisation de la transformation d'un état de référence vers un usage B est obtenu en multipliant l'écart de stock entre ces deux usages par un facteur de durée (df), cf Équation 1. Ce facteur df est lui-même calculé en divisant le temps de régénération, soit le temps nécessaire pour atteindre le stock de carbone à l'équilibre de l'état de référence en partant du stock de carbone à l'équilibre de l'usage B, par la durée de vie du CO_2 fossile (estimé sur un horizon de 500 ans à 157 ans).

Équation 1 : Calcul du Facteur de transformation d'un Usage B, selon Müller-Wenk & Brandão, 2010

$$FC(B) en\ t\ C/ha = \big((Stock\ sol\ (référence) + biomasse(référence))\ - (Stock\ sol\ (B) + biomasse(B))\big) \times df$$

$$avec\ df = temps\ de\ régénération\ \times \frac{1}{157}$$

L'impact transformation d'un usage A à un usage B est obtenue par la différence entre le facteur de caractérisation de l'usage A et celui de l'usage B, cf Équation 2.

Équation 2 : Calcul de l'impact de transformation d'un Usage A à un Usage B, selon Müller-Wenk & Brandão, 2010

$$Impact\ de\ transformation\ de\ A \rightarrow B\ en\ t\ C/ha/an = FC\ (Usage\ B)\ - FC\ (Usage\ A)$$

2) Caractérisation de l'impact d'occupation

On calcule également un impact d'occupation pour l'usage actuel (appelé B dans l'ensemble du projet), en divisant la différence entre le stock de l'état de référence et le stock actuel par la durée de vie du CO_2 fossile (voir Équation 3).

Équation 3 : Occupation d'un Usage B, selon Müller-Wenk & Brandão, 2010

$$Occupation\ de\ l'Usage\ B\ en\ tC/ha/an$$

$$= ((Stock\ natif\ sol + biomasse) - (stock\ Usage\ B\ sol + biomasse\ )) \times \frac{1}{157}$$

2.9.1.3. La méthode ACV dynamique

Le principe de la méthode est d'introduire une caractérisation différente des émissions de gaz à effet de serre selon leur année d'émission (Levasseur, 2010). Pour pouvoir appliquer la méthode aux changements d'usages des sols, il est alors nécessaire de détailler la dynamique annuelle d'émission ou de captation due aux déstockages ou stockages de carbone, avant de pouvoir déterminer son impact dynamique. Pour cela, un outil dénommé dynCO2 a été développé par le CIRAIG afin de faciliter l'opérationnalisation de la méthode (disponible à l'adresse suivante : http://www.ciraig.org/en/dynco2.php).

2.9.2. Analyse de sensibilité pour les différentes filières

Afin de comprendre comment s'adaptent ces méthodes aux différentes variations que peuvent présenter des cas réels, certaines variations de paramètres ont été testées. Ces paramètres sont nommés « objets d'analyse » et peuvent être associés à diverses options, dont une dite « de base » (Voir Tableau 12).

Tableau 12: Objets d'analyse et options associées

(x)* : ces données sont également nécessaires pour la mise en œuvre de MW&B et ACV dyn mais l'analyse de sensibilité n'a pas été mise en œuvre sur cette méthode.

Objet d'analyse		Source de données pour l'évaluation des stocks carbone des usages étudiés	Dynamique de l'évolution des stocks de carbone suite à un changement	Répartition temporelle impacts transformation	Identification de l'état de référence	Source de données pour l'évaluation des stocks carbone état de référence	Source de données pour l'évaluation du temps de régénération	Source de données pour identifier les transformations	Source de données pour déterminer le ratio C/N
Méthodes concernées	ILCD / IPCC	x		x				x	x
	MW&B	x		x	x	x	x	(x)*	(x)*
	ACVdyn	x	x	x				(x)*	(x)*
Option de base		IPCC	Données spécifiques modélisation	Linéaire 20 ans	a-Végétation Naturelle Potentielle	a et b-IPCC	a et b-Valeur littérature	Changement de pratique étudié	IPCC
Autres options		équation IPCC enrichie (Tuomisto et al. 2015)	Autres modélisations	Linéaire sur durée 90 % stock C éq	b-Végétation Naturelle autre		a et b-+ 10 % sur valeur littérature	Blonk Consultants, 2013	IPCC +10%
		+ 10 % sur valeurs IPCC		Dégressif 20 ans	c-Usage étudié	c-Max RMQS	c et d-Valeur littérature	Solution CITEPA en cours de validation	Données spécifiques
		Données spécifiques terrain		Dégressif sur durée 90 % stock C éq	d-Usage avec stock maximal régional	d-Méd. RMQS			
					e-Sol artificialisé	e- Mila i Canals, 2007	e-Hypothèse 0 et 0.5 ans		

Par exemple, pour l'objet d'analyse « Etat de référence », il y a cinq options retenues. L'état de référence correspond à l'état de la parcelle avant son usage agricole. L'option de base correspond ici à la végétation naturelle potentielle, c'est-à-dire la végétation qui s'installerait théoriquement sans contrôle de l'Homme. Pour déterminer celle qui correspond à nos cas type, nous avons utilisé une carte fournie par IPCC. Une fois que chaque végétation naturelle potentielle a été définie, il est possible de calculer le stock natif, soit le stock de carbone dans le sol et la biomasse de la parcelle à l'origine. Ces stocks natifs seront ensuite utilisés dans les méthodes d'ACV afin de comparer la différence entre l'usage étudié et l'état de la parcelle à l'origine. Afin d'évaluer quel état de référence est le plus pertinent, on compare cette option de base à d'autres options, comme les valeurs RMQS.

Lorsqu'un paramètre varie, tous les autres paramètres sont définis selon l'option de base. Par exemple, si l'on fait varier l'objet d'analyse « répartition temporelle des impacts de transformation» et que l'on teste l'option n°1 « Amortissement dégressif sur 20 ans » tous les autres objets d'analyse auront pour option celle en gras dans le tableau soit leur option de base respective.

À travers les cas d'étude, nous avons testé l'influence de plusieurs paramètres, propres à certaines méthodes ou appliqués pour toutes, afin de déterminer les paramètres les plus sensibles devant faire l'objet d'une recherche de données spécifiques ou de futurs développements. Par ailleurs, l'importance de la sensibilité de certains paramètres mise au regard de la disponibilité de données idoines donne une information supplémentaire sur la pertinence d'une méthode et l'intérêt de sa mise en œuvre ou de son amélioration. Les tests sont déclinés par filière (Tableau 12& Tableau 13).

2.9.2.1. Source de données pour l'évaluation des stocks carbone des usages étudiés

En option de base, c'est la méthode IPCC tier 1 qui a été appliquée sur chacun des cas d'études (cf 5 Fiche thématique - Application de la méthode IPCC tier 1 pour déterminer les stocks de carbone du sol de différents usages : limites perçues et questions posées, pour les trois méthodes retenues pour plus de détail quant à sa mise en œuvre). Il s'agit en effet de la seule méthode applicable sur l'ensemble de ces cas d'études.

Les trois méthodes ont également mises en œuvre en considérant la valeur obtenue avec la méthode IPCC tier 1, augmentée de 10%, afin d'évaluer la sensibilité des méthodes à la valeur utilisée.

Par ailleurs, des méthodes plus fines (données bibliographiques, modélisation) ont été identifiées pour chacun des cas d'étude et utilisées.

2.9.2.2. Dynamique de l'évolution des stocks de carbone suite à un changement de pratique ou de transformation

Cette information est nécessaire uniquement pour l'ACV dynamique. Différents modèles et approches ont été mis en œuvre pour estimer ces dynamiques. Ceux-ci sont exposés plus en détails dans la partie Fiche thématique – Obtention de dynamiques d'évolution de stock de carbone du sol.

2.9.2.3. Répartition temporelle impacts transformation

La méthode IPCC propose d'allouer linéairement les impacts sur le laps de temps de la transition de l'ancien au nouvel usage, en proposant également d'utiliser une valeur par défaut de 20 ans. L'ILCD recommande d'utiliser une méthode dégressive (D) sur 20 ans ou sur une autre durée, correspondant au temps nécessaire pour atteindre 90 % de la variation théorique de stocks de carbone des sols.
Pour chacune des trois méthodes, ont été comparés les résultats obtenus pour quatre choix de répartitions temporelle des impacts de transformation : linéaire uniforme sur 20 ans (recommandation par défaut de l'IPCC, utilisée comme option de base), linéaire dégressif sur 20 ans (recommandation par défaut de l'ILCD), linéaire uniforme sur une période dépendant de la dynamique d'évolution des stocks, ou linéaire dégressif sur cette même période (recommandation avancée de l'ILCD).

2.9.2.4. Données d'entrée spécifiques à MW&B

Seule la méthode MW&B nécessite un **état de référence**, qui permet d'évaluer les impacts transformation et occupation. Muller-Wenk & Brandao (2010) utilise comme référence une végétation naturelle potentielle, c'est-à-dire la végétation qui s'installerait théoriquement sans contrôle de l'Homme. Différents états de référence ont été identifiés afin de vérifier l'applicabilité de la méthode pour chacun d'eux et leur pertinence :

- Végétation naturelle de référence (option de base) : lorsque plusieurs types de végétation naturelle ont été identifiés dans la littérature, ils ont également été comparés. Leur stock de carbone a été estimé par la méthode IPCC tier 1.
- Usage correspondant à l'usage étudié : le stock de carbone médian tout usage confondu dans la région du cas d'étude a été estimé à partir d'une extraction de la base de données RMQS pour les cas d'étude métropolitains. Pour les cas d'étude tropicaux, cette option n'a pu être mise en œuvre faute de donnée.
- Usage étudié avec un stock maximal pour la région du cas d'étude : le stock de carbone du 3° quartile pour l'usage étudié dans la région du cas d'étude a été estimé à partir d'une extraction de la base de données RMQS pour les cas d'étude métropolitains. Pour les cas d'étude tropicaux, cette option n'a pu être mise en œuvre faute de donnée.
- Sol artificialisé : un stock de carbone nul a été considéré (Mila i Canals, 2007).

Pour chacun de ces cas d'étude, le **temps de régénération** est issu de la bibliographie. Une analyse de sensibilité à cette donnée d'entrée a été conduite, en comparant les résultats obtenus en utilisant la valeur issue de la bibliographie et la même valeur augmentée de 10%

2.9.2.5. Source de données pour identifier les transformations

Trois options ont été mises en œuvre :

- Changement d'occupation considéré dans le cas d'étude.
- Changement d'occupation estimé par Blonk Consultants, 2013 par culture et par pays sur la base de données statistiques de la FAO.
- Changement d'occupation estimé selon une méthode en cours d'élaboration par le CITEPA (Sampère J., 2017). Ces changements ont été estimés sur la base des données Corine Land Cover corrigées par des données statistiques régionales.

2.9.2.6. Source de données pour déterminer le ratio C/N

Le ratio C/N est nécessaire pour estimer les émissions de N_2O induit par un destockage de carbone du sol induit par un changement de pratique ou d'occupation. Trois options ont été retenues :

- Le ratio C/N proposé par défaut par l'IPCC.
- Le ratio C/N proposé par défaut par l'IPCC, augmenté de 10% pour évaluer la sensibilité des résultats des méthodes à cette donnée.
- Si disponible, une donnée spécifique au cas d'étude.

Tableau 13 : Objets d'analyses/paramètres testés par filière

	Grandes cultures	Elevage	Vigne	Canne à sucre	Soja
Source de données pour l'évaluation des stocks carbone des usages étudiés	- IPCC, tier 1 - Estimation par l'outil AMG-ARVALIS (sol) sur horizon de 100 ans	- IPCC, tier 1 (sol et biomasse) - estimation par le modèle Simeos-AMG (sol) pour les cultures + données littérature pour prairies - équation IPCC enrichie (Tuomisto et al., 2015)	- IPCC, tier 1 (sol et biomasse) - estimation par le modèle Siméos-AMG (sol) - littérature disponible (biomasse)	- IPCC, tier 1 (sol et biomasse) - Littérature disponible (sol) - Estimation par le modèle CENTURY (sol) pour un scénario seulement	- IPCC Tier 1 (sol et biomasse) - Données expérimentales disponibles dans la littérature
Dynamique de stockage / destockage de carbone suite à un changement d'usage ou de pratique	Estimation par l'outil AMG-ARVALIS (sol) sur horizon de 100 ans	- estimation par le modèle Simeos-AMG à 100 ans	- estimation par le modèle Siméos-AMG - estimation par le modèle Roth-C (pour le cas des changements d'usage), - combinaison de l'usage des 2 modèles (cf. fiche sur l'usage des modèles)	- Estimation par le modèle CENTURY pour un scénario seulement	- Utilisation de résultats de la littérature, issus du modèle RothC, pour un scénario LUC - Exploitation de mesures expérimentales diachrones de la littérature, pour un scénario LMC - Pas de données satisfaisantes disponibles pour les autres scénarios (4 sur 6)
Identification de l'état de référence	- Etat dit « naturel » - Référence régionale moyenne (tous usages) - Référence régionale maximale par usage (Grandes cultures dont	- Etat dit « naturel » - Référence régionale moyenne (tous usages) - Référence régionale maximale par usage	- Etat dit « naturel » (2 possibilités : forêt méditerranéenne ou garrigue) - sol artificiel	- Etat dit « naturel », forêt IPCC par défaut - Hypothèse d'une forêt secondaire IPCC pour représenter le cerradão - Sol artificiel	- Etat dit « naturel » : forêt, selon IPCC - Etat dit « naturel » : savane arborée (*Cerrado*), selon l'Institut Brésilien de

	parcelles avec prairie temporaire (Grandes cultures dont parcelles avec prairie temporaire ; Prairie Permanente) - sol artificiel	(Grandes cultures dont parcelles avec prairie temporaire (Grandes cultures dont parcelles avec prairie temporaire ; Prairie Permanente) - sol artificiel			Géographie et de Statistique (IBGE) - Sol artificiel
Source de données pour l'évaluation du stock de carbone à l'équilibre pour l'état de référence (sol et biomasse)	- IPCC 2006 - RMQS (sol) + IPCC 2006 (biomasse) - RMQS (sol) + IPCC 2006(biomasse) - Mila I Canals, 2007	- IPCC 2006 - RMQS (sol) + IPCC 2006 (biomasse) - RMQS (sol) + IPCC 2006 (biomasse)	- IPCC 2006 - RMQS (sol) + IPCC 2006 (biomasse)	- IPCC 2006	- IPCC 2006
Source de données pour l'évaluation du temps de régénération	- MW&B, 2010 - hypothèse : 20 ans - RMQS (sol) + IPCC (biomasse) - hypothèse de 0 et 0.5 an	- MW&B, 2010 - hypothèse de 0 et 0.5 an	- MW&B, 2010 - hypothèse de 0 et 0.5 an	- MW&B, 2010 - hypothèse de 0 et 0.5 an	- MW&B, 2010 - hypothèse de 0 et 0.5 an
Source de données pour identifier des changements d'usage des sols	- Blonk Consultants, 2013 - estimation CITEPA (non validée)	- Blonk Consultants, 2013 - estimation CITEPA (non validée)	- Blonk Consultants, 2013	- Hypothèses de changement direct - Blonk Consultants, 2013	- Hypothèses de changement direct - Blonk Consultants, 2013
Source de données pour identifier la valeur du rapport C/N du sol	IPCC 2006	IPCC 2006	IPCC 2006	- IPCC 2006 - Données de la littérature	- Valeur IPCC 2006 par défaut
Autres données d'inventaire de cycle de vie	Données d'entrée : données du dispositif PCQE Utilisation de la méthode Agribalyse 1.3	Inventaires Agribalyse 1.3	Inventaire Agribalyse 1.3 « vigne conduite en intégré en Languedoc Roussillon »	Inventaire Ecoinvent	Inventaire Agribalyse 1.3

3. Résultats

Code utilisé pour la nomenclature des cas d'étude

- Le nom du produit en anglais (éventuellement abrégé)
- Entre crochets, un abrégé du type de climat IPCC :
  TrW pour Tropical Wet, TrM pour Tropical Moist, CTp pour Cold Temperate, WTp pour Warm Temperate ..
- Les abrégés du précédent et de l'actuel séparés par un tiret,
  * Pour les usages :
  Fo pour forêt, Sa pour savanne, Gr pour prairie permanente (grassland), Cr pour culture (cropland), Pe pour pérennes, Sc pour garrigue (scrubland) ...
  * Pour les pratiques : Ti pour labour, NoTi pour non-labour, Burn pour résidus brulés, Exp pour résidus exportés, NoExp pour résidus laissés au champ, BaS pour sol nu (bare soil), CoS pour sol enherbé ("covered" soil par analogie avec BaS) ...
  -> cas particuliers :
  ** pour les cas Arvalis sans changement, donner juste un abrégé*
  ** pour les changements de pratiques impliquant plusieurs paramètres, ne garder que le plus "pertinent"*
- Entre parenthèses, le type de transformation : LUC ou LMC, voire NC pour les cas sans changement.

Exemples :
- pour notre scénario soja avec déforestation, dans le Nord du Mato Grosso : Soy [TrW]: Fo-Cr (LUC)
- pour notre scénario canne d'exportation des pailles, dans le Minas Gerais : SCane [TrM]: NoExp-Exp (LMC)

3.1. Analyse transversale par objet d'analyse

3.1.1. Comparaison générale des méthodes appliquées à des LUC et des LMC

Les résultats des cas d'étude obtenus avec les méthodes ILCD / IPCC et MW&B et les options par défaut pour chaque objet d'analyse (végétation naturelle pour la référence, IPCC tier 1 pour estimer les stocks de carbone à l'équilibre, amortissement linéaire sur 20 ans, non prise en compte des émissions de N_2O associées au déstockage de C du sol) sont présentés aux Figure 4 et Figure 5 pour, respectivement, les scénarios de changements d'usages des sols et de changements de pratiques.

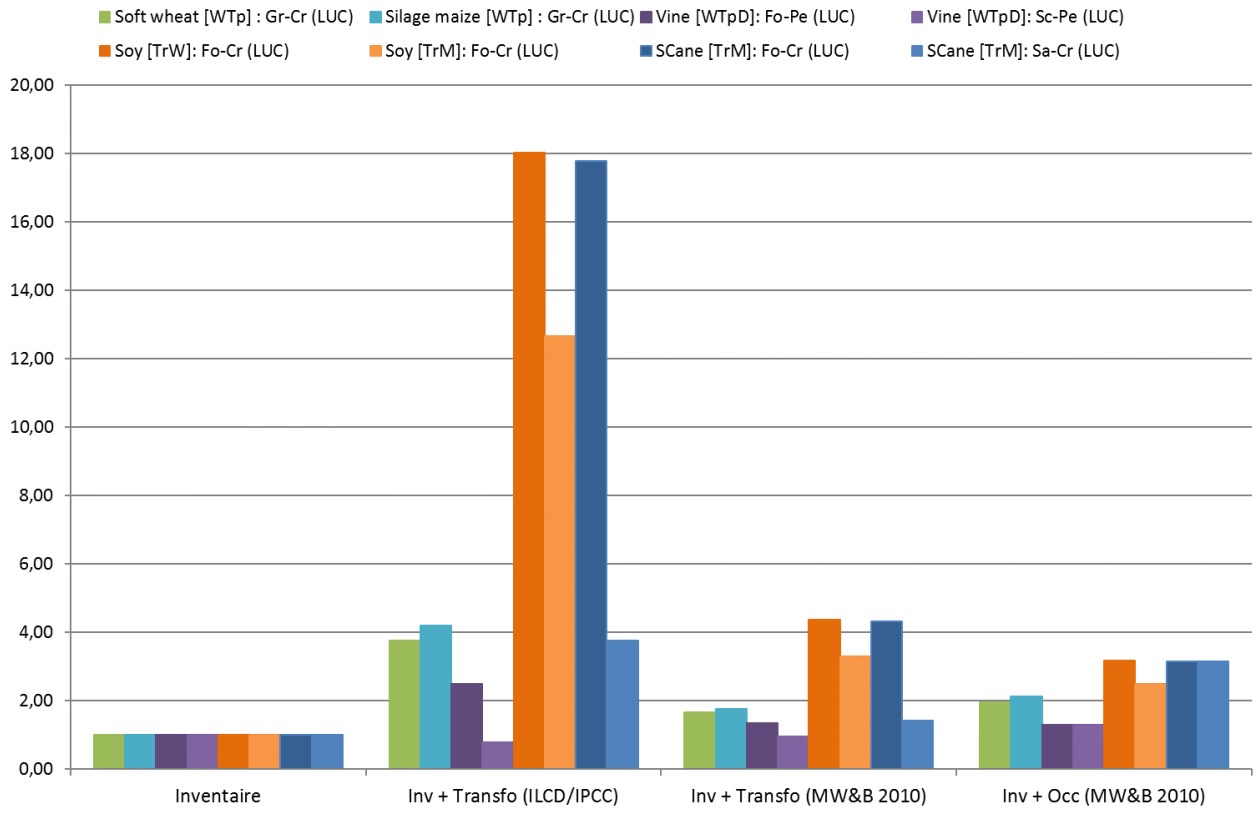


Figure 4 : Résultats des cas d'étude pour les scénarios de changements d'usages des sols, pour les méthodes ILCD / IPCC et MW&B

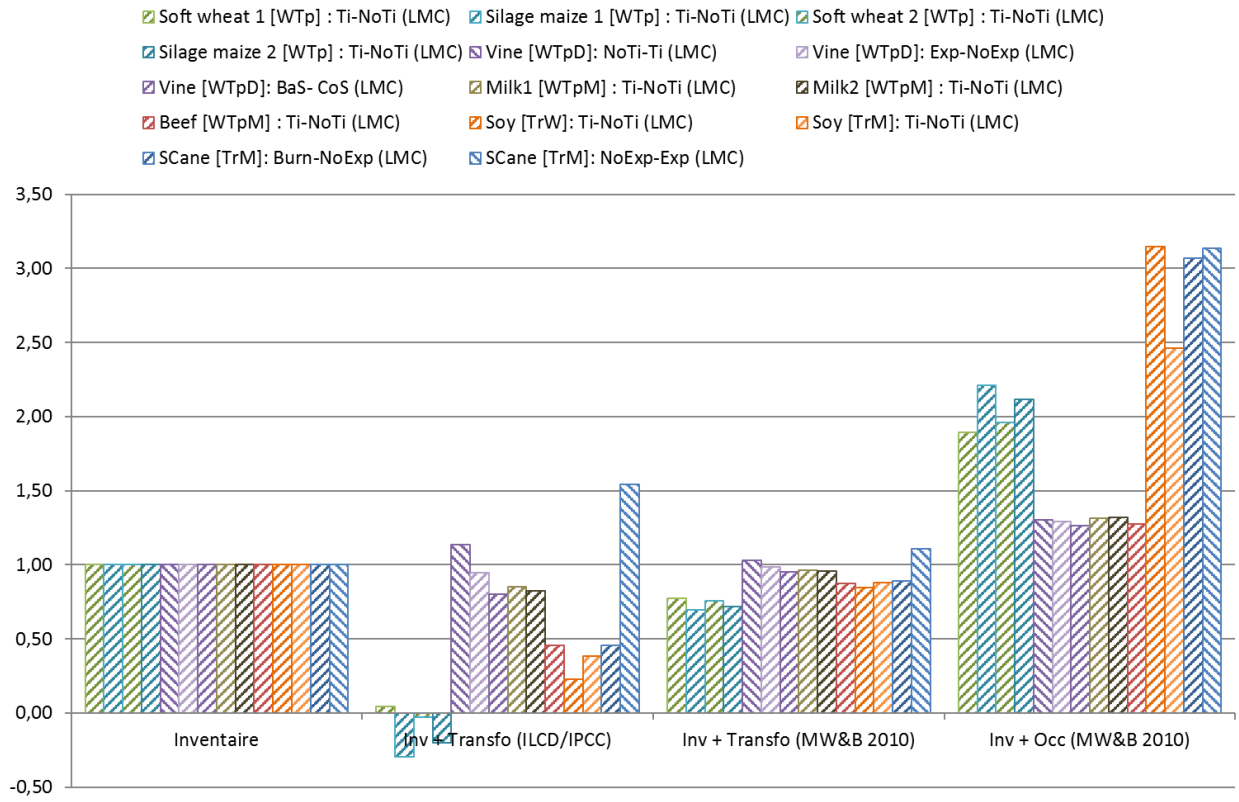


Figure 5 : Résultats des cas d'étude pour les scénarios de changements de pratiques, pour les méthodes ILCD / IPCC et MW&B

Les résultats montrent l'importance que peuvent avoir les impacts de transformation pour les résultats d'ACV, en particulier avec la méthode IPCC / ILCD. En effet, avec cette méthode, les impacts de transformation peuvent représenter une augmentation jusqu'à un facteur 18 des impacts de l'inventaire dans le cas de changements d'usages (scénarios de déforestation sur canne ou soja au Brésil), ou une réduction jusqu'à 130 % dans le cas de changements de pratiques (passage au scénario avec couvert, fertilisation organique et non-labour sur maïs fourrage). Avec la méthode MW&B, ces impacts ou bénéfices sont plus réduits que ceux obtenus avec la méthode ILCD / IPCC, d'un facteur variant généralement entre 3 et 6, mais restent significatifs par rapport à ceux de l'inventaire. Néanmoins, l'un des principaux aspects originaux de la méthode MW&B est d'introduire un impact d'occupation, qui s'applique à toutes les cultures, avec ou sans transformation. Pour les différents cas d'étude considérés dans le cadre du projet SOCLE, cet impact d'occupation représente une augmentation de 25 % à plus de 200 % selon les filières.

Concernant l'ACV dynamique, la même observation est faite que pour la méthode MW&B : les impacts ou bénéfices de transformation obtenus sont, en valeur absolue, plus faibles que ceux obtenus avec la méthode ILCD / IPCC. Ceci est illustré à la Figure 6[2]. Toutefois, selon les cas d'étude considérés, la réduction observée peut être négligeable lorsque l'essentiel de l'impact est lié à la biomasse aérienne, tel que dans le cas d'une déforestation en climat tropical (*Soy [TrW] : Fo-Cr (LUC)*), où la majeure partie de la perte de carbone intervient dès la première année lors de la disparition de la biomasse aérienne, ou atteindre 25 % dans le cas d'un changement de pratiques en climat tempéré (*Soft wheat 1 [WTp]: Ti-NoTi (LMC)*).

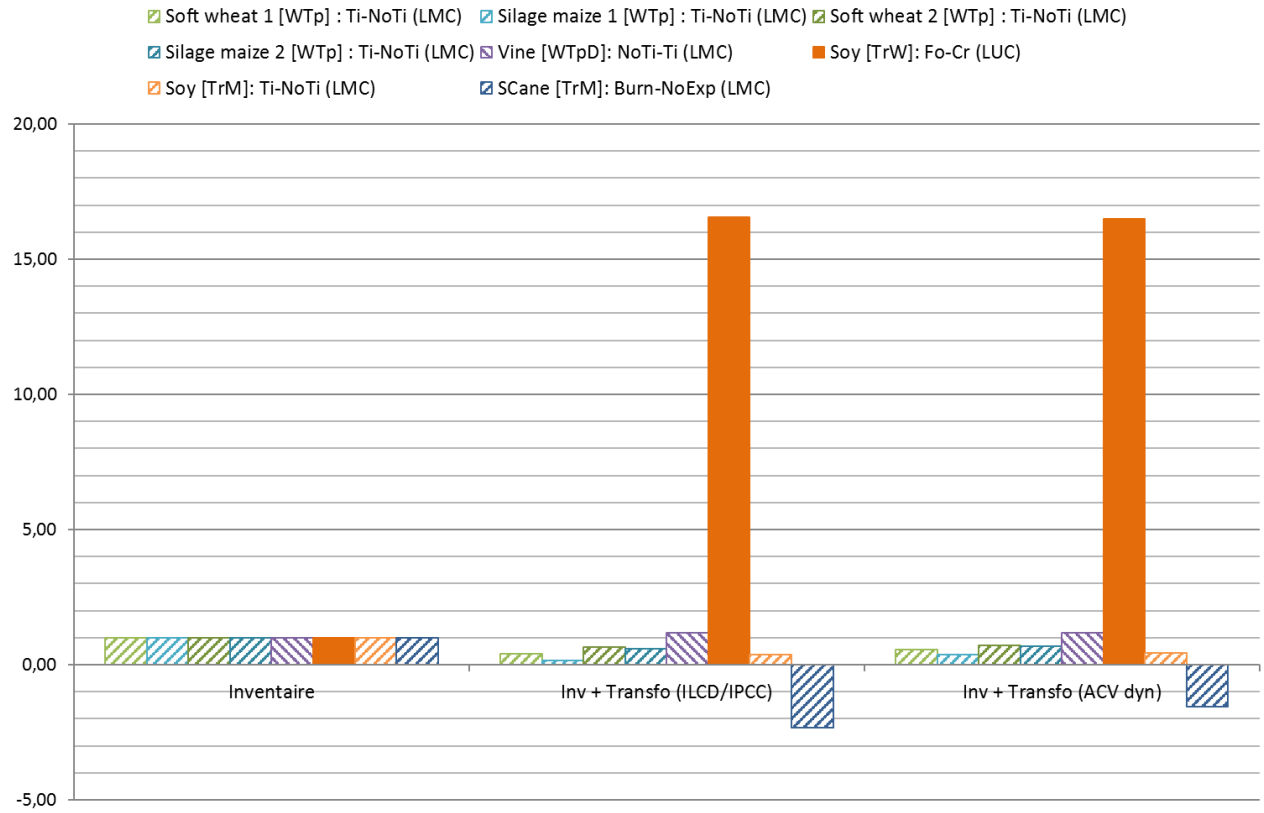


Figure 6 : Comparaison des résultats d'impacts de transformation obtenus avec la méthode ILCD / IPCC et l'ACV dynamique

[2] Afin de pouvoir comparer les méthodes ILCD / IPCC et ACV dynamique, les données spécifiques de stocks de carbone ont été utilisées pour les résultats présentés en Figure 6. Les résultats de la méthode ILCD / IPCC peuvent alors être différents entre les Figure 4 et Figure 5 d'une part, et la Figure 6 d'autre part, du fait de ce changement de source de données.

3.1.2.Répartition temporelle des impacts de transformation

Quatre choix de répartitions temporelle des impacts de transformation ont été testés : linéaire uniforme sur 20 ans (recommandation par défaut de l'IPCC), linéaire dégressif sur 20 ans (recommandation par défaut de l'ILCD), linéaire uniforme sur une période dépendant de la dynamique d'évolution des stocks, ou linéaire dégressif sur cette même période (recommandation avancée de l'ILCD).

Équation 4 : Calcul du pourcentage d'impact alloué à l'année n en dégressif linéaire pour une durée T en année (l'ILCD recommandant 20 ans par défaut)

$$Pourcent_n = (100*2)/(T+1)*(T-n)/T$$

Le résultat variant selon l'année d'étude choisie, le résultat présenté ci-dessous (Figure 7) est l'impact moyen du premier cycle de production :

- première année uniquement pour les cultures annuelles en monoculture (n=0 dans l'équation précédente),
- premier cycle de rotation (moyenne des pourcentages, pour n variant de 0 à la durée du cycle-1),
- premier cycle pérenne (même moyenne que pour les rotations).

Comme le montre la Figure 7 pour le blé tendre, l'effet relatif de ce choix est indépendant de la méthode d'évaluation des impacts, ILCD / IPCC ou MW&B.

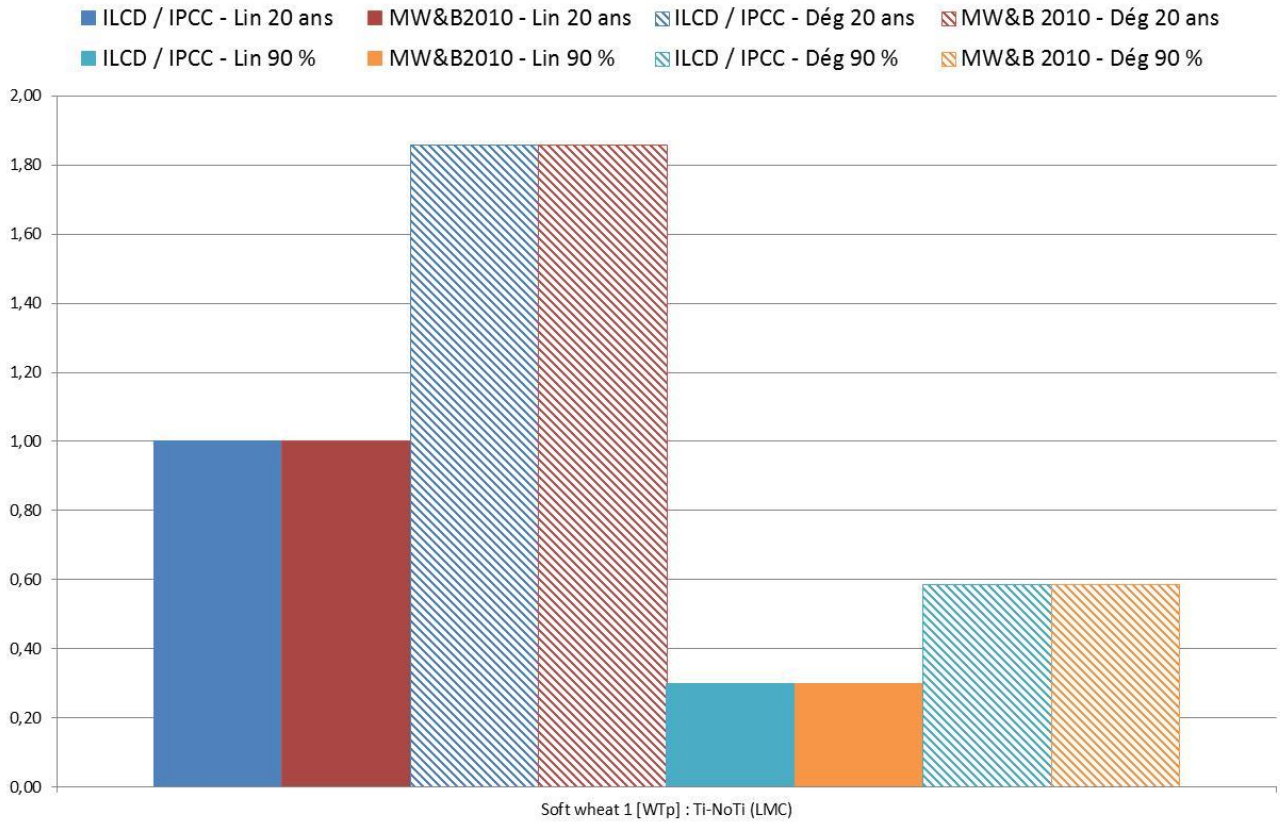


Figure 7 : Comparaison des effets relatifs du choix de la méthode de répartition temporelle des impacts de transformation - Exemple du scénario *Soft Wheat 1 [WTp] : Ti-NoTi (LMC)*

La Figure 8 présente alors l'effet relatif du choix du mode de répartition temporelle des impacts de transformation, pour la méthode ILCD / IPCC, pour l'ensemble des scénarios étudiés. Les résultats montrent qu'un mode dégressif de répartition temporelle peut augmenter l'impact attribué au produit étudié de 90 % pour les cultures annuelles. Inversement, celui-ci n'a pas d'effet sur les produits issus de cultures pérennes telles que la vigne, lorsque la durée de répartition est inférieure au cycle de culture (32 ans selon les hypothèses retenues pour la vigne).

Lorsque la durée de répartition est modifiée afin de mieux représenter la dynamique d'évolution du carbone (durée correspondant à l'atteinte de 90% de la variation de stock, en linéaire ou dégressif), les impacts sont généralement plus faibles qu'avec la durée de 20 ans par défaut. Cette durée de 20 ans est donc généralement sous-estimée. Les seules exceptions notables des cas d'étude considérés sont les systèmes d'élevage au sein desquels les prairies subissent une transformation : Milk2, incluant une culture de prairie temporaire resemée et Beef, incluant une prairie temporaire avec changement de pratiques. Dans ces cas, la dynamique de variation de stock de carbone sous prairie n'a pas pu être estimée avec des outils de modélisation, tels que cela a été fait pour les surfaces en culture avec Simeos-AMG. En l'absence d'éléments sur cette dynamique dans la bibliographie et dans les modèles mobilisables dans le cadre du projet, nous avons considéré une accroissement du stock de 570 kg C/ha / an (Dollé et al. 2013, d'après Arrouays et al., 2002). Cette hypothèse forte présente des limites et amène à conclure que la durée d'amortissement de 20 ans est légèrement sur-estimée. En réalité, il faudrait disposer de travaux précisant la dynamique de stockage sous prairie pour affiner l'estimation.

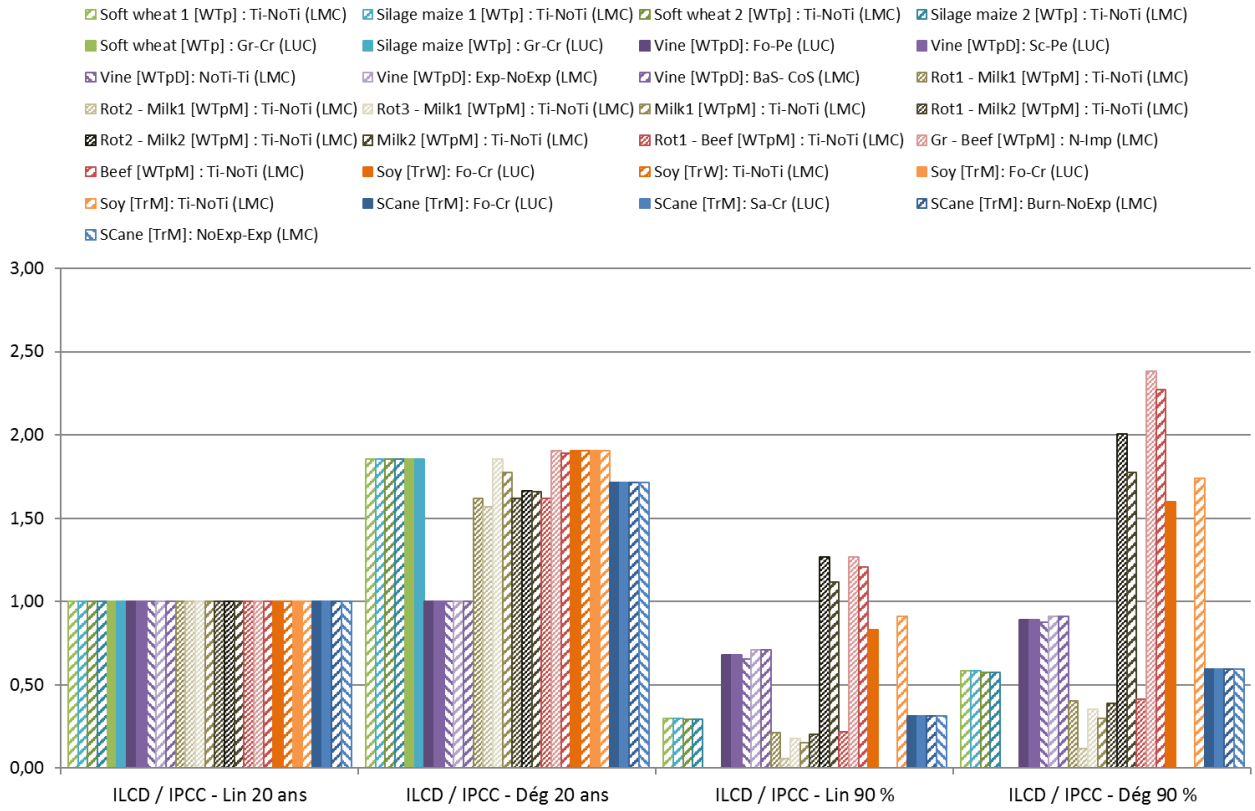


Figure 8 : Sensibilité des résultats des cas d'étude au mode de répartition temporelle des impacts de transformation, cas de l'impact de transformation selon la méthode ILCD/IPCC (Référence = répartition linéaire uniforme sur 20 ans)

3.1.3. Impacts évalués avec l'ACV dynamique : comparaison et sensibilité aux méthodes retenues pour estimer la dynamique de l'évolution des stocks de carbone suite à un changement

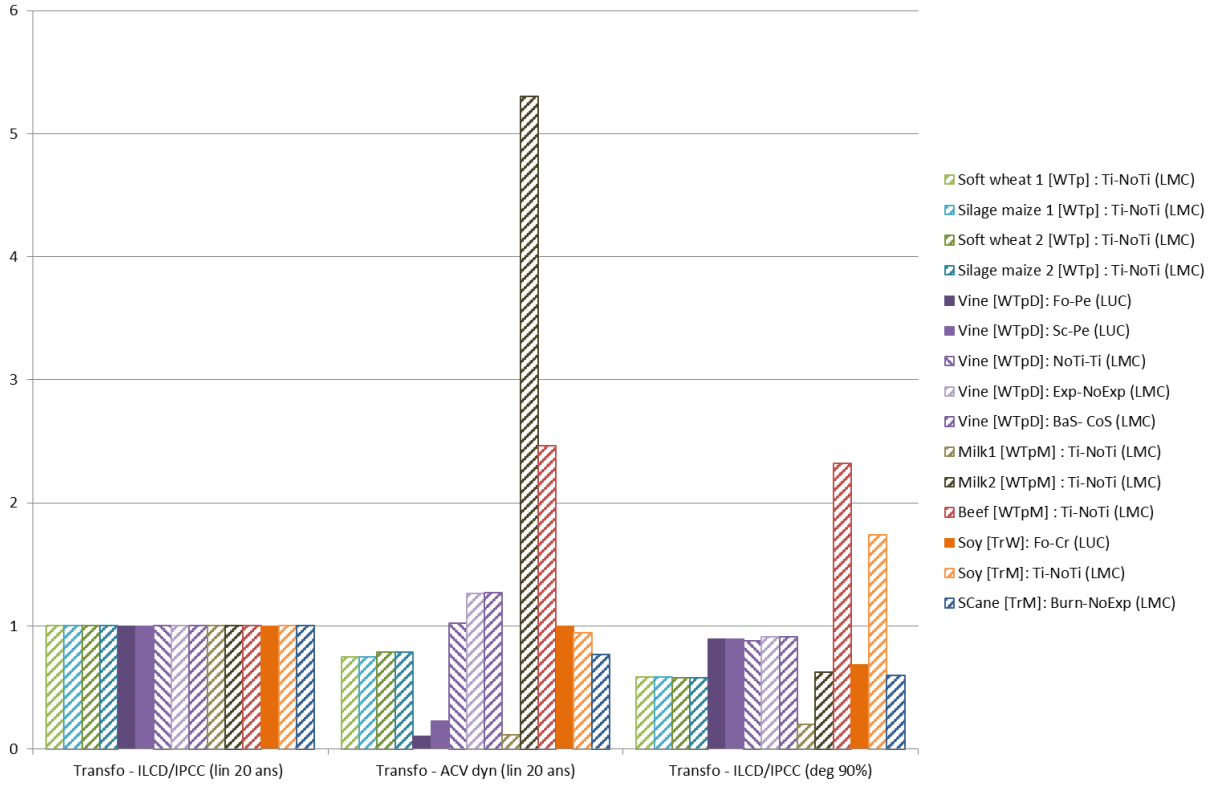


Figure 9 : Comparaison de l'impact transformation calculé avec la méthode IPCC/ILCD (base 1), la méthode d'ACV dynamique et la méthode IPCC/ILCD en répartissant l'impact sur 90% du temps nécessaire à l'obtention de l'équilibre de C du sol atteint à 100 ans.

La hiérarchisation des impacts de transformation évalués avec l'ACV dynamique (répartition linéaire sur 20 ans) se montrent assez similaires à celle obtenue avec la méthode IPCC/ILCD avec répartition sur 90% de la durée nécessaire à l'obtention du nouveau stock à l'équilibre (nommée durée D) (Figure 9). Ceci apparaît pour chacun des cas étudiés, si l'on excepte les cas « Milk2-Ti-NoTi », « Soja Ti-NoTi» et les cas de changement d'usage pour la vigne (« Vine Fo-Pe » et « Vine Sc-Pe ») (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Pour ces cas d'étude et plus particulièrement pour la vigne, l'impact évalué avec la méthode IPCC/ILCD réparti dégressivement sur D est beaucoup plus important que l'ACV dynamique (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Le cas du système laitier Milk2 est composé de 2 rotations différentes, dont une de prairie temporaire ressemée où la dynamique de stockage de C est très rapide (D=16 ans) alors que dans Milk1 D est compris entre 95 ans et 340 ans, ce qui peut expliquer les écarts importants par rapport à ILCD et comparativement aux autres cas d'étude (y compris élevage). En effet avec l'ACV dynamique une dynamique forte dans les premières années aura plus d'impact qu'une dynamique répartie sur un temps plus long. Concernant le soja et la vigne, la raison est la même sauf qu'au lieu d'avoir une dynamique de stockage rapide nous avons dans ces cas des dynamique de déstockage rapide avec des durées D respectives de 22 ans et 45 ans. Pour les autres cas étudiés, l'impact de transformation ILCD/IPCC réparti sur D est toujours inférieur à celui évalué avec l'ACV dynamique.

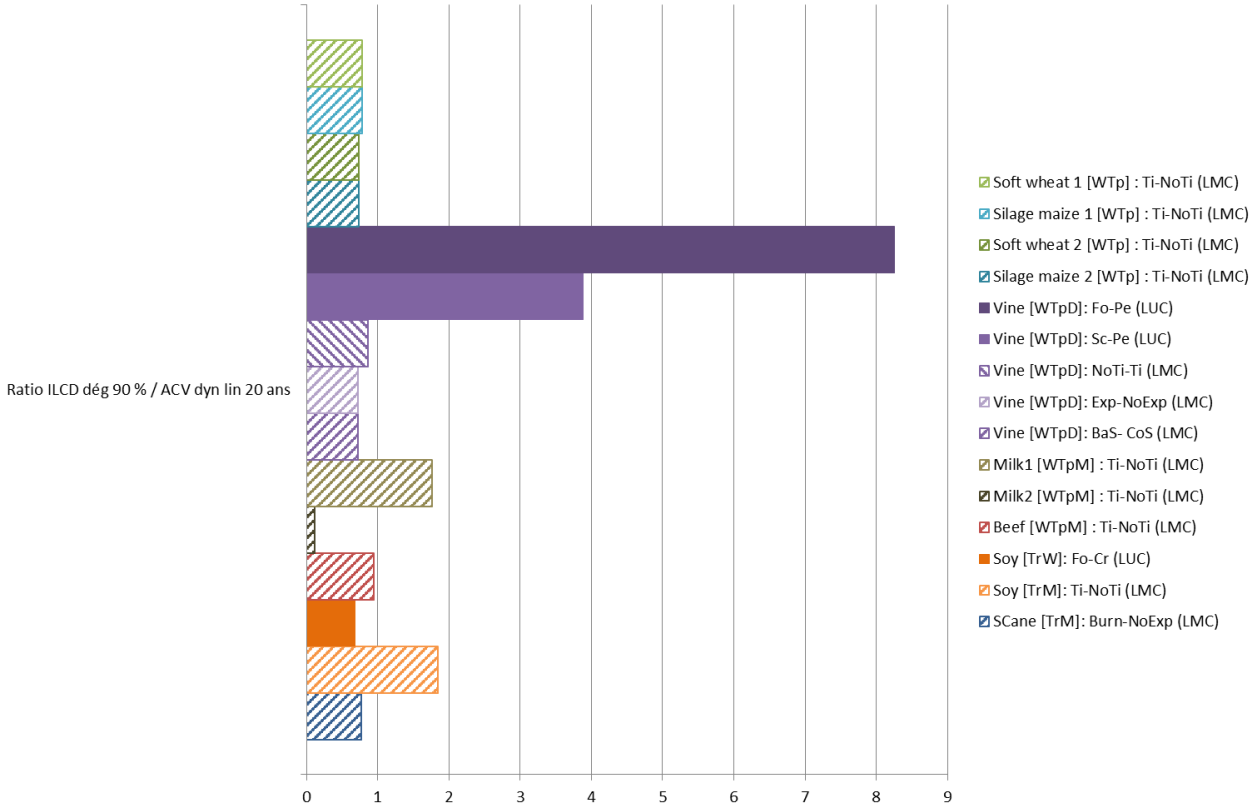


Figure 10 : Rapport entre les impacts transformation calculés par la méthode IPCC/ILCD répartis dégressivement sur 90 % de D et avec la méthode ACV dynamique.

L'analyse de sensibilité aux modèles utilisés pour définir la dynamique de C a été effectuée sur 2 cas d'étude : le soja et la vigne (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Pour le soja, 2 types de dynamiques issues du modèle Hénin-Dupuis calibré sur des données expérimentales publiées ont été définies (cf. fiche sur les dynamiques). Pour la vigne, le modèle Roth-C a été utilisé comme une alternative au modèle AMG (cf. fiche sur les dynamiques) : la dynamique et l'impact calculé par l'ACV dynamique changent peu entre les 2 modèles d'évolution du stock de C. Mais pour le soja un écart de 20% environ est observé entre les impacts issus des 2 dynamiques recalculées à partir des mêmes données expérimentales issues de la littérature (cf. fiche sur les dynamiques de C).
Concernant les grandes cultures, deux simulations ont été conduites : (1) en prenant en compte les itinéraires techniques réellement pratiquées sur une vingtaine d'années (Soft wheat 1 [WTp] : Ti-NoTi (LMC) et Silage maize 1 [WTp] : Ti-NoTi (LMC)), (2) en moyennant les pratiques (Soft wheat 2 [WTp] : Ti-NoTi (LMC) et Silage maize 2 [WTp] : Ti-NoTi (LMC)), ce qui est souvent réalisé lorsqu'il n'est pas possible de collecter les données réelles. L'impact de la transformation est plus faible avec l'approche (2) que l'approche (1) que ce soit avec la méthode IPCC à partir de données spécifiques ou avec la méthode ACV dynamique (60% de l'impact de transformation obtenu avec l'approche (1).

Concernant la mise en œuvre pratique de l'ACV dynamique, on sous-estimera les impacts évalués par cette méthode en utilisant IPCC/ILCD réparti à 90% de la durée D. Cette option peut être considérée comme une alternative plus aisée à mettre en œuvre de cette méthode qui permette de prendre en compte la dégressivité de l'impact des émissions/émissions évitées dans le temps. Cependant, les deux approches nécessitent, en amont, de disposer d'une dynamique de C, donc de données issues de modélisation ou de données expérimentales que l'on aura soin, au préalable de travailler pour les rendre cohérentes et pertinentes (cf. fiches dédiées 'utilisation de données expérimentales' d'une part et 'obtention de dynamiques' d'autre part). Concernant les cultures pérennes, une attention particulière sera apportée à la définition des durées des différentes phases du cycle et de la durée de vie pour répartir les impacts.

L'impact de la destruction de la culture par combustion des ceps ici (ou des souches par exemple) n'a pas été pris en compte dans l'ACV dynamique.

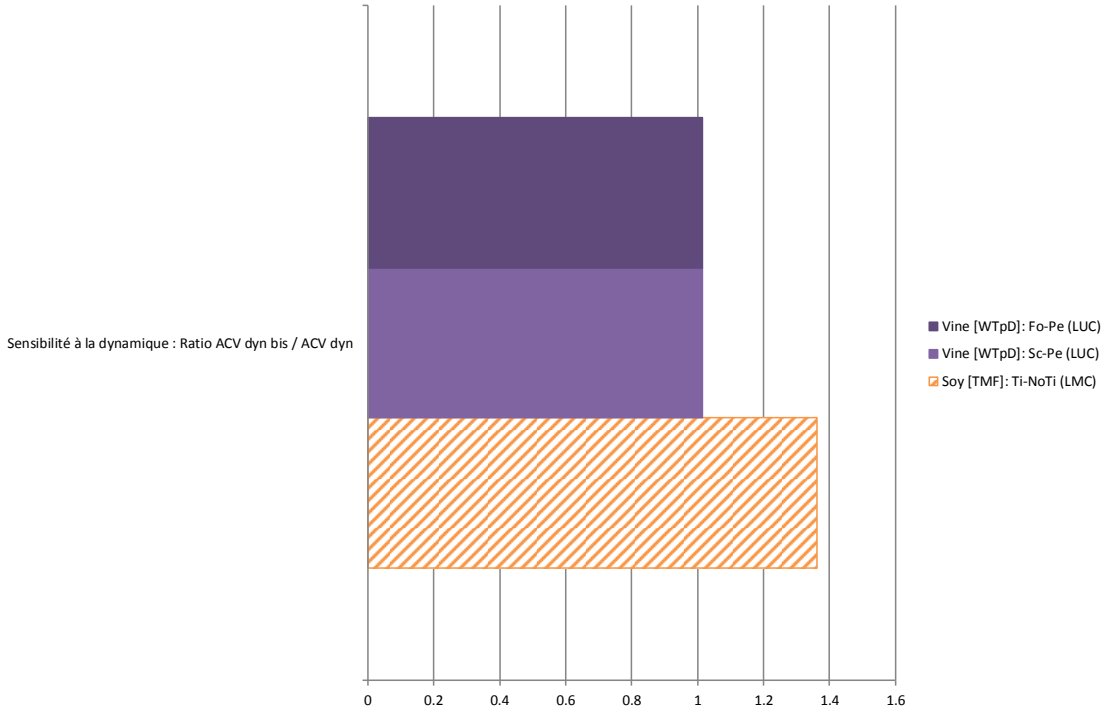


Figure 11 : Sensibilité à la dynamique de C de l'impact transformation : ratio entre l'impact calculé avec une dynamique alternative de C et celle issue des modèles pour la vigne et le soja.

3.1.4. Sensibilité sur les données d'entrée

La sensibilité des résultats des deux méthodes IPCC et Muller-Wenk & Brandao (MW&B), 2010, a été testée en faisant varier deux paramètres d'entrée :

- Les stocks de carbone des sols ; et
- Les temps de régénération.

3.1.4.1. Source de données pour l'évaluation des stocks carbone des usages étudiés

L'option de base retenue pour évaluer le stock de C du sol est la méthode IPCC. Dans les représentations graphiques ci-dessous, les résultats obtenus avec cette option sont ramenés à 1, et comparés avec les autres options : évaluations spécifiques, variation de +10% de la valeur de base pour le précédent, variation de +10% de la valeur de base pour l'occupation actuelle.

Pour les impacts de la transformation, qu'ils soient évalués par IPCC ou MW&B, la valeur de stocks de C des sols est un paramètre qui fait varier très sensiblement le résultat : de presque +8 à -7 en fonction des cas.

De manière générale, la variation est plus importante pour les cas de changements de pratique (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) que pour les cas de changements d'occupation (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). En effet, les différences de stocks rencontrées dans le cas de changements de pratiques sont plus faibles que celles dans le cas de changements d'usages, ce qui rend cette différence plus sensible à la variation d'un stock en particulier.

Le cas particulier de la vigne, tient au fait que la valeur de stock proposée par IPCC est très faible par rapport aux valeurs de la bibliographie (voir Fiche Thématique IPCC).

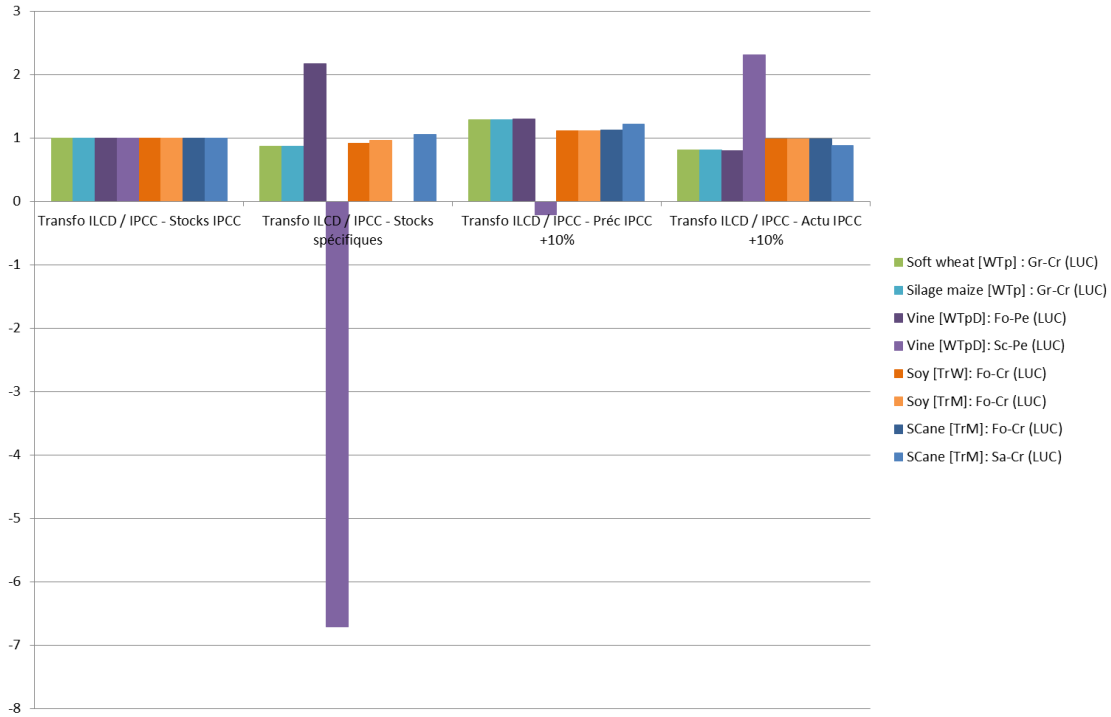


Figure 12 : Sensibilité de l'impact transformation (valable pour IPCC et MW&B) aux données d'entrée pour l'évaluation des stocks de carbone, dans les cas de changement d'occupation

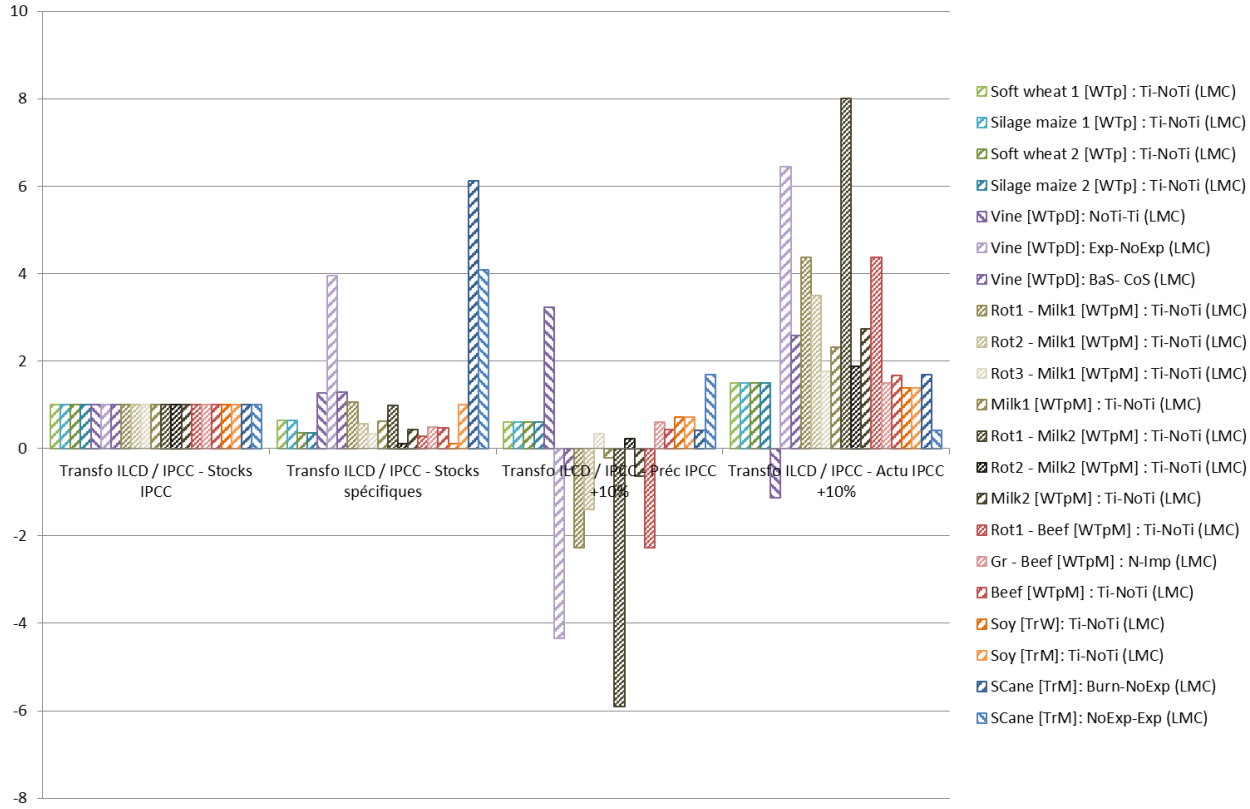


Figure 13 : Sensibilité de l'impact transformation (valable pour IPCC et MW&B) aux données d'entrée pour l'évaluation des stocks de carbone, dans les cas de changement de pratiques

Dans les cas d'élevage, combinant différentes occupations, dont des prairies permanentes et des rotations intégrant des cultures et des prairies temporaires, une autre option a été testée comparativement à l'option de base IPCC. Les équations de Tuomisto et al. (2015) proposent, sur la base des équations IPCC, d'intégrer des facteurs supplémentaires en fonction du management des prairies permanentes et temporaires. Ces données de stock (« IPCC prairie » dans la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) apportent de la variabilité sur les résultats d'impact transformation : les impacts les plus forts correspondent aux rotations avec prairies temporaires, le plus faible correspond à la prairie permanente qui passe de gestion nominale à améliorer. Les histogrammes avec hachures sont les résultantes à l'échelle des systèmes d'élevage complets, intégrant l'ensemble des occupations.

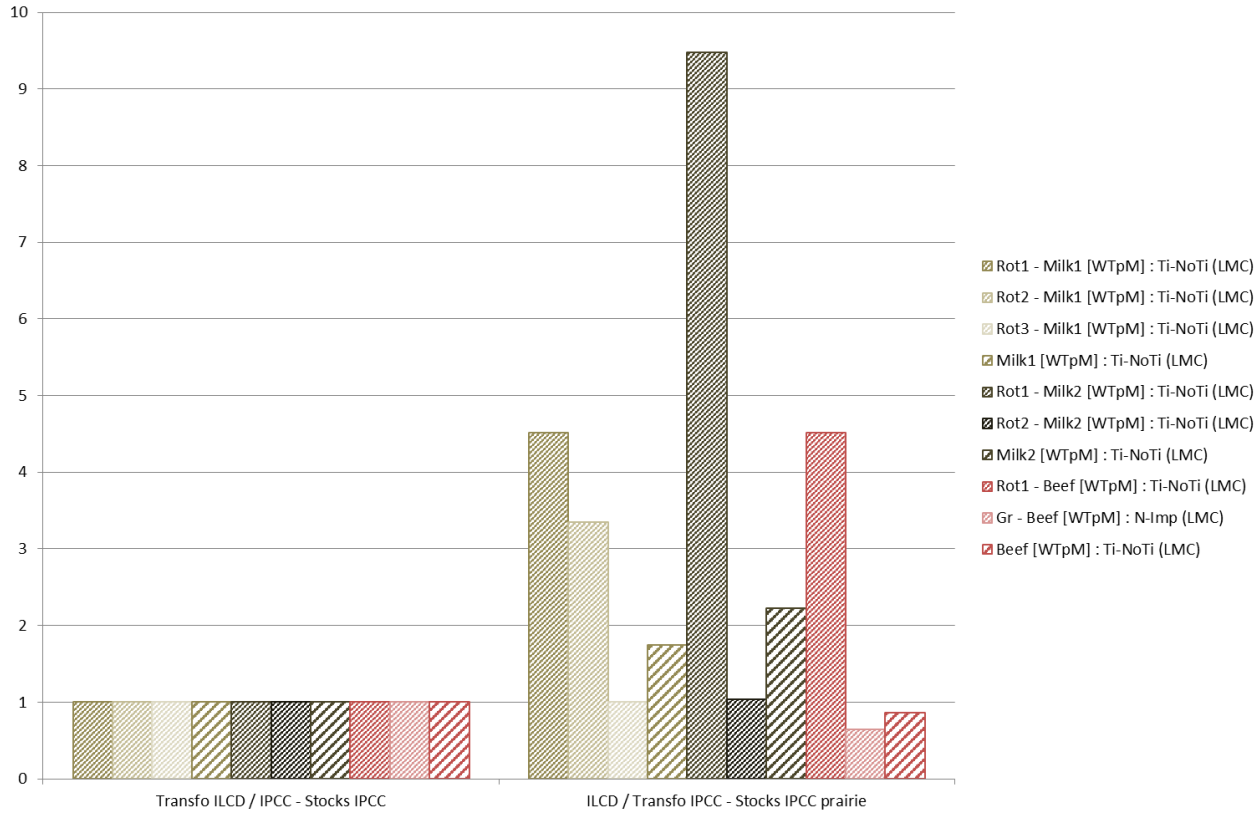


Figure 14 : Sensibilité de l'impact transformation (valable pour IPCC et MW&B) aux données d'entrée pour l'évaluation des stocks de carbone, dans les cas de changement de pratiques pour les occupations impliquant de la prairie (cas élevage)

La sensibilité aux données de stocks de C du sol est également valable pour l'impact occupation (uniquement avec la méthode MW&B 2010). Les résultats varient (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), de manière plus sensible pour la vigne et pour les prairies.

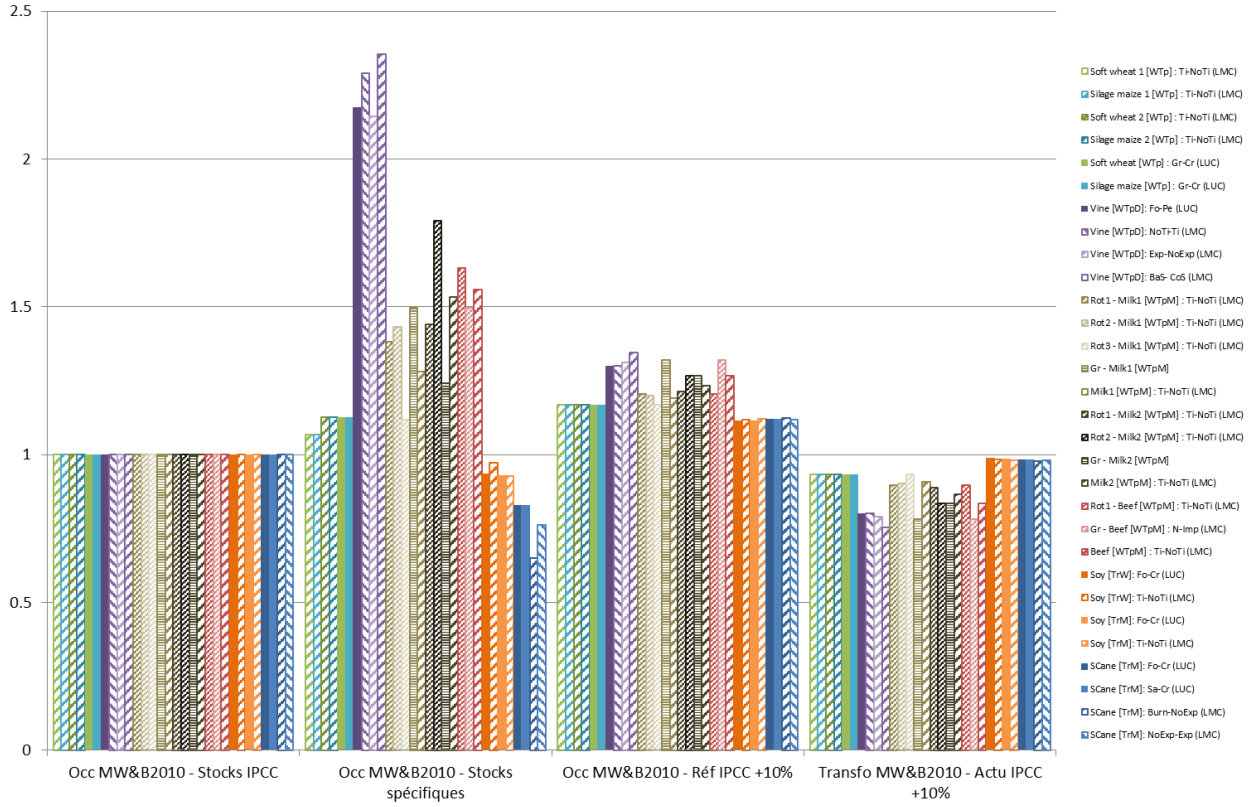


Figure 15 : Sensibilité de l'impact occupation (MW&B) aux données d'entrée pour l'évaluation des stocks de carbone, dans les cas de changement d'occupation et de pratiques

3.1.4.2. Source de données pour l'évaluation du temps de régénération

Pour l'impact transformation de la méthode MW&B, la sensibilité au temps de régénération vers l'usage de référence a également été testée.

L'option de base retenue est la valeur proposée par Müller-Wenk & Brandão, 2010. Dans les représentations graphiques ci-dessous, les résultats obtenus avec cette option sont ramenés à 1, et comparés avec les autres options : variation de +10% de la valeur de base pour le précédent, variation de +10% de la valeur de base pour l'occupation actuelle.

Il apparait que les résultats varient ici de manière aussi sensible que pour le paramètre stock de C du sol : de +7,3 à -5,2 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Ce choix du temps de régénération est une notion et une quantification assez arbitraire, qui a une grande influence sur les résultats. Toutefois, aussi arbitraire soit-elle, retenir celle proposée par Müller-Wenk & Brandão 2010 garantit une certaine homogénéité méthodologique entre les cas d'étude.

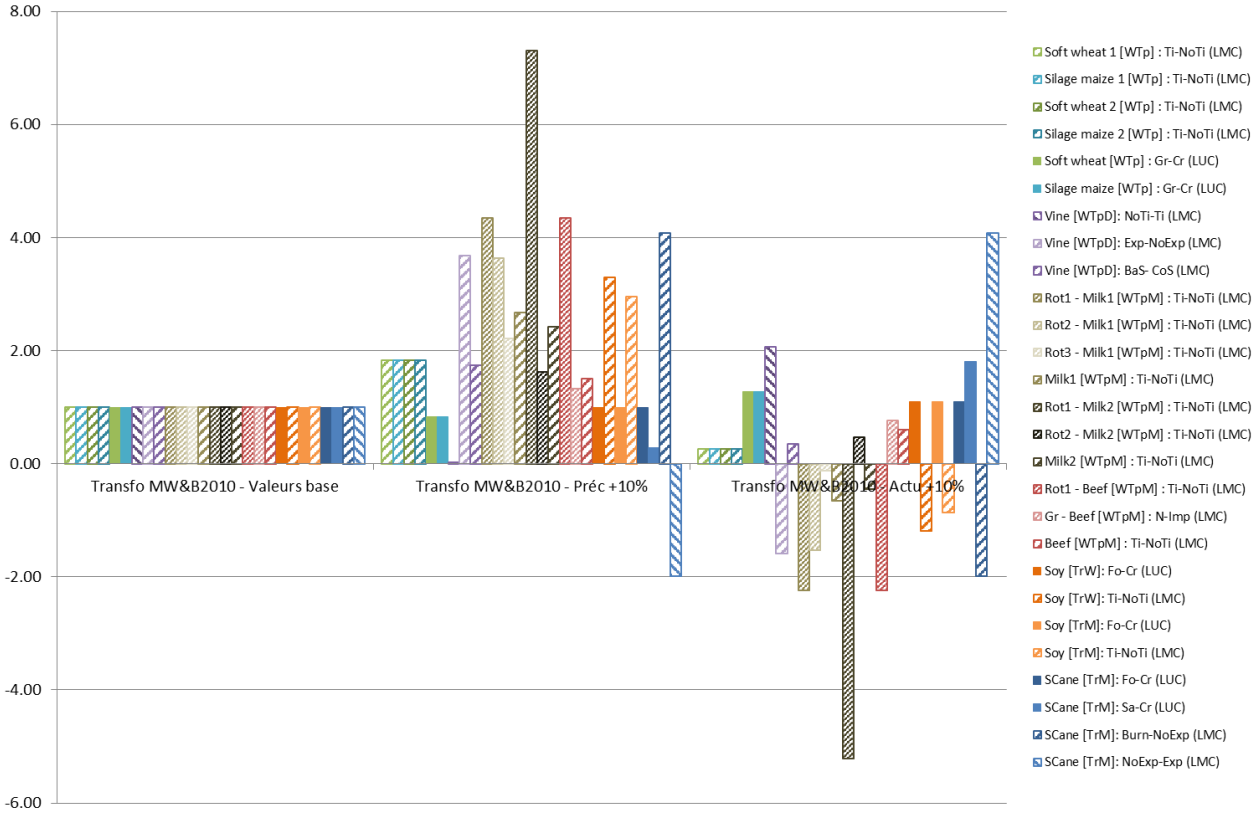


Figure 16 : Sensibilité de l'impact transformation (MW&B) aux données d'entrée pour l'évaluation des temps de régénération, dans les cas de changement d'occupation et de pratiques

3.1.5.Sensibilité au choix de l'état référence

Seule la méthode la méthode MW&B nécessite de définir un état de référence. Müller-Wenk & Brandão, 2010 utilise comme référence une végétation naturelle potentielle, c'est-à-dire la végétation qui s'installerait théoriquement sans contrôle de l'Homme. Ce choix présente différentes limites :

- il risque d'induire un impact occupation masquant l'impact transformation et donc les améliorations de pratiques,
- dans un grand nombre de situations, le retour à ce type d'état est peu réaliste.

Le choix d'une référence plutôt qu'une autre est dépendant des objectifs de l'étude. Dans le cadre des travaux conduits pour SOCLE, il s'agit de de vérifier l'applicabilité de la méthode pour différents états de référence et d'évaluer leur pertinence. Toutes les options retenues n'ont pu être mises en œuvre sur l'ensemble des cas d'étude.

Les résultats des impacts transformation et occupation ci-dessous sont exprimés en relatif par rapport aux résultats de l'inventaire.

Pour certains cas d'étude, les résultats ont été comparés pour différents types de végétations naturelles identifiées dans la bibliographie (cas VNP « autre » dans la Figure 17) :

- vigne : forêt méditerranéenne / garrigue,
- soja : forêt / cerrado,
- canne à sucre : forêt / savane.

Les résultats des impacts de transformation et plus particulièrement des impacts d'occupation varient très fortement en fonction du type de végétation retenu. Cependant la hiérarchie entre les différents scénarios restent la même sur ces différents cas d'étude.

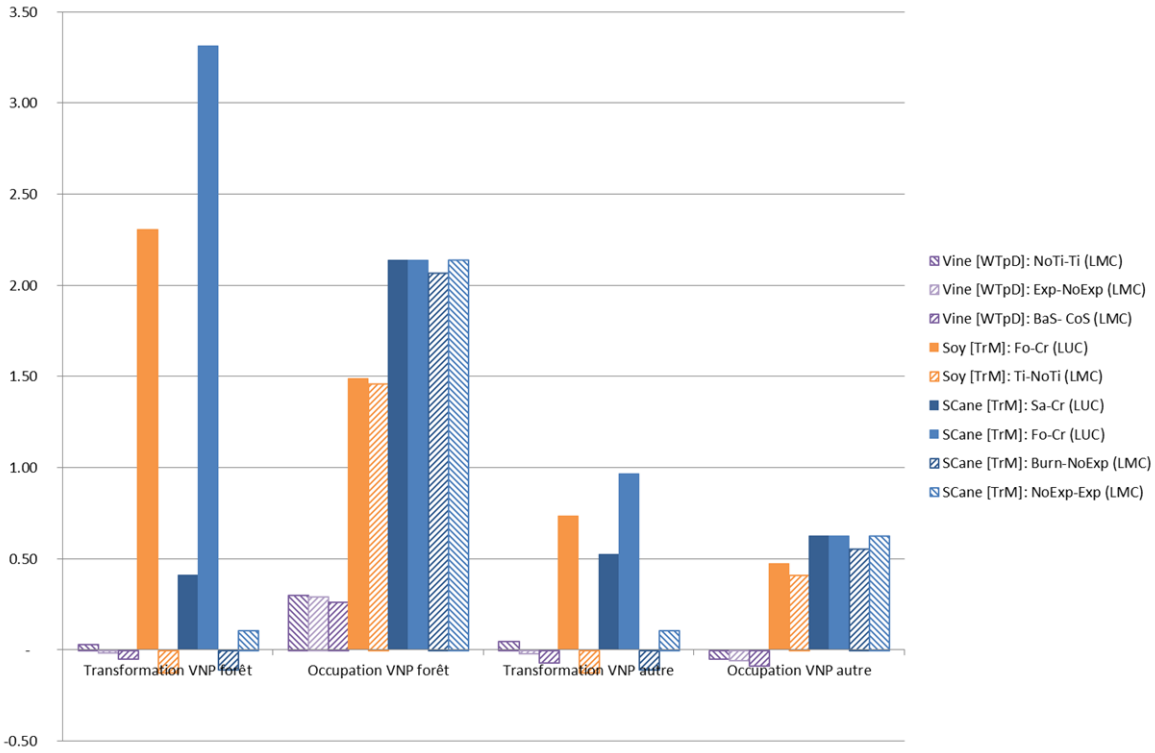


Figure 17 : Sensibilité des impacts occupation et transformation MW&B obtenus pour différentes hypothèses de végétation naturelle, en relatif par rapport aux résultats d'inventaire (hors flux de CO_2 du sol)

Une autre option consiste à considérer le stock de carbone maximal régional comme référence. Seuls pour les cas d'étude métropolitains ont pu être identifiés des sources pour estimer des stockages de carbone pour la région du cas d'étude. Ci-dessous sont comparés les résultats obtenus pour la référence forêt, la référence régionale médiane pour tout usage confondu, issue du RMQS, et la référence régionale du 3° quartile pour l'usage étudié, issu également du RMQS.

Le changement de la référence « forêt » à une référence régionale réduit globalement très fortement l'amplitude des impacts de transformation et d'occupation de la Figure 18.

Le passage du choix d'une référence régionale moyenne pour l'usage étudié, à celui d'une référence régionale maximale tous usages confondus, modifie également l'interprétation concernant le stockage / déstockage induit par une même pratique. Ainsi, pour les grandes cultures, le stock maximal régional pour l'usage considéré est plus faible que celui estimé avec la méthode IPCC tier 1 sur les cas étudiés. Par conséquent, les impacts d'occupation sont négatifs. C'est également ce qui a été observé pour les cas d'étude lait et viande.

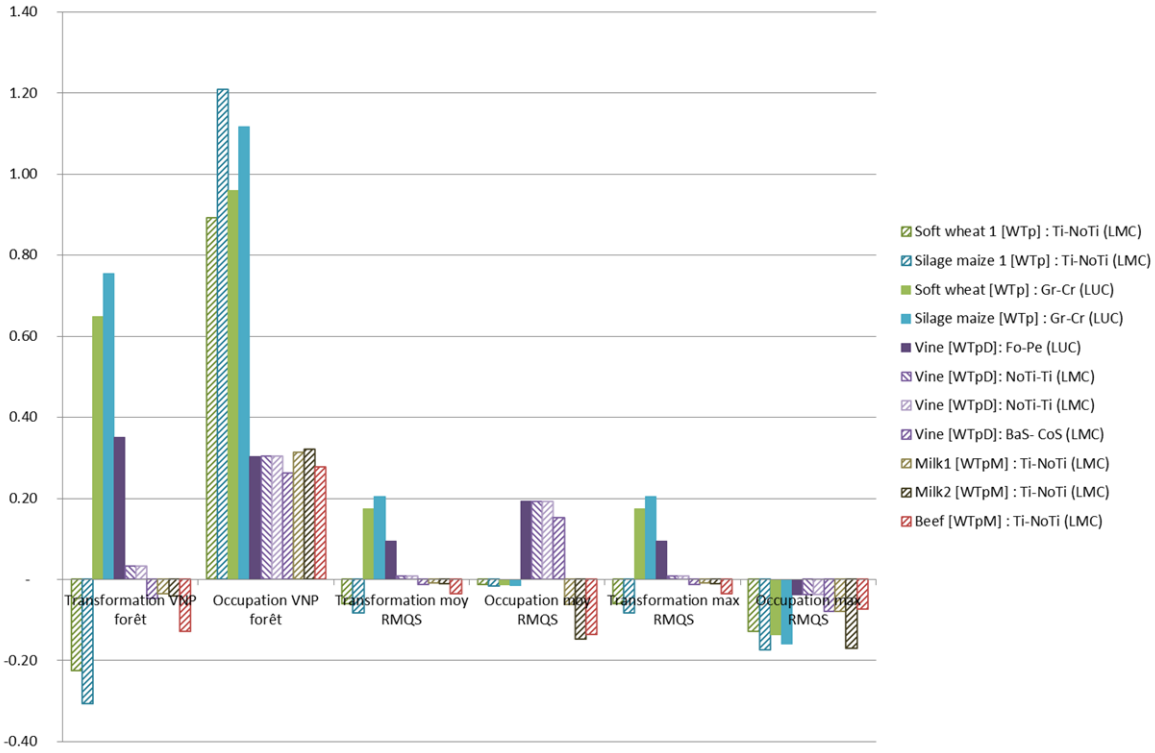


Figure 18 : Sensibilité des impacts occupation et transformation MW&B au choix de la référence, comparaison des résultats pour une référence forêt et des références régionales issues du RMQS

MW&B a également été mis en œuvre avec une référence sol artificiel, en considérant un temps de régénération de 0 an et de 0.5 an (Figure 19). Les impacts de transformation sont alors nuls ou quasi-nuls. L'impact occupation est alors négatif et représente de l'ordre de 50% des émissions de gaz à effet de serre induites par le reste de l'inventaire sur les cas d'étude vigne et grandes cultures.

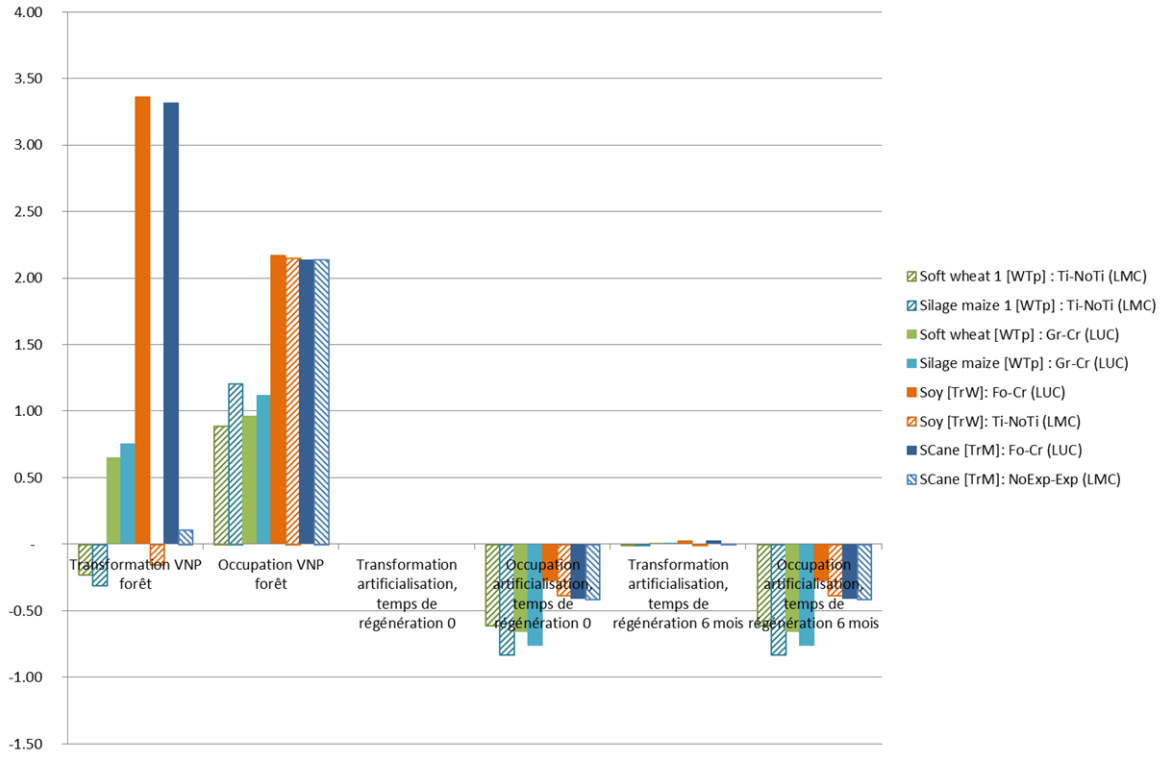


Figure 19 : Sensibilité des impacts occupation et transformation MW&B au choix de la référence, comparaison des résultats pour une référence forêt et une référence sol artificialisé.

3.1.6.Source de données pour identifier les transformations

Les sources pour estimer les transformations sur des cas, non rattachés à une localisation bien précise, sont limitées. Les deux sources identifiées sont Blonk Consultants (2013), et la solution en cours de validation par le CITEPA (applicable uniquement sur les systèmes métropolitains). Seules les données en termes de surface ayant fait l'objet de transformation ont été comparées selon les sources (Figure 20).

Il ressort de cette comparaison les points suivants :

- La comparaison est difficile car les deux sources n'utilisent pas la même typologie de catégories d'usage des terres (catégories IPCC pour la solution CITEPA).
- Les surfaces en jeu sont dans la plupart des cas très faibles.
- Les catégories utilisées ne sont pas toujours appropriées à l'usage étudié. Selon la typologie IPCC, la vigne est rattachée aux cultures annuelles.
- Les résultats de la solution CITEPA sont à valider. La surface en conversion des cultures annuelles et pérennes vers prairie en Pays de Loire semble surestimée (de l'ordre de 25%).

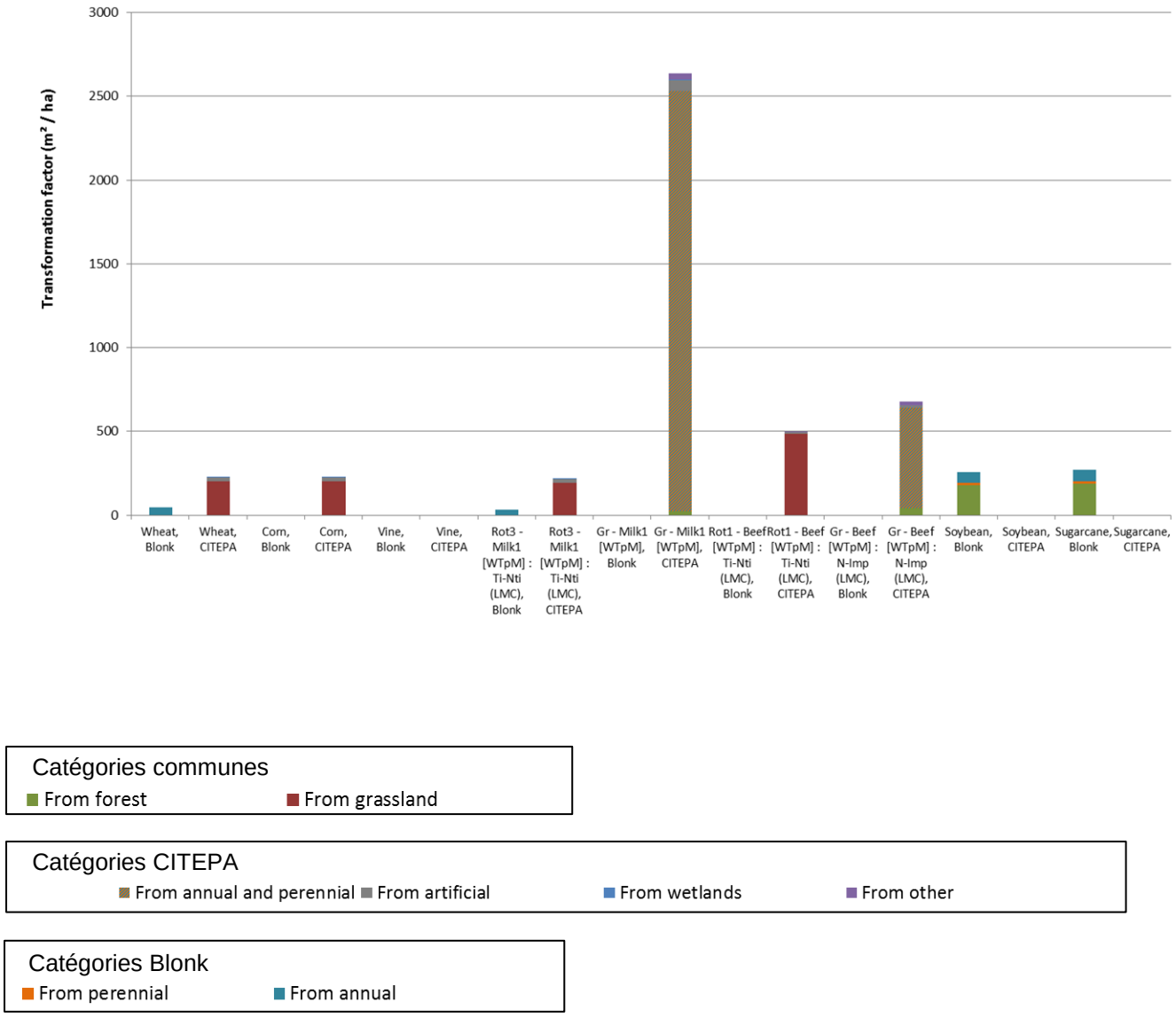


Figure 20 : Comparaison de des surfaces en transformation obtenues en fonction des sources Blonk Consultants, 2013

3.1.7. Influence de la prise en compte des émissions d'azote liées au déstockage de carbone dans le sol

Dans la matière organique du sol, les teneurs en carbone et azote sont liées à un équilibre métabolique en fonction des besoins des microorganismes du sol et du couvert végétal. Le ratio C:N est un indicateur de cet équilibre et de la propension de la matière organique à être plus ou moins rapidement décomposée. Avec des ratios proches de l'équilibre naturel des microorganismes du sol, la matière organique apportée est rapidement décomposée et potentiellement immobilisée ou absorbée par la plante. Pour des ratios supérieurs, l'azote devient un facteur limitant de cette décomposition. Au contraire, pour des ratios inférieurs, l'azote est en excès et susceptible d'être émis vers l'environnement. Mécaniquement, lors d'un changement d'usage ou de pratique, si du carbone du sol est décomposé et émis vers l'environnement – notamment sous forme de CO_2 – une partie de l'azote de la matière organique est également minéralisée et potentiellement émise vers l'environnement – notamment sous forme de N_2O.

La méthode IPCC Tier 1 explicite la prise en compte des émissions directes et indirectes de N_2O liées à la minéralisation de l'azote due à un déstockage de carbone du sol dans le cadre d'un changement d'usages

ou de pratiques. Cette fraction d'azote minéralisée est exprimée par le coefficient F_{SOM} facteur des coefficients d'émission directe de N_2O dans l'équation 11.1 (Volume 4, Chapter 11, page 7) et d'émission indirecte de N_2O dans l'équation 11.10 (Volume 4, Chapter 11, page 21). Cet azote minéralisé lié au déstockage de carbone s'ajoute au pool d'azote du sol susceptible d'être en partie émis vers l'environnement au même titre que l'azote minéralisé issu des résidus de culture ou encore l'azote apporté par des engrais synthétiques. La méthode IPCC Tier 1 propose 2 valeurs par défaut de C:N : 15 dans le cas d'un LUC depuis une forêt ou prairie vers des cultures (fourchette d'incertitude : 10-30), et 10 dans le cas de LMC pour des terres arables restant en culture (fourchette d'incertitude : 8-15).

Dans les cas d'étude de SOCLE, le calcul des émissions directes et indirectes de N_2O liées au déstockage de carbone du sol a été réalisé selon la méthode IPCC Tier 1 en sus des émissions de CO_2 seules afin d'observer les contributions relatives (Figure 21). Dans un premier temps, les ratios C:N par défaut de l'IPCC ont été considérés. Dans un deuxième temps, ces ratios ont été augmentés de 10%. Enfin, lorsque des données primaires ou issues de la littérature étaient disponibles, des valeurs plus spécifiques aux cas d'étude ont été également testées.

Étant donné que les émissions de N_2O sont liées à la minéralisation concomitante au déstockage de carbone du sol, les scénarios de LUC ou de LMC entraînant au contraire un stockage de carbone dans le sol n'entraînent pas de stockage d'azote et ne sont donc pas représentés sur la figure. D'autre part, tous les cas d'étude n'ont pas permis d'identifier des données primaires pour tester des ratios C:N plus spécifiques aux sites (seulement 5 scénarios ont pu être testés).

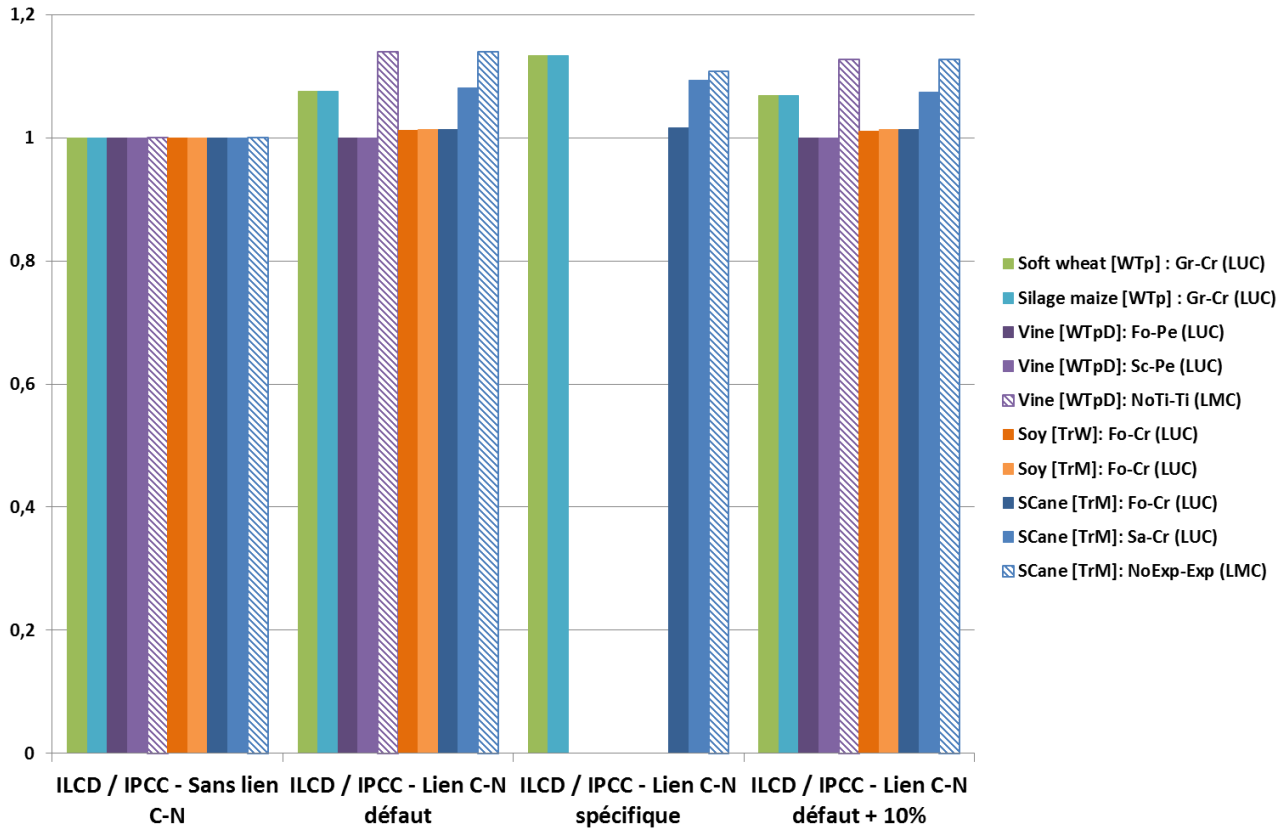


Figure 21: Influence des émissions directes de N_2O sur les émissions liées aux LUC et LMC : émissions en CO2e/UF selon la méthode IPCC Tier 1 sans et avec l'addition des émissions de N_2O

Sur l'ensemble des scénarios testés, la prise en compte des émissions directes de N_2O liés au déstockage de carbone augmente l'impact changement climatique total des LUC et LMC de 1% à 18%. Étant donné la grande incertitude sur ces ratios, des données spécifiques pour le produit étudié seraient préférables. En

particulier dans le cas où des changements de pratique pourraient entraîner de nouveaux équilibres significativement différents, l'utilisation de données primaires pour le ratio entraînerait des différences significatives par rapport aux valeurs par défaut de l'IPCC étant donné que pour une terre en culture, quelle que soit la pratique le ratio est considéré stable. De même un ratio spécifique pourrait être indispensable dans le cas d'un changement d'usage depuis ou vers un couvert autre qu'une forêt, une prairie ou une culture, *e.g.* une savane intermédiaire de type cerradão, pour lequel aucun ratio par défaut n'est véritablement proposé.

La contribution des émissions de N_2O, *i.e.* de la prise en compte du lien entre le carbone et l'azote du sol lors de LUC et LMC, est non négligeable. Il est donc important de bien quantifier ces émissions de N_2O dans la caractérisation des impacts des LUC et LMC. Ceci est pourtant communément omis dans les études incluant les effets des LUC et LMC dans les bilans de gaz à effet de serre.

D'autre part, il serait également pertinent, *a priori*, de ne pas négliger ces mêmes émissions d'azote minéralisé pour la décomposition de la biomasse. En effet, les émissions de carbone liées au déstockage de carbone dans la biomasse selon la méthode IPCC Tier 1 sont calculées selon l'approche de *Stock difference* avec une hypothèse de perte totale de la différence de carbone sous forme de CO_2. En réalité, si la biomasse est brûlée, d'autres types d'émissions peuvent avoir lieu et l'IPCC propose également des équations pour les estimer. Si la biomasse est exportée des hypothèses de durée de vie peuvent être nécessaires. Si, par contre, la biomasse est laissée sur place pour se décomposer, alors de la même manière que pour le carbone du sol, cette décomposition du carbone de la biomasse devrait être associée à un calcul de minéralisation de l'azote et d'émissions potentielles de N_2O en fonction des ratios C:N des biomasses se décomposant.

3.2. Analyse par filière

3.2.1. Analyse pour les cas d'étude grandes cultures

Les principaux éléments d'interprétation et d'analyse des résultats obtenus pour les scénarios du cas d'étude grandes cultures sont les suivants :

- Les méthodes IPCC stock difference / ILCD et MW&B ne considère un flux de stockage / destockage qu'en cas de changement de pratique et d'usage et considère pour estimer l'impact sur le réchauffement climatique l'écart entre les stocks à l'équilibre. Si un système dans son fonctionnement sur une période donnée stocke / destocke sans changement de pratique, ces flux ne sont pas pris en considération avec ces méthodes, contrairement à la méthode IPCC gain loss.

- *L'impact est fort en cas de retournement de prairie, notamment avec la méthode IPCC / ILCD.*
  En effet, l'impact de transformation du scénario retournement de prairie représente, avec la méthode IPCC / ILCD, 2,75 fois celui de l'inventaire. Bien que plus faible en comparaison, l'impact reste marqué avec la méthode Müller-Wenk & Brandão (2010), représentant 65% de l'impact de l'inventaire.

- *L'impact transformation d'un itinéraire technique sans fertilisation organique / sans couvert / avec labour à un itinéraire avec fertilisation organique / avec couvert / sans labour est important mais varie beaucoup en fonction de la méthode de caractérisation retenue et du modèle utilisé*
  En effet, l'impact de transformation du scénario changement de pratique équivaut, avec la méthode IPCC / ILCD, en valeur absolue à l'impact de l'inventaire en utilisant la méthode IPCC tier 1 pour estimer les stocks de carbone mais représente -70% de l'impact inventaire en utilisant des données spécifiques. L'impact est plus faible avec la méthode Müller-Wenk & Brandão (2010) : il représente -26% de l'impact inventaire en utilisant la méthode IPCC tier 1 et seulement - 17% de l'impact de l'inventaire, en utilisant AMG.

- *Les impacts d'occupation sont importants par rapport aux impacts d'inventaire*
  En effet, l'impact d'occupation calculés avec la méthode MW&B, en considérant une référence de type Végétation Naturelle Potentielle (forêt), représentent environ l'impact de l'inventaire.

- *Le manque de données descriptives sur les dynamiques d'évolution des stocks de carbone rend impossible l'application de l'ACV dynamique sur un changement d'usage prairie à cultures annuelles.*

- *Les incertitudes sur les valeurs de stocks de carbone du sol ont un effet très important sur les résultats obtenus par les méthodes IPCC / ILCD et Müller-Wenk & Brandão (2010).*
  En effet, une sensibilité de + 10 % sur les valeurs de stocks déterminées selon l'PCC se traduit par une variation de - 19 % à + 29 % sur les résultats d'impact transformation dans le cas du changement d'usage et de - 40 % à + 50 % dans le cas du changement de pratique. Ces valeurs sont à mettre en regard avec les incertitudes estimées par l'IPCC sur les stocks de carbone des sols dans ces conditions, de l'ordre de 20-30 %.
  Le recours à des données spécifiques modifie considérablement l'impact de la transformation considérée pour les deux méthodes utilisées. L'impact de la transformation est réduit de 35 à 65% pour les changements de pratique et de 23% pour le changement d'usage en utilisant des données spécifiques. L'impact de l'occupation avec MW&B augmente de 13% en utilisant des données spécifiques.

- Les résultats entre l'utilisation d'itinéraire non lissé et lissé (moyennant les pratiques selon les grandes tendances, sans prendre en compte des variations sur certaines années) induisent des écarts non négligeables en utilisant AMG pour estimer les stocks de carbone (-45% avec IPCC/ILCD et MW&B, +10% avec ACV dynamique).

- Les émissions de N_2O induites par un destockage de carbone du sol représentent dans le cas du changement d'usage à 13 à 8% des émissions de CO_2 dues au destockage, respectivement en utilisant le ratio C/N proposé par défaut par l'IPCC ou le ratio estimé sur le dispositif expérimental.

3.2.2.Analyse pour les cas d'étude élevage

3.2.2.1. Résultats à l'échelle des systèmes d'élevage complets

Par rapport aux inventaires de cycle de vie du lait et de la viande existants (Agribalyse v1.3), qui ne prennent pas en compte le LULUC, l'intégration de l'impact transformation avec la méthode ILCD/IPCC a un effet plus important qu'avec la méthode Müller-Wenk & Brandão, 2010 (de -15 à -54% *vs* -4 à -13%).

En effet les ordres de grandeur des impacts traduits en kg eq.CO_2 ne sont pas les mêmes : IPCC raisonne en delta de stock entre deux états, tandis qu'avec MW&B le delta est réduit en raison de la comparaison à l'état de référence.

L'effet de la prise en compte de l'impact de l'occupation, qui s'évalue également par rapport à une référence, augmente la valeur de l'impact changement climatique d'environ 30% comparativement à l'inventaire initial. Cet écart est plus faible que pour la plupart des autres cas d'étude (Figure 4 et Figure 5). Ceci est également lié au fait que les systèmes étudiés intègrent une forte proportion de praires, temporaires ou permanentes, qui rapprochent le stock de C de celui de l'état de référence (également observé pour les cas vignes).

D'autre part, un autre élément d'explication important est que les systèmes d'élevage sont des émetteurs importants de gaz à effet de serre (GES), en particulier en raison des émissions de méthane entérique, qui représente plus de 50% des émissions de GES. Les émissions du système d'élevage ont donc tendance à « écraser » les émissions et absorption liées aux changements de stocks de carbone du sol.

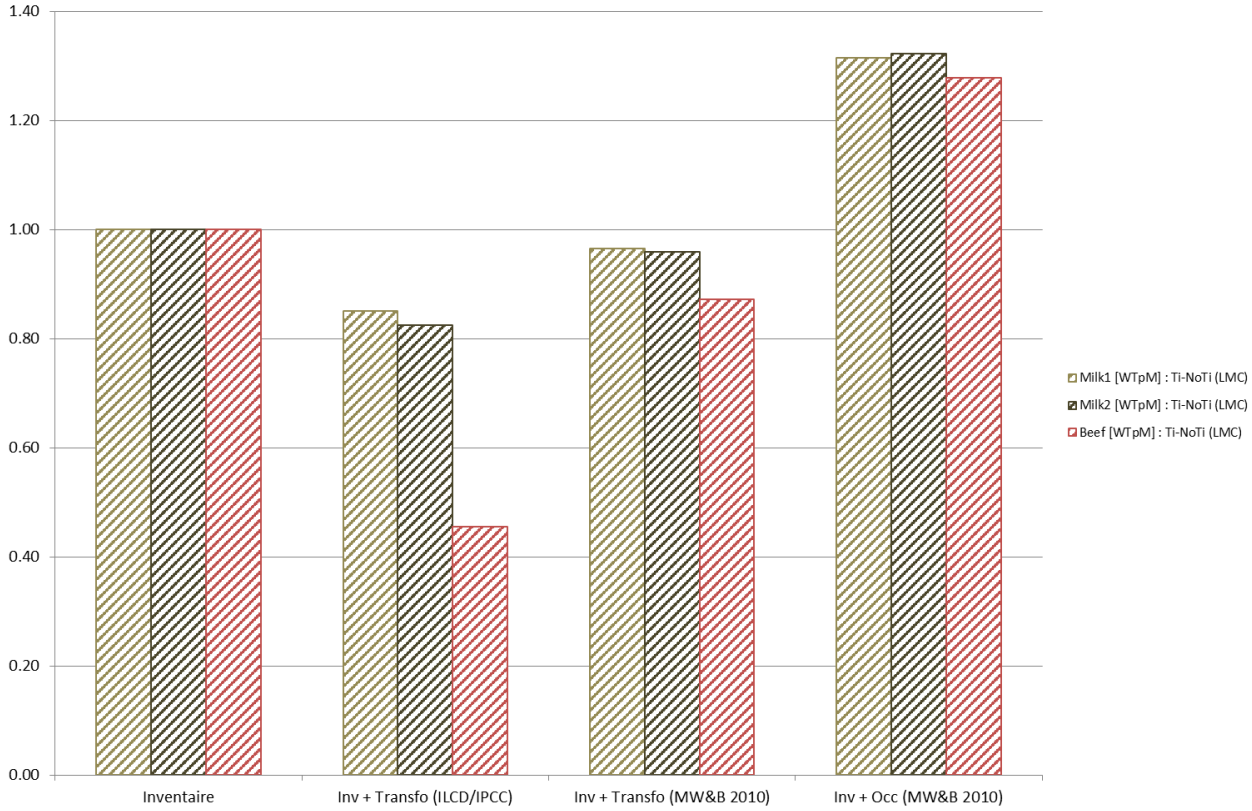


Figure 22 : Impact sur le changement climatique du lait et de la viande bovine, avec et sans prise en compte des flux de carbone du sol avec les méthodes IPCC et MW&B (relativement à l'impact sans prise en compte du LULUC exprimé en kg eq CO_2/ kg FPCM ou kg poids vif)

3.2.2.2. Résultats à l'échelle des surfaces avec MW&B - Expression des résultats par ha, par type d'occupation et par système d'élevage :

Avec MW&B, l'impact Transformation fait apparaitre l'effet des pratiques qui améliorent le carbone du sol (labour->non labour ; dans le cadre des simulations effectuées et avec les modèles mobilisés).

L'impact Occupation est moindre pour les prairies permanentes que pour les surfaces arables (comparativement à la végétation naturelle potentielle).

L'impact total (transformation + occupation) est plus faible pour les prairies permanentes améliorées et pour certaines surfaces arables, en fonction de la teneur initiale en carbone du sol.

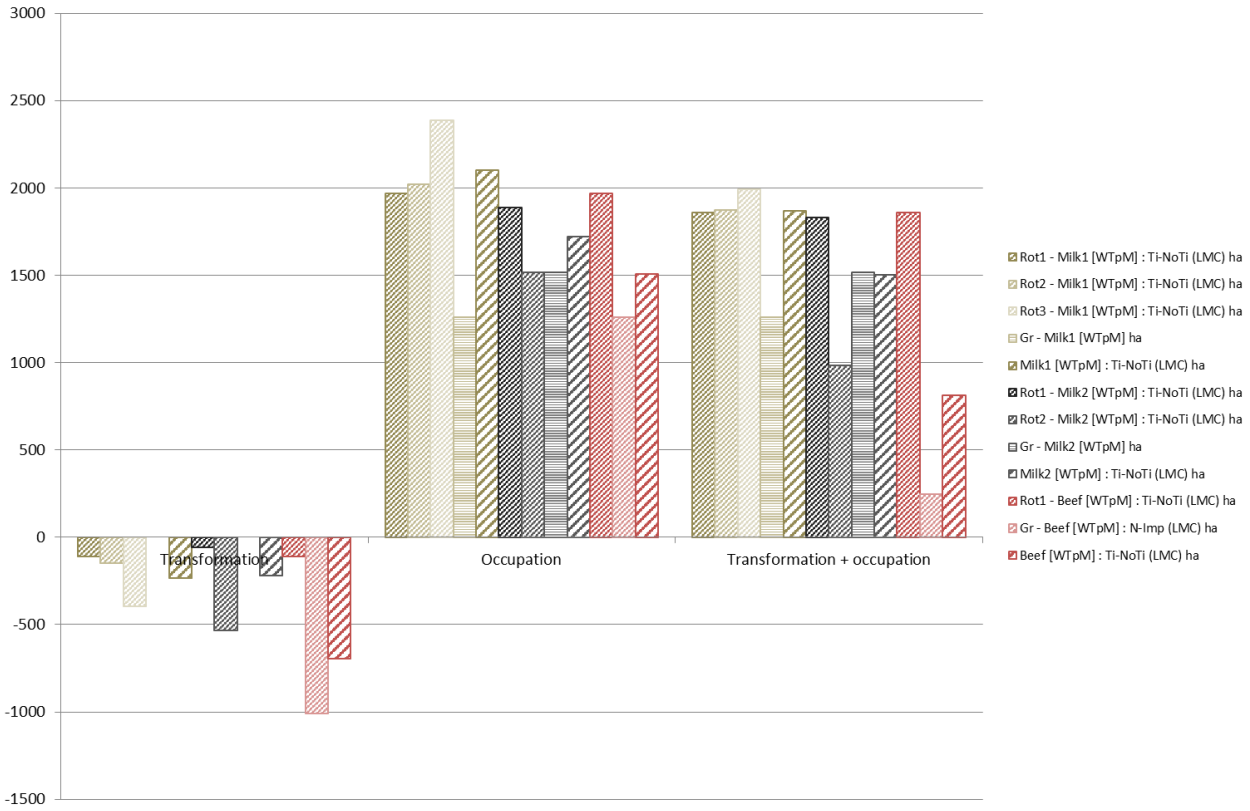


Figure 23 : Résultats d'impact sur le changement climatique avec la méthode MW&B pour les occupations et systèmes complets en bovin lait et bovin viande (en kg eq. CO_2 / ha)

3.2.2.3. Résultats à l'échelle des surfaces avec la méthode ILCD/IPCC – Sensibilité à la source de données pour le carbone du sol sous prairie

L'intégration de facteurs spécifiques pour la prairie temporaire (comportement vis-à-vis de la dynamique de stockage de C intermédiaire entre culture et prairie) et permanente (en fonction de l'âge et du niveau de défoliation) dans la méthodologie Tier 2 (proposé par Dollé et Klump, dans Tuomisto et al., 2015) génère des écarts importants par rapport à la méthode Tier 1 par défaut. Cet effet transparait dans les résultats d'impact.

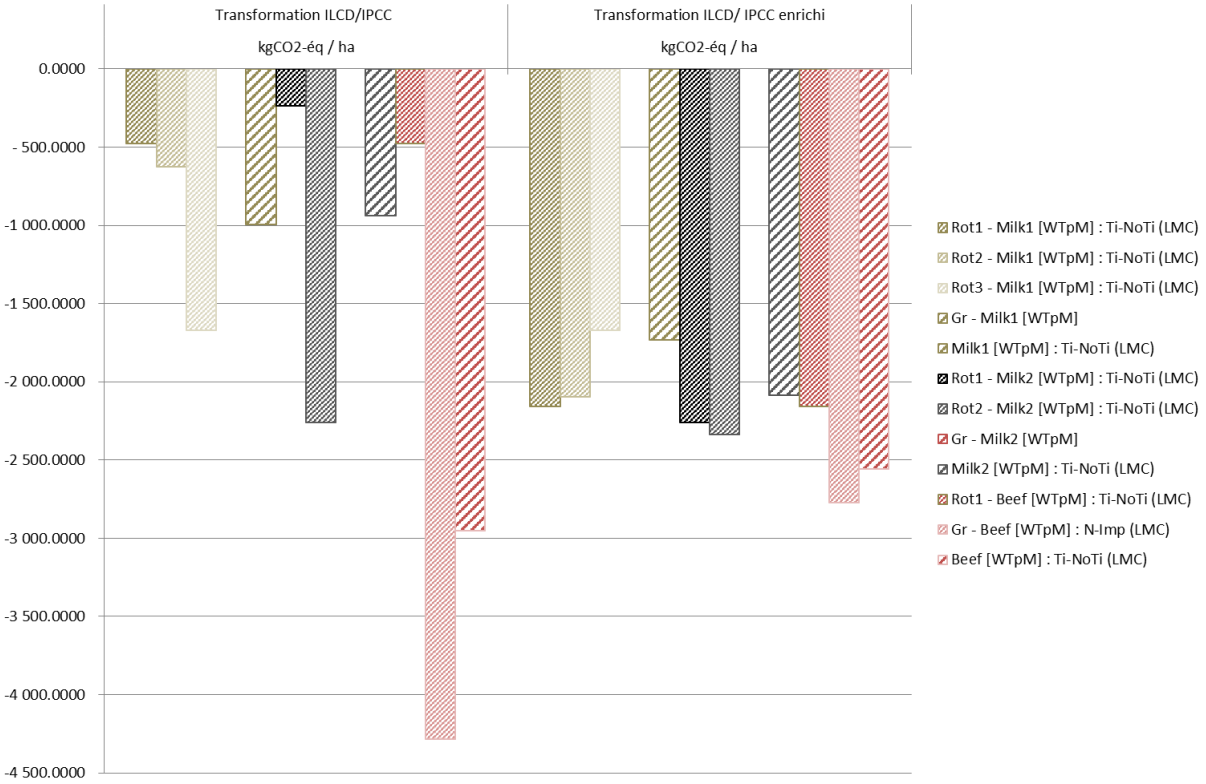


Figure 24 : Résultats d'impact sur le changement climatique avec la méthode ILCD pour les occupations et systèmes complets en bovin lait et bovin viande, en quantifiant les variations de stocks avec le Tier 1 IPCC ou le Tier 2

3.2.2.4. Analyse générale

Pour les valeurs de stocks de C, de manière générale, utiliser les valeurs par défaut de l'IPCC avec cette méthode, paraît être robuste, même si les hypothèses peuvent paraître frustes.
Il est cependant recommandé d'utiliser autant que possible des données spécifiques : modèle pour les terres arables, IPCC « Tier 2 » pour les prairies (dans l'état actuel des connaissances et sur la base des modèles mobilisés dans le projet). Il y a toutefois un grand besoin de disposer de modèles comparables entre terres arables et prairies temporaires et permanentes, ou permettant d'estimer les stocks de ces deux types d'usage.

En termes de méthode ACV, mobiliser la méthode IPCC TIer 1 est une recommandation minimum. La méthode MW&B semble intéressante par rapport à l'impact occupation : elle permet de faire apparaitre l'intérêt des prairies permanentes vis-à-vis du carbone stocké, comparativement à un état de référence, même sans changement de pratique.

Ces résultats restent spécifiques aux cas d'études étudiés (peu nombreux, bien que représentatifs des conduites et modes d'occupation du sol rencontrés en élevage bovin) et aux pratiques simulées, améliorant le stock de carbone du sol.

3.2.3.Analyse pour le cas d'étude vigne

L'impact transformation de l'IPCC ajouté à l'impact changement climatique de l'inventaire Agribalyse (Figure 25) montre une contribution qui peut être très forte pour les cas de changement d'usage de « Forêt » vers « Vigne » (impact 2,5 fois plus élevé) et environ de 10% plus forte pour un changement de pratique de non labour à labour. Alors qu'une situation de stockage est observée et réduit l'impact respectivement de 23%, de 20% et 5% pour le changement de garrigue à vigne, de sarment exportés à sarment restitués et de sol labouré-nu à sol enherbé.

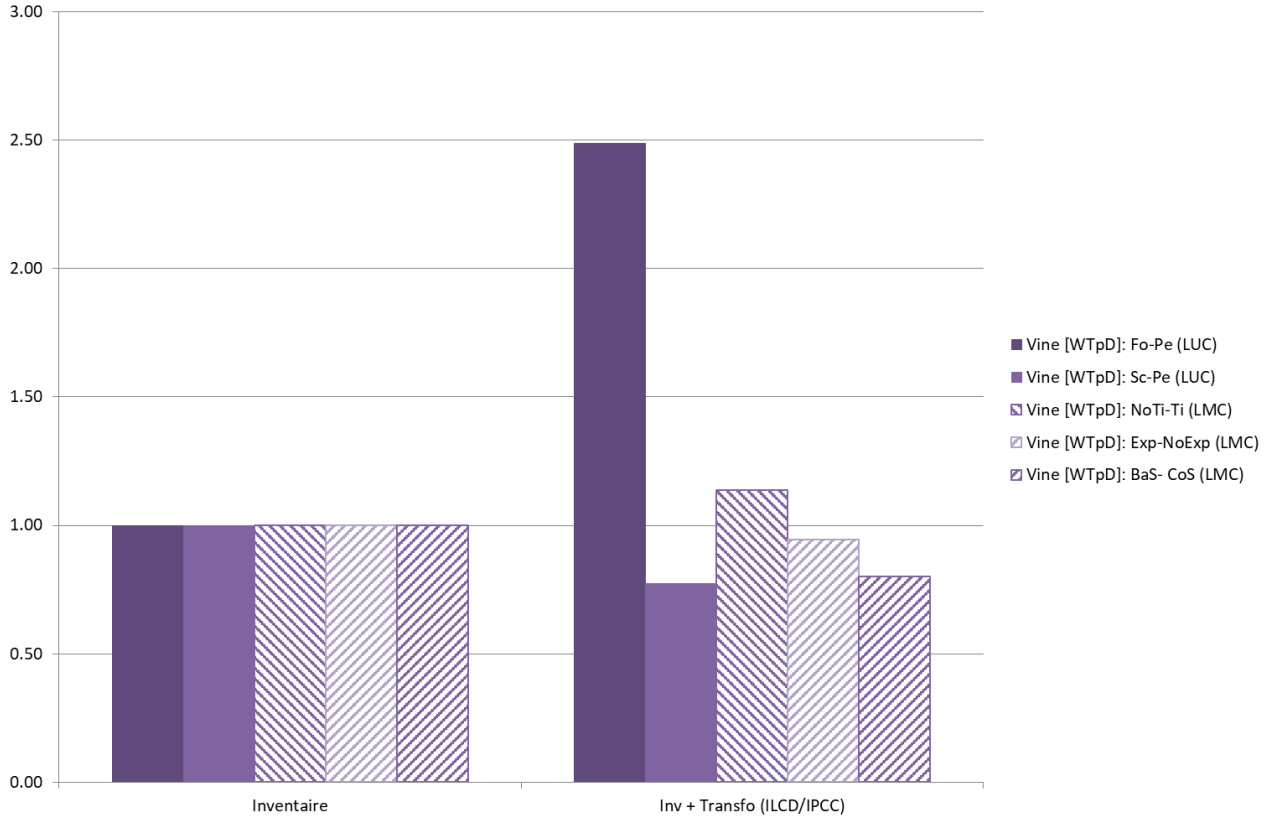


Figure 25 : Intégration de l'impact transformation calculé avec la méthode IPCC et les valeurs de stock à l'équilibre de l'IPCC par défaut à l'inventaire changement climatique.

Les valeurs des stocks de C à l'équilibre sont des données particulièrement sensibles pour le cas de la vigne (Figure 26). La valeur de stock de C dans la biomasse de la vigne issue de la littérature est beaucoup plus faible (environ 14 fois moins importante) que celle donnée par défaut dans l'IPCC (3 tC/ha vs 43,2 tC/ha). De même, les valeurs de stock de C du sol à l'équilibre issues de la modélisation sont systématiquement plus faibles que celles de l'IPCC, l'écart le plus important étant d'environ 30% de moins (pour le cas de la vigne labourée, inter-rang nu et sarments exportés). Ceci explique le fait que l'impact de transformation évalué pour les 3 situations de changements de pratique étudiées est systématiquement surévalué avec les données spécifiques. Dans le cas du changement d'usage garrigue vers vigne labourée, inter-rang nu et sarments exportés, la variation de stock de C est amplifiée et inversée par les données spécifiques : on passe d'une situation « légèrement stockante » à très fortement déstockante (6 fois plus). En valeur absolue, les situations de changement de pratiques sont plus sensibles aux valeurs de stocks de C à l'équilibre que les changements d'usage, ceci s'explique par le fait que les variations de stock de C sont faibles en valeur absolue pour ces changements. En étant proche d'un stock d'équilibre, une variation faible (en plus ou en moins) pèse cependant beaucoup dans l'impact final, et peut l'inverser très fortement.

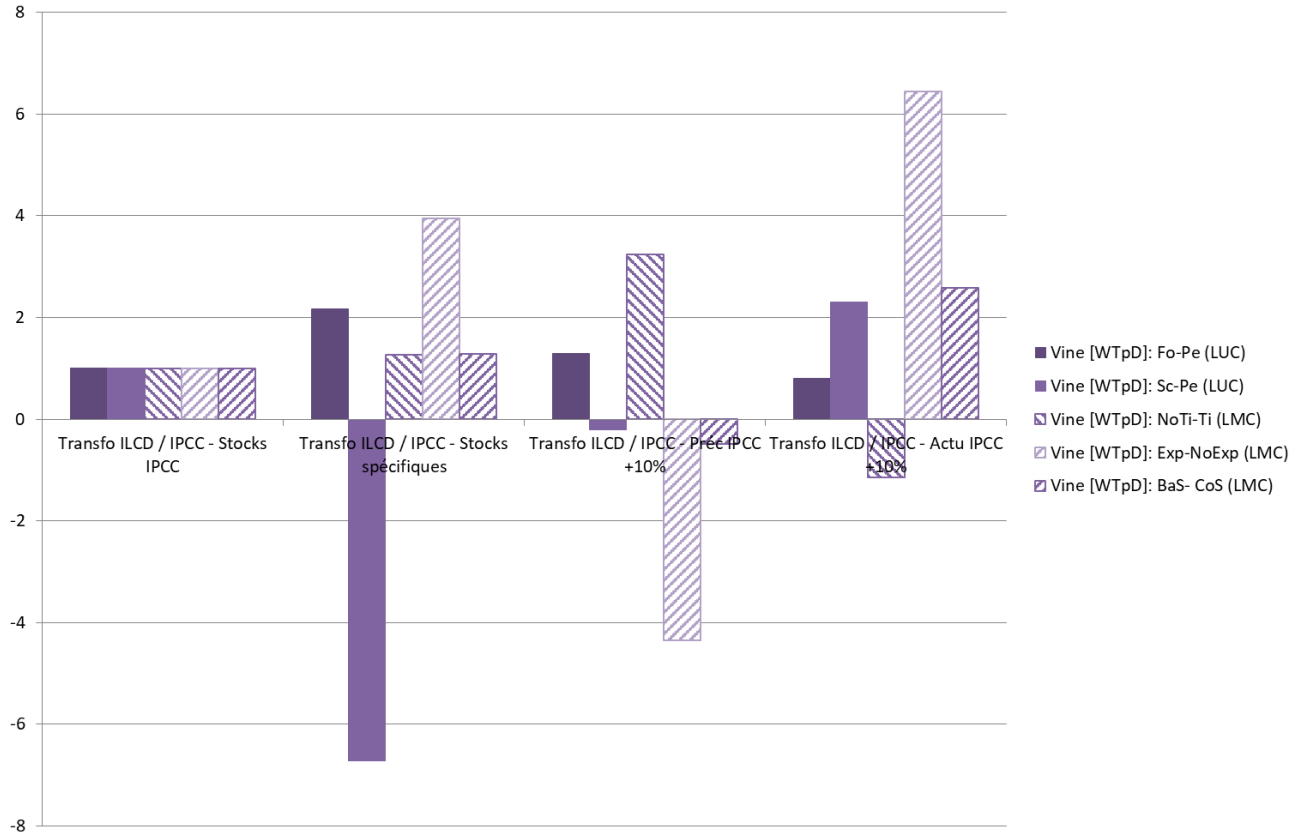


Figure 26 : sensibilité de l'impact de transformation calculé avec la méthode IPCC aux stocks de C du sol et de la biomasse

Il n'y a pratiquement pas d'effet (de l'ordre de 10^{-4}) sur l'impact changement climatique de la prise en compte des émissions additionnelles de N_2O (dites « lien C/N ») liées au déstockage de C dans les cas de changements étudiés, et ce quelle que soit l'hypothèse du C/N du sol considérée (celle par défaut de l'IPCC ou IPCC + 10%).

La méthode de répartition temporelle de l'impact transformation peut réduire fortement la valeur de l'impact (jusqu'à 30% pour une durée de 90% de la variation du delta-stock de C sur 100 ans = durée D). En revanche, que ce soit linéaire ou que ce soit dégressif, la durée sur laquelle se répartit l'impact pèse est le paramètre qui compte pour la vigne. Ceci peut s'expliquer par la durée de son cycle de vie (32 ans ici) qui est plus longue que la durée des 20 ans par défaut de la méthode IPCC.

L'application de la méthode IPCC dans le cas de la vigne a toujours été possible pour les changements d'usage et de pratiques considérés. Cependant, vue la sensibilité forte de l'impact aux valeurs de stocks de C à l'équilibre et les écarts constatés entre les valeurs de la littérature, de la modélisation et celles par défaut de la méthode, notamment pour la biomasse de la vigne, et le stock de C dans les sols après changement de pratique, il apparaît nécessaire de présenter les résultats d'évaluation avec une gamme de valeurs prises, et d'effectuer une analyse de sensibilité au préalable. La durée sur laquelle se répartissent les impacts semble avoir un effet plus fort que la méthode de répartition (dégressive ou linéaire). L'effet sur la valeur de l'impact est d'autant plus fort que l'on considère une durée supérieure à la durée de vie de la vigne.

3.2.3.1. Méthode Müller-Wenk et Brandão

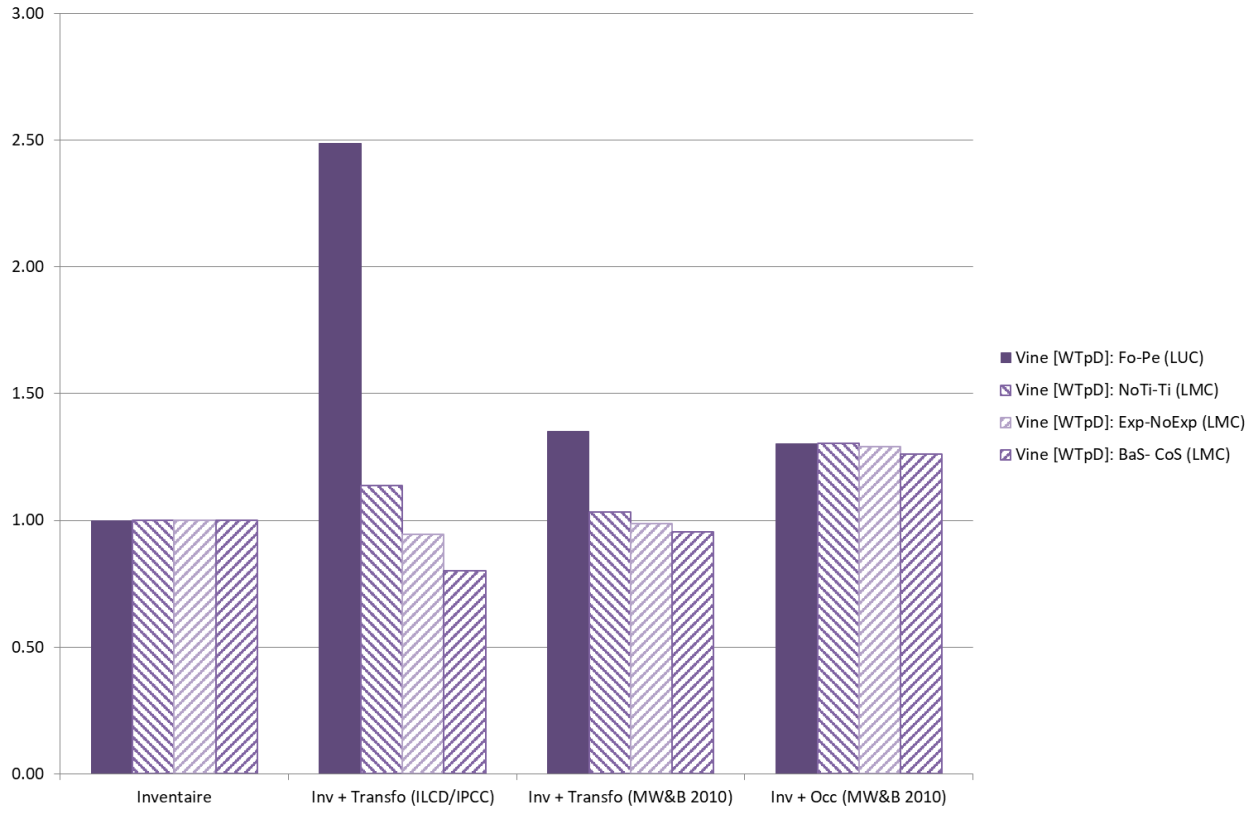


Figure 27 : Comparaison des impacts additionnels de transformation, calculés avec la méthode IPCC et Müller-Wenk et Brandão (MW&B) et l'impact d'occupation, calculé avec la méthode MW&B.

D'après la Figure 27, avec la méthode Müller-Wenk et Brandão (MW&B) l'impact transformation est beaucoup moins fort (2 fois moindre environ) pour le changement d'usage forêt vers vigne qu'avec l'IPCC. Les impacts d'occupation, quelles que soient les pratiques, sont toujours positifs. La situation de transformation vers du non-labour est un peu plus impactante que les deux autres pratiques (sarments laissés au sol et enherbement de l'inter-rang), et ce par rapport à la végétation de référence considérée qui est la forêt méditerranéenne. La distinction des impacts transformation et occupation de la méthode MW&B montre des situations beaucoup moins contrastées pour la transformation depuis la forêt méditerranéenne que l'IPCC.

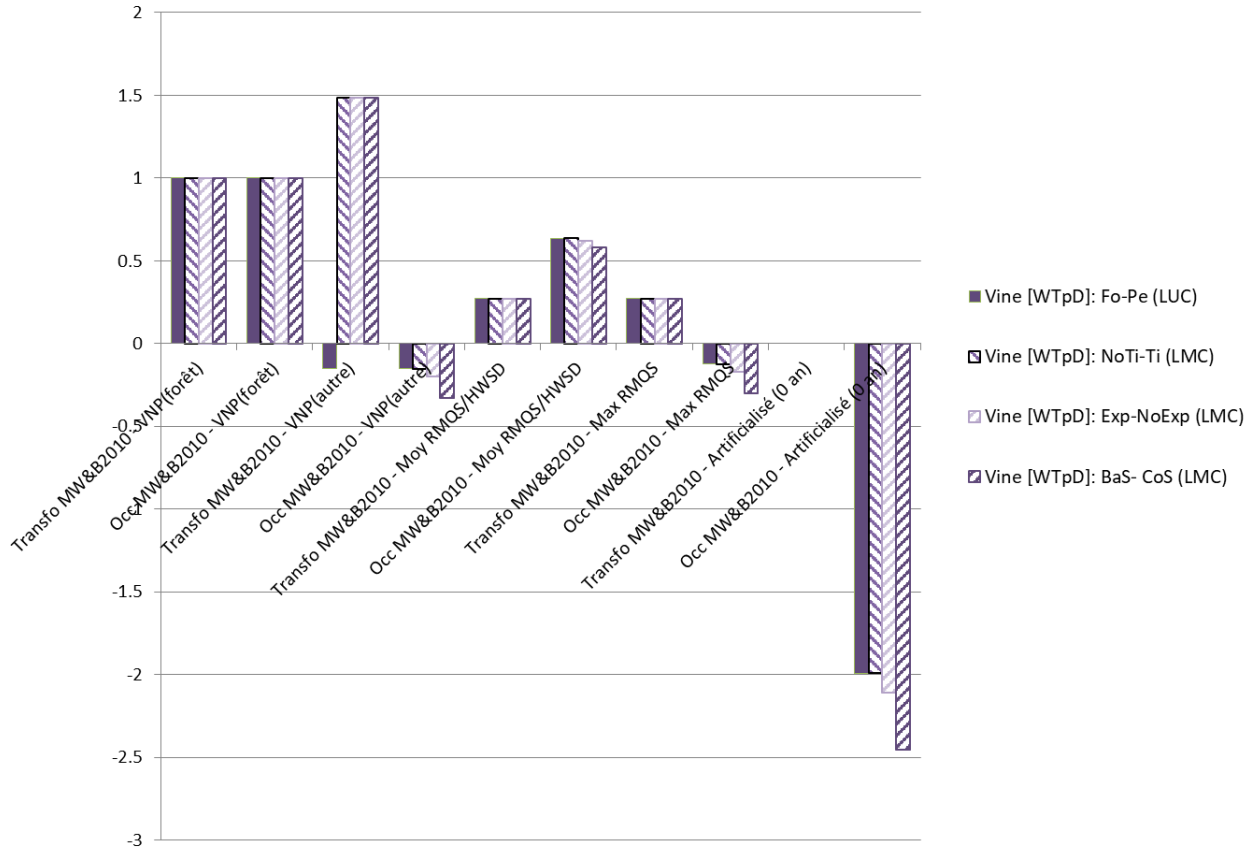


Figure 28 : Sensibilité au choix de l'état de référence pour la méthode MW&B.

Les impacts se révèlent très sensibles aux valeurs des stocks de C dans l'état de référence (Figure 28). En Languedoc- Roussillon (LR), le stock de la moyenne régionale du RMQS est de 70.7 tC/ha (appelé "moy RMQS", stock plutôt élevé car les forêts occupent une grande surface en LR) et le stock de C moyen sous vigne (calculé avec le 3ème quartile de l'occupation "vigne", et appelé "maxRMQS") est de 32.91 tC/ha.

La valeur MoyRMQS est toujours plus élevée que chacune de celles considérées pour tous les états précédents avec la donnée IPCC par défaut, les impacts de transformation et d'occupation calculés sont toujours positifs (on émet du CO_2), pour tous les cas étudiés avec cette référence "moyRMQS". La valeur sous vigne MaxRMQS étant plus basse que chacune de celles considérées pour tous les états précédents avec la donnée IPCC par défaut, l'impact transformation est ainsi plus faible alors que l'impact occupation peut être même négatif (on "stocke" du Carbone). La hiérarchie des situations évaluées avec la méthode MWB et les valeurs IPCC par défaut n'est ainsi jamais reproduite.

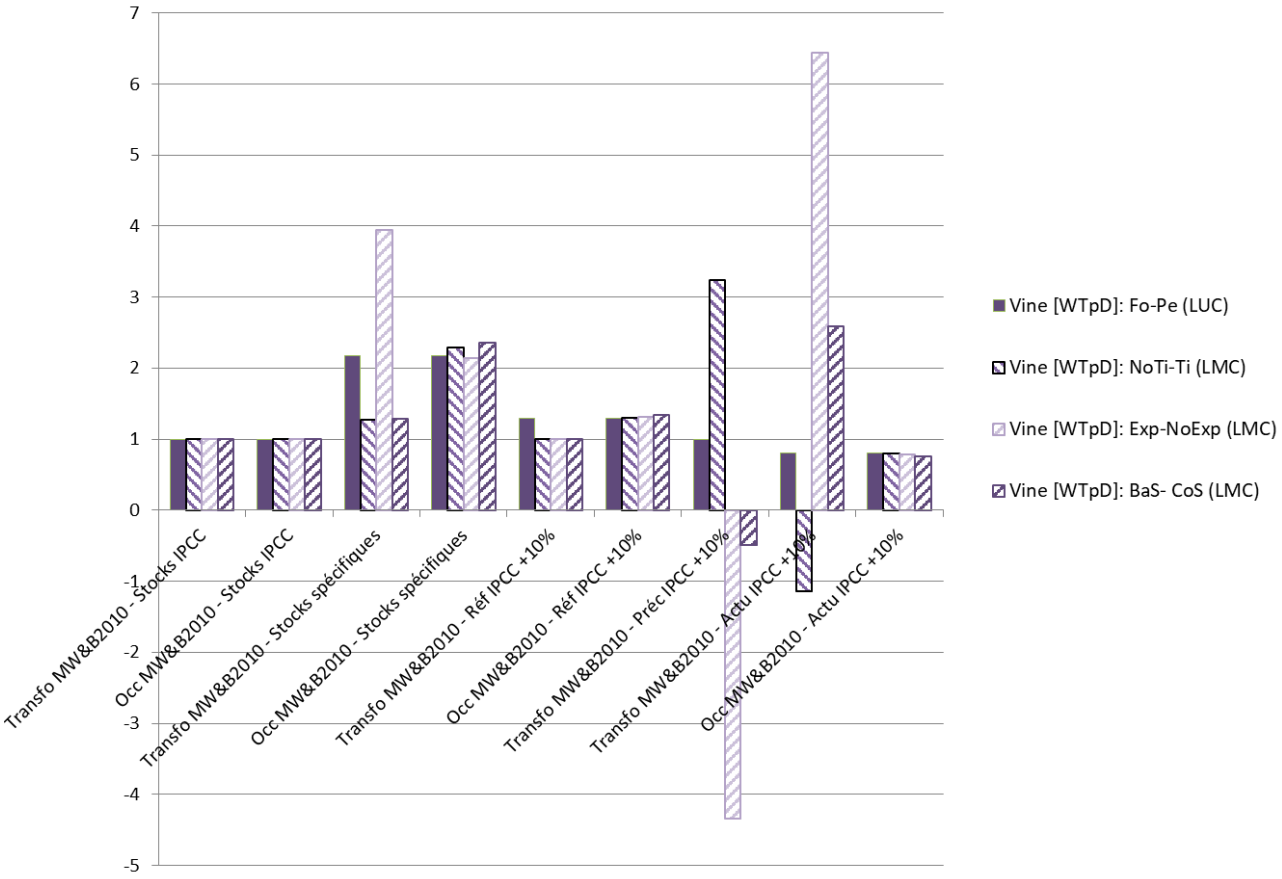


Figure 29 : Sensibilité à la source de données de stock de C.

Avec les valeurs « spécifiques » de stocks de C (cf. définition dans le §2.9.2) : les impacts transformation et occupation sont fortement accentués (plus que doublés) pour le changement d'usage depuis la forêt et les changements de pratiques (Figure 29). Le changement de l'état de référence de +10% entraîne aussi une légère augmentation des impacts transformation et occupation, pour le changement d'usage depuis la forêt et les changements de pratiques. Par contre, l'augmentation de +10% des valeurs de stock C des états précédents et actuels entraîne des variations importantes et très contrastées sur les changements de pratiques, les valeurs d'impact pouvant fortement augmenter et diminuer voire même s'inverser. Ceci est dû au fait que pour les états actuels et précédents, une faible variation entraîne un fort changement relatif sur le stock (on est proche de l'équilibre du stock de C du sol, quels que soient les changements de pratiques étudiés).

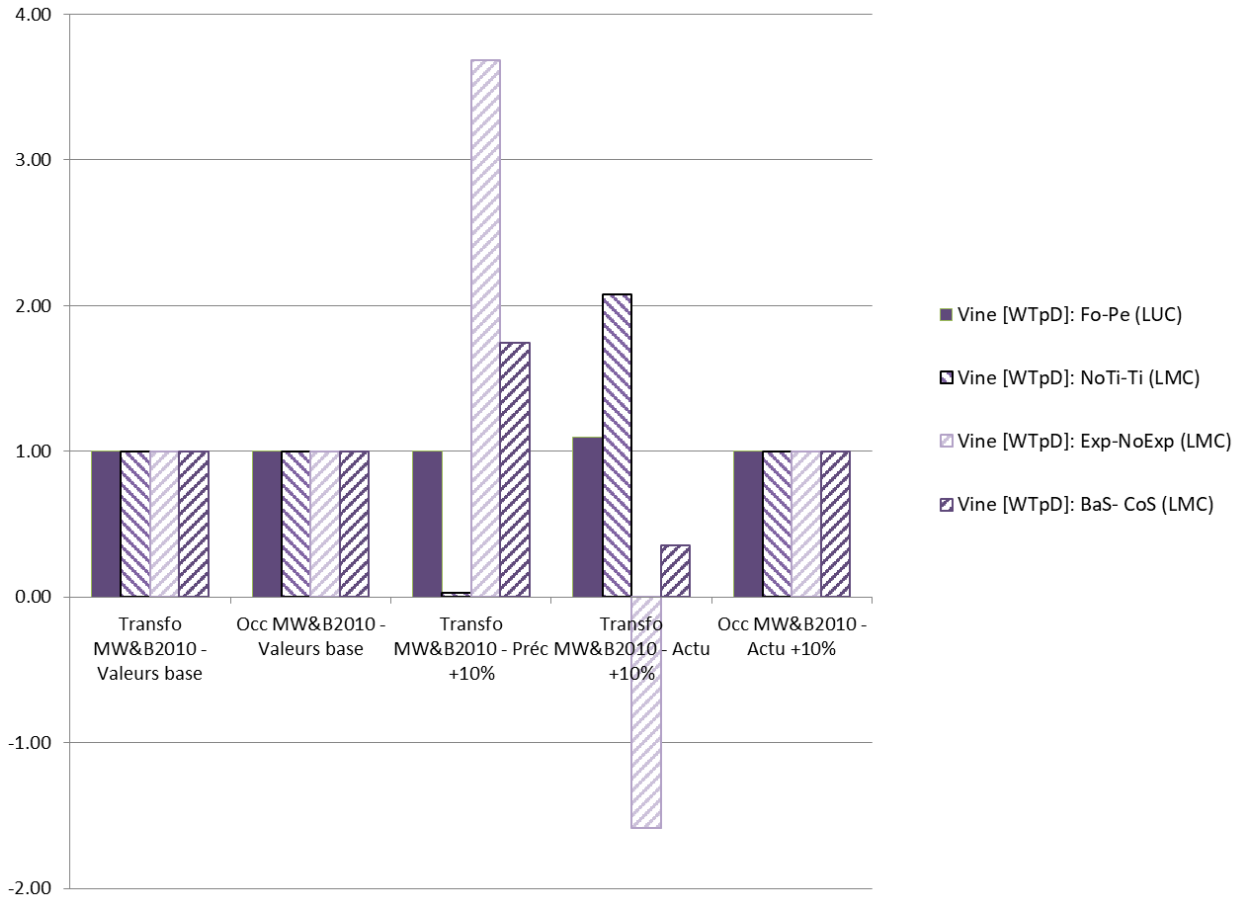


Figure 30 : Sensibilité à la valeur du temps de régénération

La méthode MW&B appliquée à la vigne atténue les impacts par rapport à l'ILCD/IPCC, cependant, les choix des valeurs de stocks de C et de temps de régénération apparaissent comme très sensibles (Figure 30). Mise en œuvre avec des valeurs de stocks de C du sol représentant un état d'équilibre issus de modélisation, cette méthode montre des résultats cohérents avec ceux de l'IPCC. Une fois déterminés ces stocks à l'équilibre, la méthode est aisée à mettre en œuvre et permet de distinguer l'impact « transformation » de l'impact « occupation ». La définition d'un état de référence permet d'envisager ces deux impacts par rapport à une occupation du sol définie. Cependant, cet état de référence est également un paramètre sensible de la méthode : pour le définir, l'utilisation des bases de données existantes comme le RMQS suppose que les catégories d'usage définies dans les bases et l'occupation « de référence » soient cohérentes, ce qui n'est pas le cas ici.

Concernant les temps de régénération, identifier des alternatives aux valeurs proposées par défaut n'a pas été possible pour la vigne. Compte tenu de la sensibilité des résultats aux valeurs prise par les différents paramètres de la méthode, les résultats des impacts doivent à être présentés selon une gamme de valeurs et des analyses de sensibilité réalisées au préalable.

3.2.3.2. Analyse générale (cf. aussi fiches dédiées sur les pérennes et sur la définition de dynamiques de C)

Pour les valeurs de stocks de C, de manière générale, utiliser les valeurs par défaut de l'IPCC avec la méthode MW&B, paraît être robuste, même si les hypothèses peuvent paraître frustes. Il faut cependant éviter d'utiliser le stock de C dans la biomasse de la vigne qui paraît beaucoup trop élevé par rapport aux valeurs de la littérature (Colin, Barnérias et al. 2009; Eldon and Gershenson 2015). De même, si des valeurs de stocks modélisées existent pour évaluer plus précisément les effets combinés des pratiques culturales et des caractéristiques du sol, les considérer permet d'évaluer plus finement les effets, à moyen terme, des changements de pratique sur le stock de C du sol en particulier.

De manière générale, les stocks de C dans un sol sous la vigne en conditions méditerranéennes sont plutôt faibles (32.91 tC/ha, valeur issue du RMQS en Languedoc Roussillon, et 36.4-5 37.4-5 t C/ha (Francaviglia, Coleman et al. 2012)). Ils seront donc dans une dynamique qui a tendance à stocker, sous réserve qu'il ait suffisamment d'entrées de C dans le sol.

La méthode d'ACV dynamique se révèle intéressante pour la prise en compte de la durée de vie d'une pérenne comme la vigne, la reconstitution de la dynamique d'évolution du stock de C nécessite l'utilisation d'un modèle (cf. la fiche sur l'obtention d'une dynamique de C), ceux qui ont été testés dans le cadre du projet ont montré des résultats similaires.

3.2.4.Analyse pour le cas d'étude canne à sucre

3.2.4.1. Méthodes statiques ILCD / IPCC et Müller-Wenk and Brandão (MW&B), 2010

Quels que soient la méthode utilisée et le scénario testé, la prise en compte des changements de stock de carbone entraînent des différences significatives de résultats par rapport aux résultats de l'ACV par hectare sans cette prise en compte (Figure 31). Pour l'application des deux méthodes et l'ensemble des scénarios, les mêmes valeurs de stocks IPCC telles que définies dans la présentation des cas d'étude ont été appliquées. L'impact de transformation est amorti sur 20 ans pour les 2 méthodes.

Les deux méthodes ont par ailleurs des résultats très différents y compris lorsque l'on ne s'attarde que sur l'impact de transformation. Les tendances restent cohérentes, *i.e.*, seul le scénario Burn-NoExp a un impact négatif, soit un stockage de carbone. Néanmoins, la méthode IPCC donne des impacts de 5 à 7 fois supérieurs à ceux de la méthode MW&B. A ces résultats de transformation, la méthode M&W ajoute néanmoins également un impact d'occupation lié au retour à l'état potentiel retardé par l'occupation. Cet impact, quoique potentiel, est chiffré en termes de flux de carbone. Ses flux ne sont pas négligeables à deux titres. Tout d'abord leur ordre de grandeur est comparable à celui de la transformation. D'autre part, ces flux sont potentiellement importants y compris lorsque le changement de pratique indique un impact négatif, donc un stockage lié à une occupation ayant un impact moindre que le précédent.

Les deux méthodes permettent de prendre en compte aussi bien des changements d'usage au sens stricte (*e.g.* passage de forêt à canne à sucre) que des changements de pratiques (*e.g.* passage de Burn à NoBurn=NoExp) lorsque ceux-ci sont paramétrés en termes de transformation d'un usage avec une pratique à l'équilibre vers un même usage avec une autre pratique à l'équilibre. Néanmoins, de par les variations dans la méthode de calcul de l'impact de transformation et l'ajout de l'impact d'occupation, les différences entre scénarios sont plus importantes dans le cas de l'IPCC que lorsque la méthode MW&B est appliquée.

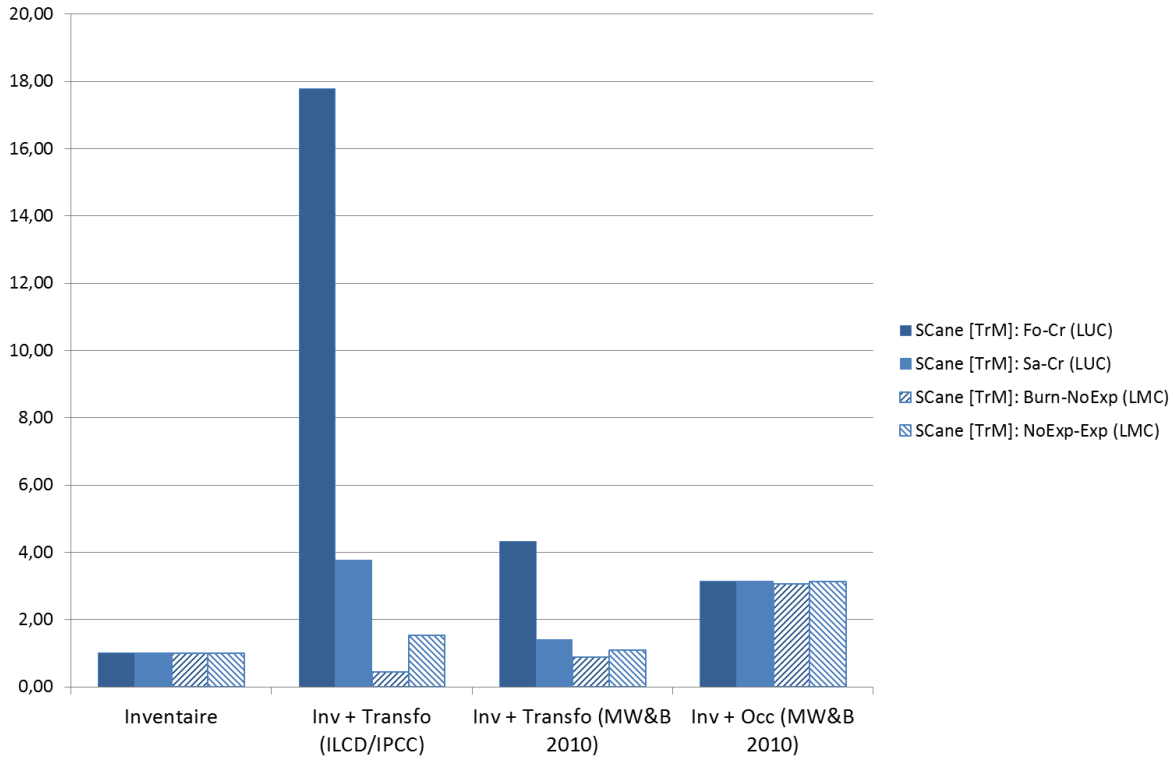


Figure 31: Impacts changement climatique par UF avec ILCD/IPCC et MW&B normalisés par rapport à l'impact par UF sans la prise en compte des LUC et LMC

3.2.4.2. Résultat de l'ACV dynamique

L'ACV dynamique a pu être appliquée pour le scénario SCane [TrM] : Burn-NoExp. Dans ce cas l'impact calculé avec l'ACV dynamique est de -4237 kgCO2e/ha au lieu de -5500 kgCO2e/ha. L'impact moindre calculé avec l'ACV dynamique provient de la diminution du facteur de caractérisation de l'impact Changement Climatique au fur et à mesure de la progression du stockage de carbone. L'ordre de grandeur de l'impact est 4 à 5 fois plus important que dans le cas de l'application des facteurs IPCC par défaut pour les stocks de carbone. Ces stocks sont en effet plus faibles que ceux modélisés et utilisés comme données primaires pour l'ACV dynamique.

3.2.4.3. Résultats des analyses de sensibilité

Des données de stocks de carbone issues de la littérature ont été utilisées pour 3 des 4 scénarios. Ces données sont issues de la modélisation CENTURY par Brandani et al., 2015. Dans cet article, il n'y avait pas de données concernant un précédent forêt. Ce dernier scénario, Fo-Cr, n'a donc pas été mise en œuvre avec des données primaires. En revanche pour l'ensemble des scénarios, des variations de + 10% des valeurs de stocks IPCC ont été testées (Figure 32).

Les données primaires issues de la littérature ont un effet non négligeable sur les résultats. Lorsque l'on compare les résultats selon la méthode de calcul d'impact de l'IPCC. Cet effet est double. Il est d'une part globalement à l'augmentation des écarts de stocks étant donné que les stocks des données spécifiques sont de 1.5 à 2.5 plus importants que les données de stock IPCC. D'autre part, dans le cas des changements de pratique, l'effet des données spécifiques est une augmentation radicale d'un facteur 4 à 5 des impacts, aussi bien en termes de diminution des émissions (SCane [TrM] : Burn=NoExp) qu'en termes d'augmentation de ces émissions (SCane [TrM] : NoExp=Exp). En effet les stocks varient peu dans le cas des changements de pratiques selon les facteurs de pondération de l'IPCC, entre 1.06 et 1.28 dans notre cas d'étude. En revanche, les changements de pratique s'avèrent, selon les données spécifiques avoir un impact plus tranché sur les variations de stocks.

De manière cohérente, on observe bien des augmentations des impacts négatifs (réduction des impacts positifs, *i.e.*, réduction du stockage en « -kgCO2e/ha ») lorsque le changement d'usage ou de pratique est au détriment d'un précédent dont le stockage de carbone était plus important (Précédent IPCC + 10%) ; et vice versa.

Lorsque l'on compare les résultats dans le cadre de l'application de MW&B (2010), la tendance est similaire à la méthode IPCC pour l'impact de transformation. Avec les données spécifiques, les impacts sont plus importants, notamment dans le cas des scénarios de changements de pratiques. Néanmoins, pour l'impact d'occupation les résultats sont plus faibles. Ceci est lié au fait que les stocks de carbone spécifiques pour les usages étudiés et le cerrado (données spécifique pour la savane) sont plus importants ; de fait la différence de stock par rapport à l'état de référence, qui lui n'a pas été modifié, est moindre diminuant d'autant l'impact d'occupation.

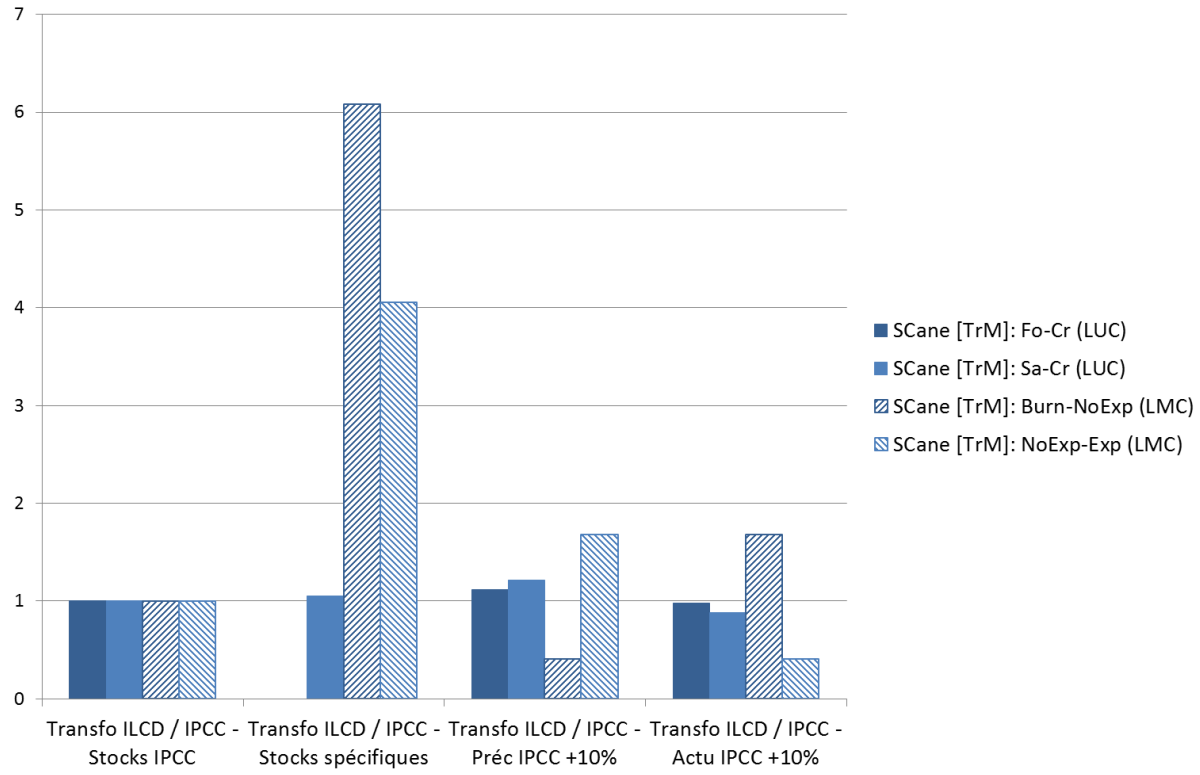


Figure 32: Sensibilité aux données de stocks des précédents et usages

Le choix de la référence joue un rôle clef dans la méthode MW&B 2010, il a notamment une influence décisive sur l'impact d'occupation. Ainsi de changement d'une référence forêt en cerradão pour l'état de référence, entraîne une diminution de l'impact d'occupation par un facteur de 3.5 environ.

3.2.4.4. Choix des paramètres temporels

La méthode de répartition temporelle des impacts a une influence forte sur les résultats d'impact de transformation (Figure 33). L'allocation dégressive sur 20 ans revient à allouer à l'année moyenne considérée environ 9% de l'impact total, contre 5% dans le cas d'une allocation linéaire. Cet effet se répercute directement sur les résultats. A l'inverse, dans notre cas d'étude, sur les bases des données utilisées pour l'ACV dynamique, ce pourcentage s'élève à 3% ou 1.5% pour une allocation dégressive ou linéaire sur la durée nécessaire pour l'atteinte de 90% du total des flux de carbone. Ainsi, dans ces cas, l'impact est logiquement plus faible par rapport au 5%. La logique est strictement identique dans le cas de la méthode MW&B 2010, puisque l'allocation est effectuée après le calcul d'impact.

Le temps de régénération influence également l'impact de transformation calculé selon la méthode MW&B 2010. L'influence du changement du temps de régénération est d'autant plus grande que les variations de stock sont faibles. D'autre part, si le changement d'un temps de régénération inverse la différence de durée entre l'usage précédent et l'usage étudié, le signe de l'impact peut être modifié. C'est-à-dire que même si l'usage étudié permet un plus grand stock de carbone que le précédent, l'augmentation du temps de régénération à l'état de référence depuis cet usage peut entraîner un impact en termes d'émissions nettes.

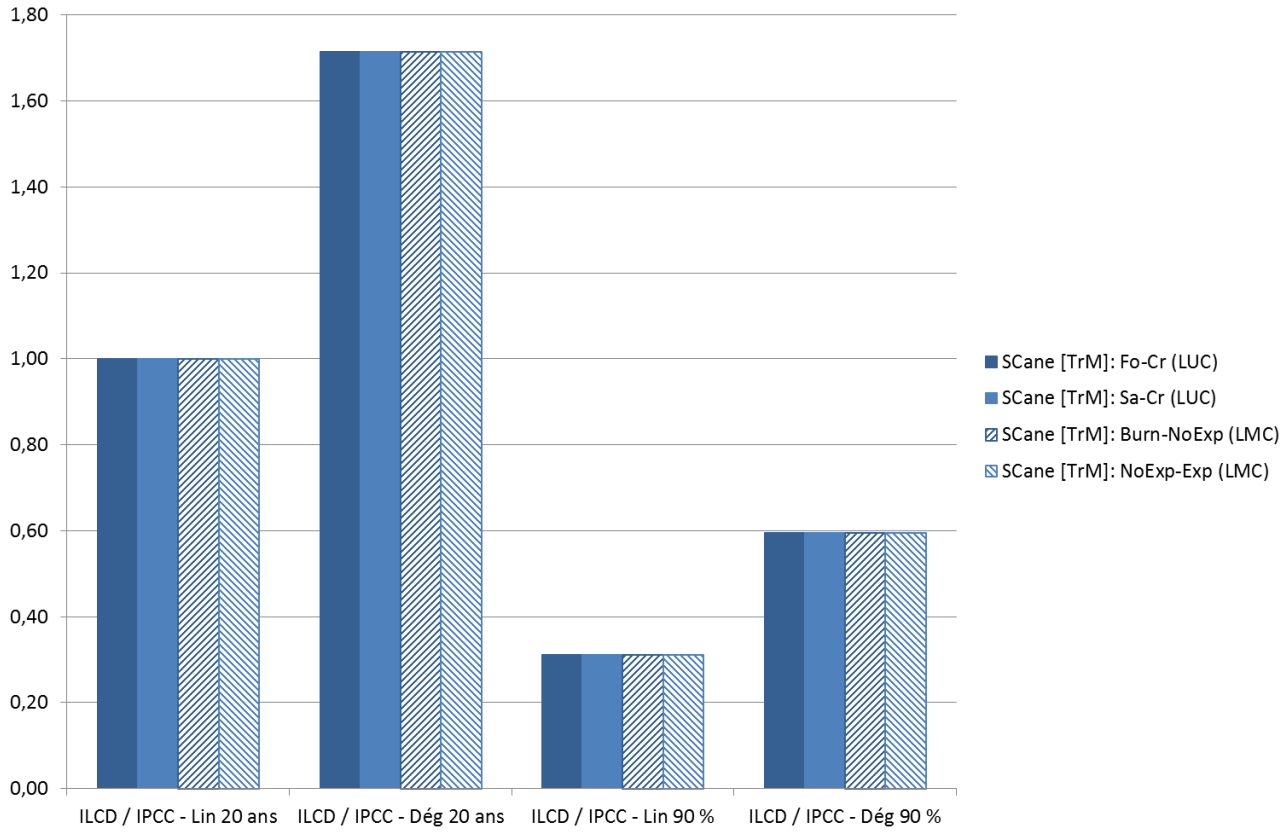


Figure 33: Sensibilité aux paramètres de répartition temporelle des impacts de transformation

3.2.5. Analyse pour le cas d'étude soja

Les principaux éléments d'interprétation et d'analyse des résultats obtenus pour les scénarios du cas d'étude soja sont les suivants :

- *L'impact est fort en cas de déforestation, notamment avec la méthode IPCC / ILCD, et est plus marqué en climat équatorial.*
  En effet, les impacts de transformation des scénarios de déforestation représentent, avec la méthode IPCC / ILCD, 18 fois ceux de l'inventaire en climat équatorial, et près de 13 fois ceux de l'inventaire en climat tropical humide. Bien que plus faibles en comparaison, ces impacts restent marqués avec la méthode Müller-Wenk & Brandão (2010), représentant plus de 4 fois et 3 fois ceux de l'inventaire pour, respectivement, le climat équatorial et le climat tropical humide.

- *De façon similaire, le bénéfice est important en cas de passage au non-labour, notamment avec la méthode IPCC / ILCD, et est également plus marqué en climat équatorial.*
  En effet, les impacts de transformation des scénarios de passage au non-labour sont négatifs, ce qui se traduit par un bénéfice climat. Ces bénéfices permettent de réduire, avec la méthode IPCC / ILCD, de plus de 80 % et de plus de 60 % les impacts de l'inventaire, en climats équatorial et tropical humide respectivement. En comparaison, ces bénéfices sont plus faibles avec la méthode

Müller-Wenk & Brandão (2010), représentant 15 % et 12 % des impacts de l'inventaire pour, respectivement, le climat équatorial et le climat tropical humide.

- *Les impacts d'occupation sont importants par rapport aux impacts d'inventaire, et variables selon le climat considéré.*

  En effet, les impacts d'occupation calculés avec la méthode Müller-Wenk & Brandão (2010), en considérant une référence de type Végétation Naturelle Potentielle (forêt), représentent près de 2,2 fois et près de 1,5 fois les impacts de l'inventaire, en climats équatorial et tropical humide respectivement. Au-delà de l'importance de ces impacts en valeur absolue, ceux-ci sont également variables selon la localisation selon la localisation puisque l'impact d'occupation est près de 50 % plus important au Nord de l'Etat du Mato Grosso (climat équatorial) qu'au Sud de l'Etat.

- *Le manque de données descriptives sur les dynamiques d'évolution des stocks de carbone rend difficile l'application de l'ACV dynamique, et les résultats obtenus avec cette méthode, lorsque celle-ci a pu être appliquée, se sont avérés proches de ceux obtenus par la méthode ILCD/IPCC et incertains.*

  Sur les six scénarios considérés pour le cas d'étude soja, l'ACV dynamique n'a pu être appliqué que sur deux : le cas de déforestation en climat équatorial (*Soy [TrW]: Fo-Cr (LUC)*), et le passage au non-labour en climat tropical humide (*Soy [TrM]: Ti-NoTi (LMC)*).

  Dans le cas du scénario de déforestation, l'essentiel de l'impact étant dû à la perte du stock de carbone de la biomasse aérienne, qui est instantanée, l'ACV dynamique modifie très peu les résultats par rapport à la méthode IPCC / ILCD.

  Dans le cas du scénario de passage au non-labour, les incertitudes dans l'obtention des dynamiques (voir fiche correspondante, paragraphe 7, page 87), de l'ordre de ± 15 % pour ce qu'il a été possible de quantifier, sont plus importantes que la différence entre ces résultats et celui obtenu avec la méthode IPCC / ILCD, de l'ordre de 10 % en moyenne.

- *Compte tenu de l'importance de la biomasse aérienne pour les scénarios de déforestation, les résultats d'impacts de transformation obtenus par les méthodes IPCC / ILCD et Müller-Wenk & Brandão (2010) sont peu sensibles aux incertitudes portant sur les stocks de carbone du sol.*

- *Inversement, pour les scénarios de passage au non-labour, les incertitudes sur les valeurs de stocks de carbone du sol ont un effet très important sur les résultats obtenus par les méthodes IPCC / ILCD et Müller-Wenk & Brandão (2010).*

  En effet, une sensibilité de ± 10 % sur les valeurs de stocks déterminées selon l'PCC se traduit par une variation de ± 30 % à ± 30 % sur les résultats d'impact, pour les deux méthodes. Ces valeurs sont à mettre en regard avec les incertitudes estimées par l'IPCC sur les stocks de carbone des sols dans ces conditions, de l'ordre de 50 %.

  Dans le cas du climat équatorial, l'utilisation de données spécifiques confirme cette analyse de sensibilité, le bénéfice du passage au non-labour étant alors réduit d'un facteur 10.

- *Selon les références utilisées, la Végétation Naturelle Potentielle, utilisée comme référence dans la méthode Müller-Wenk & Brandão (2010), peut être définie comme une forêt ou une savane arborée (cerrado), ce qui a un effet important sur les impacts de transformation et d'occupation calculés avec cette méthode.*

  En particulier, les impacts d'occupation déterminés avec une référence de type cerrado représentent environ 30 % de ceux déterminés avec une référence de type forêt.

- *Les résultats d'impacts de transformation calculés selon la méthode Müller-Wenk & Brandão (2010) se sont révélés très sensibles aux valeurs de temps de régénération, en particulier dans les scénarios de passage au non-labour.*

  Dans les scénarios de déforestation, une hausse de 10 % de la valeur du temps de régénération pour la culture de soja engendre une hausse de 10 % de l'impact. Dans les scénarios de passage

au non-labour, cette même hausse engendre une hausse de l'impact d'un facteur 3 lorsqu'elle est appliquée à l'usage précédent (labour), ou une inversion de l'impact lorsqu'elle est appliquée à l'usage actuel (non-labour).

4. Recommandations

La revue critique de la bibliographie et la mise en situation des méthodes retenues dans le cadre de filières contrastées ont permis de mettre en exergue les intérêts et limites concrètes des applications à ce jour des méthodes de prise en compte du carbone du sol dans les ACV pour caractériser les impacts des usages et changements d'usage des sols. Sur cette base, les recommandations issues du projet SOCLE se déclinent selon deux niveaux de technicité qui ne présagent pas de la finalité de l'ACV réalisée : le Niveau 1) regroupe les recommandations minimales à appliquer ; et le Niveau 2) désigne les usages plus avancés de la méthodologie ACV :

- Pour définir **l'occurrence des changements d'usage**, *i.e.*, depuis quels types d'usage et en quelles proportions, il est recommandé :
    - **Niveau 1** : d'appliquer une approche nationale, voire internationale selon les limites du système, basée sur des statistiques globales : *e.g.* modèle normatif de type Blonk. Tant que les données le permettent, une moyenne pondérée des précédents est à privilégier (*e.g.* approche de l'ENVIFOOD Protocol). Il est essentiel de s'assurer, dans l'application de cette approche, d'une cohérence temporelle entre l'analyse rétrospective des changements d'usage et la répartition temporelle prospective des impacts ; par défaut cette durée est de 20 ans ;
    - **Niveau 2** : d'appliquer ou de développer un modèle spécifique au cas d'étude de type « Causal Descriptive Model [3]» ou d'utiliser un modèle d'équilibre économique en particulier dans le cas d'une ACV conséquentielle. Dans ce cadre, il est également essentiel de veiller à la pertinence et la cohérence des échelles temporelles utilisées.
- Pour calculer **les variations de stock de carbone** liées à des changements d'usages ou de pratiques, il est recommandé :
    - **Niveau 1, en l'absence de données spécifiques** : d'appliquer l'approche IPCC 2006 Tier 1. Pour un même usage, les facteurs de pondération en lien avec le travail du sol et les intrants permettent de considérer quelques changements de pratiques affectant les stocks de carbone. Il est conseillé de faire une analyse de sensibilité sur les stocks de carbone considérés notamment lorsque le choix des facteurs de pondération est incertain ou éloigné des conditions du cas d'étude ;
    - **Niveau 1, lorsque des données spécifiques sont disponibles, et Niveau 2** : d'appliquer l'approche IPCC 2006 Tier 2 sur la base de données de terrain ou de modélisation. Il est important d'être vigilant sur la cohérence du jeu de données spécifiques utilisées par rapport à l'ensemble des calculs : *e.g.* cohérence temporelle pour les atteintes d'équilibre, cohérence avec les états de références ou les usages comparés en termes de stocks de carbone considérés, de profondeur du sol considérée, etc.
- Pour calculer **l'impact changement climatique** lié aux usages des sols et aux changements d'usages ou de pratiques, il est recommandé :
    - **Niveau 1** : de choisir une des deux méthodes recommandées à l'heure actuelle par les instances internationales, *i.e.* la méthode ILCD / IPCC ou la méthode Müller-Wenk and Brandão (2010) (UNEP-SETAC). Ce choix doit se faire en accord avec les objectifs et le champ de l'étude. Il est recommandé de considérer les principaux avantages et inconvénients des deux méthodes, synthétisés dans le Tableau 14, afin de mettre en œuvre et de justifier ce choix. Des tests de sensibilité sur les principaux paramètres (données de stock, état de référence, etc.) sont conseillés pour éclairer la pertinence et le domaine de validité des résultats.

[3] Les « causal descriptive models » permettent d'établir des relations de cause à effet entre des changements dans les systèmes de production et de consommation et les changements d'usage. Ils prennent en compte l'influence des marchés, mais de manière simplifiée par rapport aux modèles d'équilibre économique, et les données statistiques d'usage des sols et de productions pour construire les scénarios prospectives. Ils requièrent l'intervention d'expert pour construire ces scénarios et définir les relations de cause à effet susceptibles d'intervenir dans ces scénarios (*cf. Rapport de revue bibliographique SOCLE :* Benoist & Bessou, 2018).

Tableau 14 : Avantages comparés des méthodes IPCC / ILCD et Müller-Wenk and Brandão (2010)

	Méthode ILCD / IPCC	**Méthode Müller-Wenk & Brandão (2010)**
Reconnaissance scientifique	Méthode la plus couramment recommandée dans la littérature.	Méthode reconnue d'un point de vue scientifique mais peu recommandée en dehors de l'UNEP-SETAC et d'usage peu répandu.
Caractère opérationnel (utilisation des valeurs par défaut)	Méthode simple et globale, lorsque les valeurs par défaut de l'IPCC Tier 1 sont utilisées.	Méthode simple et globale, lorsque les facteurs de caractérisation et autres paramètres par défaut, tels que les temps de régénération, sont utilisés.
Caractère opérationnel (adaptation au contexte local)	Méthode facilement modifiable pour tenir compte de données spécifiques de stocks.	Méthode facilement modifiable pour tenir compte de données spécifiques de stocks, mais limitée par l'accessibilité des données pour définir des temps de régénération spécifiques.
Pertinence scientifique de la caractérisation des impacts	Méthode permettant de ne prendre en compte que les transformations d'usages des sols et de pratiques. Méthode traitant sur un pied d'égalité stockages et déstockages de carbone biogéniques d'une part, et émissions de gaz à effet de serre d'origine fossile d'autre part, négligeant notamment la réversibilité et la dynamique des stockages/déstockages.	Méthode permettant de prendre en compte à la fois les transformations d'usages des sols et les occupations. Méthode intégrant partiellement des informations concernant la dynamique des émissions, ce qui la rend plus complète en termes d'évaluation des impacts, mais également tributaire d'un plus grand nombre de paramètres spécifiques, *e.g.,* les temps de régénération, qu'il est difficile de calibrer.
Interprétation des résultats	Les impacts calculés ne dépendent que du précédent immédiat.	La signification des impacts calculés dépend de l'état de référence choisi. Son choix est primordial pour permettre la comparaison de situations ce qui est souvent le cas en ACV attributionnelle.
Conseils d'utilisation	Il est important de signaler que selon les référentiels, l'impact sur le changement climatique peut agréger la contribution des changements d'usages ou de pratiques à celle des autres émissions de gaz à effet de serre de l'inventaire, tel que recommandé par l'ILCD par exemple, ou être décomposé en deux indicateurs distincts présentant séparément ces deux contributions, tel que recommandé dans la norme ISO 14067 sur l'empreinte carbone par exemple. Le praticien doit alors bien spécifier dans quel référentiel l'ACV réalisée s'inscrit.	Dans un premier temps, il est recommandé de ne pas agréger les impacts d'occupation avec les autres sources d'impact sur le changement climatique.

- **Niveau 2** : d'appliquer la méthode Müller-Wenk and Brandão (2010) pour être cohérent avec le cadre conceptuel « land use » qui est également utilisé pour d'autres catégories d'impact (*i.e.* impacts sur la qualité des sols et la biodiversité) et contribuer à l'amélioration de l'approche. Il est conseillé, dans la mesure du possible, d'utiliser des données de stocks de carbone soit selon l'approche IPCC 2006 Tier 2, soit basées sur des mesures de terrain ou de modélisation. Il est recommandé de définir un état de référence qui soit en adéquation avec les objectifs et champs de l'étude ACV menée et d'être transparent sur le choix de cet état de référence et son influence sur les résultats. Dans la mesure du possible, il est également conseillé d'utiliser des données de terrain ou de modélisation pour caractériser les stocks de l'état de référence utilisé et quantifier les dynamiques de régénération. Dans tous les cas, il est conseillé de faire une analyse de sensibilité avec d'autres états de référence potentielle et/ou d'autres dynamiques de régénération ;
- **Niveau 1 & 2** : de considérer en plus, au niveau de l'inventaire, les pertes d'azote liées à la minéralisation de l'azote du sol dans le cas d'une perte de carbone du sol lié à un changement d'usages ou de pratiques selon l'approche IPCC 2006 Tier 1 ou Tier 2. Dans le cadre du Tier 2, il est conseillé, dans la mesure du possible, de considérer un ratio C/N issu de données de terrain ou de la littérature plutôt que le ratio par défaut IPCC.

- Pour effectuer **la répartition temporelle de l'impact de transformation**, quelle que soit la méthode appliquée pour calculer la variation de stocks et quel que soit l'indicateur final étudié (changement climatique ou qualité du sol), il est recommandé :
  - **Niveau 1 :** d'allouer les impacts selon un mode dégressif sur 20 ans, en accord avec les recommandations actuelles de l'ILCD. Ce mode d'allocation, tout aussi subjectif mais valide que l'allocation linéaire uniforme de l'IPCC, permet de mieux prendre en compte l'urgence climatique. D'autre part, il permet de réduire le risque d'impact tronqué dans le cas où rétrospectivement des systèmes de production de moins de 20 ans sont considérés sans que leur impact initial de transformation soit connu ;
  - **Niveau 2 :** d'allouer les impacts selon un mode dégressif sur le temps nécessaire à l'atteinte de 90% du changement de stock sur la base de données de terrain ou de modélisation. Cette allocation permet de mieux prendre en compte la dynamique naturelle des processus de stockage/déstockage de carbone. Ces résultats devraient être comparés dans le cadre d'une analyse de sensibilité avec d'autres modes de répartition temporelle.

Le projet SOCLE a permis de faire un état des lieux des méthodes existantes d'un point de vue à la fois conceptuel et opérationnel. Il a mis en exergue le manque crucial de données de terrain ou de modélisation fiables pour permettre de caractériser finement les changements de stock de carbone liés aux changements d'usage et de pratiques. Pour aller au-delà des facteurs de l'IPCC et couvrir plus largement l'ensemble des différentes pratiques des divers systèmes de production, des travaux de recherche sont nécessaires pour établir de nouvelles bases de données plus diversifiées et sensibles aux pratiques et aux contextes pédoclimatiques déclinés à des échelles plus fines.

Concernant les bases de données qui permettent de mettre en œuvre les méthodes existantes, le RMQS et l'HWSD constituent des sources de données d'intérêt. Cependant, le RMQS demeure lié aux délimitations administratives (régions) et aux couvertures de sol récentes (2013). D'une part le maillage géographique peut être peu adapté à l'évaluation d'une situation à une échelle infrarégionale. D'autre part, dans le cas d'une zone d'évolution rapide des usages des terres, les valeurs des stocks de carbone ne correspondent pas nécessairement aux valeurs d'équilibre sous l'usage étudié. Les valeurs de stock de carbone seraient plus représentatives des situations étudiées si des bases de données étaient développées sur les résultantes en termes de stocks de carbone des couples (propriétés intrinsèques des sols, usages des sols et pratiques). Ce genre de travaux a été à l'origine de la déclinaison des facteurs de pondération IPCC et pourrait être modélisés de manière plus fine.

Dans le cas des systèmes de pérennes, des valeurs de stocks de carbone dans la biomasse peuvent avoir un impact non négligeable sur le bilan final. Il serait nécessaire de développer des bases de données permettant de mieux quantifier ces biomasses en fonction des usages et des pratiques. Pour les différents types d'usage, une déclinaison plus fine serait également nécessaire pour estimer les quantités de biomasse résiduelle éventuellement valorisable sous forme de co-produits. L'attention accordée à la quantification des stocks de biomasse et des stocks de carbone dans le sol doit être cohérente.

Des travaux de recherche sont également nécessaires pour approfondir plus spécifiquement les valeurs de stocks utilisées pour caractériser certains usages particuliers (prairies temporaires, prairies permanentes, cultures pérennes) et les états de référence, naturels ou non, et les temps de régénération.
Le projet SOCLE a été l'occasion de mobiliser dans des tests exploratoires différentes sources de données, qui se sont avérées intéressantes :

- Mobilisation de données du RMQS, extraites spécifiquement pour les besoins de SOCLE, afin d'estimer des stocks de carbone pour des références régionales pour des cas d'étude métropolitains. Deux options ont été testées : l'utilisation en tant qu'état de référence, une valeur de stock de carbone maximale pour l'usage étudié et une valeur régionale médiane tout usage confondu. La comparaison des stocks de carbone des cas d'étude avec ces références régionales apporte un éclairage intéressant dans des travaux ACV. La mise à disposition d'extraction RMQS pour ces besoins est à étudier (conditions d'accès, clé d'interprétation des données statistiques, extraction fonction de la région mais également du type de sol ?).
- Mobilisation des estimations par le CITEPA de changements d'usage en France métropolitaine sur la base de Corine Land Cover et de statistiques régionales, en cours de validation. Celle-ci s'appuie sur des données plus fines que celles mobilisées par Blonk Consultants, 2013 et constitue par conséquent une source de données intéressantes. Cependant, son utilisation sur le cas d'étude vigne s'est avérée peu pertinente du fait que la vigne est rattachée à la catégorie cultures annuelles (conformément aux catégories d'usage définis par l'IPCC pour les inventaires). La définition de catégories plus fines serait nécessaire pour une mise en œuvre pour des ACV à l'échelle de produit. D'autre part, il s'agit d'estimations provisoires, qui doivent encore être confrontées à d'autres sources de données.

Concernant le choix de la méthode de calcul des impacts sur le changement climatique liés aux usages des sols et aux changements d'usages ou de pratiques, le projet SOCLE a permis de mieux comprendre les avantages et inconvénients respectifs des méthodes disponibles. Le projet a également permis de souligner que ce choix de méthode doit être conforme aux objectifs et champ de l'étude, et doit donc être réalisé d'un commun accord entre le praticien ACV, qui produit les résultats, et le commanditaire de l'étude d'ACV, qui les utilise. Afin d'être plus précis dans les recommandations du projet, il est donc nécessaire d'impliquer ces deux types d'acteurs au cours de différents tests ayant lieu dans différents contextes d'application de l'ACV.

5. Fiche thématique - Application de la méthode IPCC tier 1 pour déterminer les stocks de carbone du sol de différents usages : limites perçues et questions posées

5.1. Principes et intérêt de la méthode

La méthode IPCC propose une approche pour déterminer les stocks de carbone liés à des usages de sols. Elle a été développée pour permettre aux pays de réaliser leurs inventaires d'émissions de GES et absorption de CO_2 dans un cadre homogénéisé. Elle est valable à l'échelle mondiale.
L'approche Tier 1 propose une équation de détermination du stock à l'équilibre pour un usage donné. Les stocks sont évalués en fonction du type de sol, du climat, du type d'usage et du mode de gestion :

$$SOC = SOC_{ST} \times F_{LU} \times F_{MG} \times F_I$$

Avec
SOC = Stock de carbone du sol, en t C/ha
SOC_{ST} = Stock de carbone du sol natif, en t C/ha
F_{LU} = Facteur d'usage des Terres
F_{MG} = Facteur de management des Terres (pratique : L ou NL)
F_I = Facteur d'apport de carbone (pratique : ORG ou 0ORG)

Ses intérêts sont nombreux et en font aujourd'hui la méthode la plus répandue dans la littérature internationale pour l'évaluation des stocks de carbone du sol :

- la **généricité** et **l'exhaustivité** : applicable à toutes situations ;
- la **facilité de mise en application** : équations simples, calcul rapide, nombre réduit de données d'entrée, documentation détaillée, données par défaut disponibles ;
- **l'homogénéité** de la méthode entre filière et situations de production ; et
- la **reconnaissance** internationale.

En contrepartie, les évaluations sont peu sensibles aux spécificités des contextes pédoclimatiques et aux pratiques.

La mise en application de l'équation ci-dessus aux cas d'étude du projet SOCLE a tout de même mis en évidence quelques limites et incohérences dans la rédaction de la méthode.

5.2. Correspondances entre domaines climatiques, régions climatiques et zones écologiques

Limites perçues et questions posées :

Les documents de l'IPCC proposent différentes classifications, parfois imbriquées, pour la détermination de valeurs par défaut. Les dénominations des classes, parfois très proches entre ces classifications, a parfois engendré des difficultés dans la détermination des stocks de carbone, notamment entre les stocks natifs pour le sol, qui se réfèrent aux régions climatiques, et les valeurs par défaut pour la biomasse aérienne, qui se réfèrent aux zones écologiques. La question des critères de détermination des classes pertinentes pour chacun des cas d'étude s'est également posée.
Les principaux tableaux et l'arbre de décision qui ont permis de résoudre ces difficultés sont donnés ci-après (IPCC, 2006).

Figure 34 : Identification des catégories de climat selon IPCC 2006

TABLE 3.1
EXAMPLE STRATIFICATIONS WITH SUPPORTING DATA FOR TIER 1 EMISSIONS ESTIMATION METHODS

Factor	Strata
CLIMATE (see Annex 3A.5)	Boreal Cold temperate dry Cold temperate wet Warm temperate dry Warm temperate moist Tropical dry Tropical moist Tropical wet
SOIL (see Annex 3A.5)	High activity clay Low activity clay Sandy Spodic Volcanic Wetland Organic
BIOMASS (ECOLOGICAL ZONE) (see Figure 4.1, in Chapter 4 Forest Land)	Tropical rainforest Tropical moist deciduous forest Tropical dry forest Tropical shrubland Tropical desert Tropical mountain systems Subtropical humid forest Subtropical dry forest Subtropical steppe Subtropical desert Subtropical mountain systems Temperate oceanic forest Temperate continental forest Temperate steppe Temperate desert Temperate mountain systems Boreal coniferous forest Boreal tundra woodland Boreal mountain systems Polar
MANAGEMENT PRACTICES (more than one may be applied to any land area)	Intensive tillage/Reduced till/No-till Long term cultivated Perennial tree crop Liming High/Low/Medium Input Cropping Systems Improved Grassland Unimproved Grassland

Figure 3A.5.2 **Classification scheme for default climate regions. The classification is based on elevation, mean annual temperature (MAT), mean annual precipitation (MAP), mean annual precipitation to potential evapotransporation ratio (MAP:PET), and frost occurrence.**

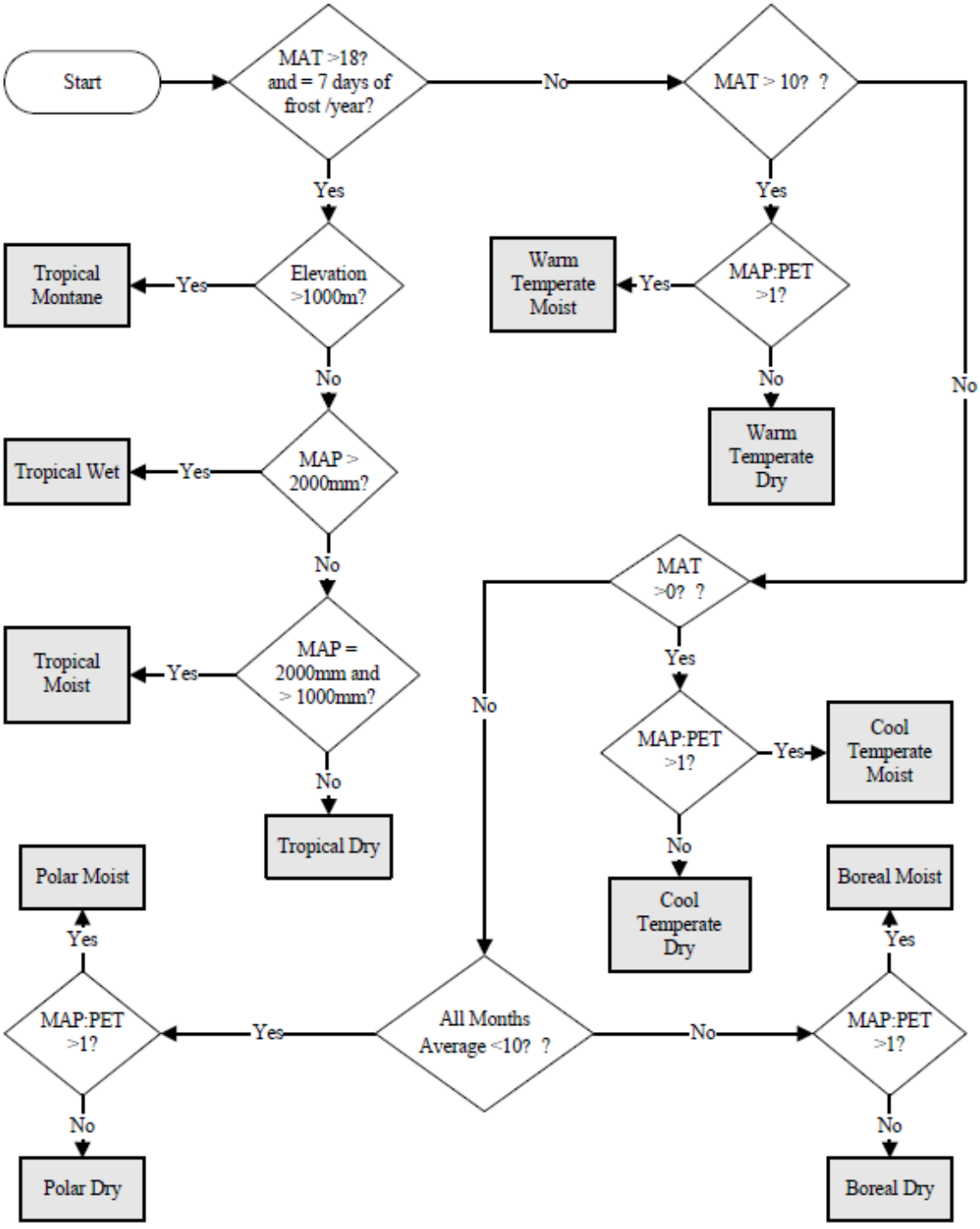


TABLE 4.1
CLIMATE DOMAINS (FAO, 2001), CLIMATE REGIONS (CHAPTER 3), AND ECOLOGICAL ZONES (FAO, 2001)

Climate domain		Climate region	Ecological zone		
Domain	Domain criteria		Zone	Code	Zone criteria
Tropical	all months without frost; in marine areas, temperature >18°C	Tropical wet	Tropical rain forest	TAr	wet: ≤ 3 months dry, during winter
		Tropical moist	Tropical moist deciduous forest	TAwa	mainly wet: 3-5 months dry, during winter
		Tropical dry	Tropical dry forest	TAWb	mainly dry: 5-8 months dry, during winter
			Tropical shrubland	TBSh	semi-arid: evaporation > precipitation
			Tropical desert	TBWh	arid: all months dry
		Tropical montane	Tropical mountain systems	TM	altitudes approximately >1000 m, with local variations
Sub-tropical	≥ 8 months at a temperature >10°C	Warm temperate moist	Subtropical humid forest	SCf	humid: no dry season
		Warm temperate dry	Subtropical dry forest	SCs	seasonally dry: winter rains, dry summer
			Subtropical steppe	SBSh	semi-arid: evaporation >precipitation
			Subtropical desert	SBWh	arid: all months dry
		Warm temperate moist or dry	Subtropical mountain systems	SM	altitudes approximately 800 m-1000 m
Temp-erate	4-8 months at a temperature >10°C	Cool temperate moist	Temperate oceanic forest	TeDo	oceanic climate: coldest month >0°C
			Temperate continental forest	TeDc	continental climate: coldest month <0°C
		Cool temperate dry	Temperate steppe	TeBSk	semi-arid: evaporation > precipitation
			Temperate desert	TeBWk	arid: all months dry
		Cool temperate moist or dry	Temperate mountain systems	TeM	altitudes approximately >800 m
Boreal	≤ 3 months at a temperature >10°C	Boreal moist	Boreal coniferous forest	Ba	coniferous dense forest dominant
		Boreal dry	Boreal tundra woodland	Bb	woodland and sparse forest dominant
		Boreal moist or dry	Boreal mountain systems	BM	altitudes approximately >600 m
Polar	all months <10°C	Polar moist or dry	Polar	P	all months <10°C

Climate domain: Area of relatively homogenous temperature regime, equivalent to the Köppen-Trewartha climate groups (Köppen, 1931).

Climate region: Areas of similar climate defined in Chapter 3 for reporting across different carbon pools.

Ecological zone: Area with broad, yet relatively homogeneous natural vegetation formations that are similar, but not necessarily identical, in physiognomy.

Dry month: A month in which Total Precipitation (mm) ≤ 2 x Mean Temperature (°C).

Options retenues dans le cadre du projet SOCLE :

Malgré cet arbre de décision, la mise en œuvre de la méthode sur les cas d'étude grandes cultures s'est avérée difficile, le ratio entre précipitations et évapotranspiration (MAP : PET) s'élevant à 1.04. Or, la valeur seuil définie par l'IPCC pour définir la catégorie de climat est de 1 (**Erreur ! Source du renvoi**

introuvable.). La catégorie Tempérée, chaude et humide a finalement été retenue, après confrontation des résultats de stock de carbone obtenus avec les mesures expérimentales.

5.3. Prairie temporaire = culture ou prairie?

Limites perçues et questions posées :

Le volume 4 des Guidelines IPCC, consacré à l'agriculture, est divisé en chapitres qui traitent des différentes sources d'émissions. Les différentes occupations des terres se retrouvent donc dans différents chapitres, dont le chapitre 5 sur les cultures (Croplands) et le chapitre 6 sur les prairies (Grasslands). Voici ce que précisent ces chapitres quant au champ couvert :

Chap 5 - Cropland	Chap 6 - Grassland
Cropland includes arable and tillable land, rice fields, and agroforestry systems where the vegetation structure falls below the thresholds used for the Forest Land category, and is not expected to exceed those thresholds at a later time. Cropland includes all annual and perennial crops as well as temporary fallow land (i.e., land set at rest for one or several years before being cultivated again). Annual crops include cereals, oils seeds, vegetables, root crops and forages. Perennial crops include trees and shrubs, in combination with herbaceous crops (e.g., agroforestry) or as orchards, vineyards and plantations such as cocoa, coffee, tea, oil palm, coconut, rubber trees, and bananas, except where these lands meet the criteria for categorisation as Forest Land. **Arable land which is normally used for cultivation of annual crops but which is temporarily used for forage crops or grazing as part of an annual crop-pasture rotation (mixed system) is included under cropland.**	Les méthodes et recommandations sont données pour les *prairies restant prairies* (section 6.2) et les *terres converties en prairies* (section 6.3).

Une zone de flou existe pour les prairies temporaires, qui sont des surfaces cultivées en herbe (graminées et /ou légumineuses) sur plusieurs années, sursemées ou en rotation avec des cultures, et qui présentent des dynamiques de stockage de carbone par le sol proches de la prairie permanente.
Ces surfaces ne sont pas explicitement nommées ni définies et leur classement dans le chapitre 5 ou 6 n'est pas clairement établi.

Ces systèmes sont pourtant évoqués dans le document :
Table 5.5 : … *frequent use of perennial grasses in annual crop rotations, but without manure applied*… (mais dans ce cas, qu'en est-il des rotations équivalentes avec apport d'effluents d'élevage?)
Figure 5.1 : … *mixed crop/grass system* …

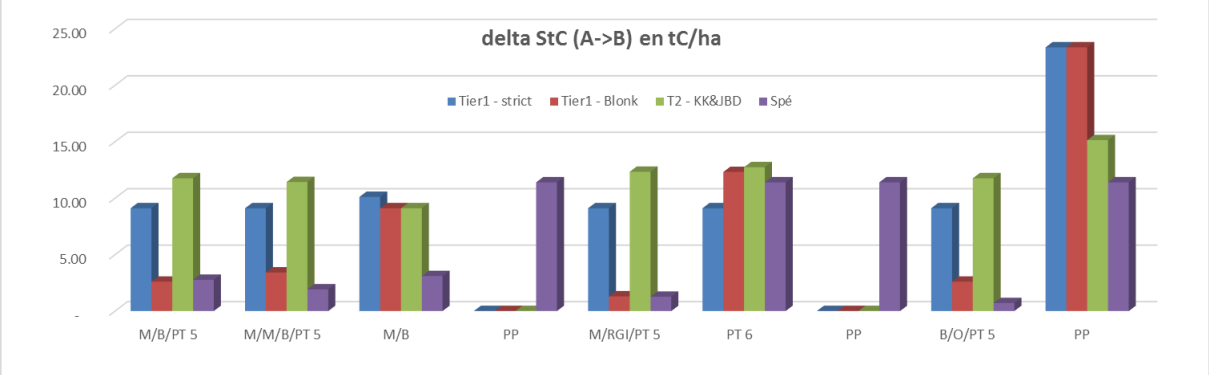
Options retenues dans le cadre du projet SOCLE : La prairie temporaire est une prairie (grassland) en rotation avec des cultures

Nous avons considéré dans le projet, que la prairie temporaire se comportait bien comme une prairie permanente vis-à-vis du carbone du sol et qu'elle se trouvait en rotation avec des cultures. Cela a conduit à calculer, pour une surface de ce type d'usage, un facteur de variation de stock pondéré à la rotation.

Notre interprétation de l'IPCC a été la même que dans les mises en applications suivantes :

- Blonk *(outil Carbon Sequestration pour le PEF Meat),* avec les facteurs par défaut IPCC
- JB Dollé & K Klump (o*util et annexe Carbon sequestration / release in grassland systems dans le cadre des PEF meat et PEF dairy ; in Tuomisto et al., 2015),* avec des facteurs complémentaires pour la prairie

Pour les différentes rotations et occupations du sol rencontrées dans les systèmes d'élevage étudiés dans les cas type SOCLE, nous avons calculé le différentiel de stock entre un usage A et un usage B en utilisant successivement la méthode IPCC Tier 1 « stricte » (les prairies temporaires sont des cultures), l'approche de l'outil Blonk (avec les facteurs par défaut), l'approche de Dollé et Klump (Tuomisto et al., 2015) (avec des facteurs enrichis pour la prairie) et des données spécifiques (simulations avec Simeos – AMG pour les surfaces en rotation et utilisation du facteur fixe de Dollé et al., 2013 de 570 kg C/ha pour la prairie permanente). Les écarts de résultats obtenus sont présentés dans le graphique ci-dessous qui montre la grande sensibilité des résultats en fonction de l'approche choisie.



5.4. Correspondance entre pratiques spécifiques et catégories proposées

Limites perçues et questions posées :

A l'image de la table 5.5 présentée ci-dessous, la méthode propose des grandes catégories génériques d'occupation ou de pratiques. Ainsi, le niveau de fertilisation est caractérisé de Low, Medium, High, mais sans spécifier les quantités apportées à l'hectare. Pour les prairies, les modes de gestions sont distingués en Improved grassland, Nominally managed, Moderately degrated et Severely degrated, mais sans en donner une définition suffisamment précise.

Les données collectées sur les cas d'étude SOCLE comprennent justement des informations quantitatives et précises sur les pratiques (enherbement, niveaux apport MO, …). Il a donc fallu les faire correspondre aux grandes catégories proposées par l'IPCC, ce qui laisse parfois place à l'interprétation.

TABLE 5.5 (CONTINUED)
RELATIVE STOCK CHANGE FACTORS (F_{LU}, F_{MG}, AND F_I) (OVER 20 YEARS) FOR DIFFERENT MANAGEMENT ACTIVITIES ON CROPLAND

Factor value type	Level	Temper-ature regime	Moist-ure regime[1]	IPCC defaults	Error[2,3]	Description
Input (F_I)	Low	Temperate/ Boreal	Dry	0.95	± 13%	Low residue return occurs when there is due to removal of residues (via collection or burning), frequent bare-fallowing, production of crops yielding low residues (e.g., vegetables, tobacco, cotton), no mineral fertilization or N-fixing crops.
			Moist	0.92	± 14%	
		Tropical	Dry	0.95	± 13%	
			Moist/ Wet	0.92	± 14%	
		Tropical montane[4]	n/a	0.94	± 50%	
Input (F_I)	Med-ium	All	Dry and Moist/ Wet	1.00	NA	Representative for annual cropping with cereals where all crop residues are returned to the field. If residues are removed then supplemental organic matter (e.g., manure) is added. Also requires mineral fertilization or N-fixing crop in rotation.
Input (F_I)	High with-out manure	Temperate/ Boreal and Tropical	Dry	1.04	± 13%	Represents significantly greater crop residue inputs over medium C input cropping systems due to additional practices, such as production of high residue yielding crops, use of green manures, cover crops, improved vegetated fallows, irrigation, frequent use of perennial grasses in annual crop rotations, but without manure applied (see row below).
			Moist/ Wet	1.11	± 10%	
		Tropical montane[4]	n/a	1.08	± 50%	
Input (F_I)	High – with manure	Temperate/ Boreal and Tropical	Dry	1.37	± 12%	Represents significantly higher C input over medium C input cropping systems due to an additional practice of regular addition of animal manure.
			Moist/ Wet	1.44	± 13%	
		Tropical montane[4]	n/a	1.41	± 50%	

[1] Where data were sufficient, separate values were determined for temperate and tropical temperature regimes; and dry, moist, and wet moisture regimes. Temperate and tropical zones correspond to those defined in Chapter 3; wet moisture regime corresponds to the combined moist and wet zones in the tropics and moist zone in temperate regions.

[2] ± two standard deviations, expressed as a percent of the mean; where sufficient studies were not available for a statistical analysis to derive a default, uncertainty was assumed to be ± 50% based on expert opinion. NA denotes 'Not Applicable', where factor values constitute defined reference values, and the uncertainties are reflected in the reference C stocks and stock change factors for land use.

[3] This error range does not include potential systematic error due to small sample sizes that may not be representative of the true impact for all regions of the world.

[4] There were not enough studies to estimate stock change factors for mineral soils in the tropical montane climate region. As an approximation, the average stock change between the temperate and tropical regions was used to approximate the stock change for the tropical montane climate.

Note: See Annex 5A.1 for the estimation of default stock change factors for mineral soil C emissions/removals for Cropland.

Options retenues dans le cadre du projet SOCLE

Choix des facteurs F_{LU}, F_{MG}, F_I utilisés pour la vigne :

Pour les cultures pérennes, les indications données dans les *Lignes directrices pour le calcul des stocks de carbone des terres pour l'utilisation de l'annexe V de la directive 2009/28/EC* (UE, 2010) de l'UE a été utilisée (cf. tables 3 et 4 ci-après). La vigne est une culture pérenne de milieu tempéré, Les niveaux de travail du sol et d'intrants sont donnés dans la table 3 ci-après, et les facteurs utilisés dans la table 4.

Table 3

Guidance on management and input for cropland and perennial crops

Management/ Input	Guidance
Full-tillage	Substantial soil disturbance with full inversion and/or frequent (within year) tillage operations. At planting time, little (e.g. < 30 %) of the surface is covered by residues.
Reduced tillage	Primary and/or secondary tillage but with reduced soil disturbance (usually shallow and without full soil inversion) and normally leaves surface with > 30 % coverage by residues at planting.
No till	Direct seeding without primary tillage, with only minimal soil disturbance in the seeding zone. Herbicides are typically used for weed control.
Low	Low residue return occurs when there is due to removal of residues (via collection or burning), frequent bare-fallowing, production of crops yielding low residues (e.g. vegetables, tobacco, cotton), no mineral fertilisation or nitrogen-fixing crops.
Medium	Representative for annual cropping with cereals where all crop residues are returned to the field. If residues are removed then supplemental organic matter (e.g. manure) is added. Also requires mineral fertilisation or nitrogen-fixing crop in rotation.
High with manure	Represents significantly higher carbon input over medium carbon input cropping systems due to an additional practice of regular addition of animal manure.
High without manure	Represents significantly greater crop residue inputs over medium carbon input cropping systems due to additional practices, such as production of high residue yielding crops, use of green manures, cover crops, improved vegetated fallows, irrigation, frequent use of perennial grasses in annual crop rotations, but without manure applied (see row above).

Table 4

Factors for perennial crops, namely multi-annual crops whose stem is usually not annually harvested such as short rotation coppice and oil palm

Climate region	Land use (F_{LU})	Management (F_{MG})	Input (F_I)	F_{LU}	F_{MG}	F_I
Temperate/Boreal, dry	Perennial crop	Full-tillage	Low	1	1	0,95
			Medium	1	1	1
			High with manure	1	1	1,37
			High without manure	1	1	1,04
		Reduced tillage	Low	1	1,02	0,95
			Medium	1	1,02	1
			High with manure	1	1,02	1,37
			High without manure	1	1,02	1,04
		No till	Low	1	1,1	0,95
			Medium	1	1,1	1
			High with manure	1	1,1	1,37
			High without manure	1	1,1	1,04

Les facteurs de gestion et d'entrées de carbone retenus sont récapitulés ci-après, selon les cas pratiques étudiés.

Tableau 15 : Facteurs d'Usage et de Pratiques pour l'application d'IPCC tier 1 sur les rotations des systèmes d'élevage

Système étudié	F_{Lu}	F_{Mg}	F_I
Vigne sol travaillé, inter-rang nu, sarments exportés	1	1	1
Vigne sol non travaillé, inter-rang nu, sarments exportés	1	1,1	1
Vigne sol travaillé, inter-rang nu, sarments retournés au sol	1	1	1,04
Vigne sol non travaillé, inter-rang enherbé, sarments exportés	1	1,1	1,04

Choix des facteurs F_{LU}, F_{MG}, F_I utilisés pour les systèmes élevage :

Tableau 16: Facteurs d'Usage et de Pratiques pour l'application d'IPCC tier 1 sur les rotations des systèmes d'élevage

		Rot1 - Milk1 [WTpM] : Ti-NoTi Rot1 - Milk2 [WTpM] : Ti-NoTi Rot1 - Beef [WTpM] : Ti-NoTi		Rot2 - Milk1 [WTpM] : Ti-NoTi		Rot3 - Milk1 [WTpM] : Ti-NoTi		Rot2 – Milk2 [WTpM] : Ti-NoTi	
		Usage A	Usage B	Usage A	Usage B	Usage A	Usage B	Usage A	Usage B
Partie culture	F_{LU}	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	/	/
	F_{MG}	1	1,15	1	1,15	1	1,15	/	/
	F_{I}	1	1	1	1	1	1	/	/
	$F_{LU\ x}\ F_{MG\ x}\ F_{I}$	0,69	0,79	0,69	0,79	0,69	0,79	/	/
	$F_{LU\ x}\ F_{MG\ x}\ F_{I)\ x}\ an_{\ culture}$	1,38	1,58	2,07	2,37	2,07	2.37	/	/
Partie prairie	F_{LU}	1	1	1	1	/	/	1	1
	F_{MG}	1	1	1	1	/	/	1	1.14
	F_{I}	1	1	1	1	/	/	1	1
	$F_{LU\ x}\ F_{MG\ x}\ F_{I}$	1	1	1	1	/	/	1	1.14
	$F_{LU\ x}\ F_{MG\ x}\ F_{I)\ x}\ an_{\ prairie}$	5	5	5	5	/	/	6	6.84
$F_{LU\ x}\ F_{MG\ x}\ F_{I)\ x}\ an_{\ culture} + F_{LU\ x}\ F_{MG\ x}\ F_{I)\ x}\ an_{\ prairie}$		6,38	6,58	7,07	7,37	2,07	2,37	6	6.84
Total/ ($an_{\ culture} + an_{\ prairie}$)		**0,91**	**0,94**	**0,88**	**0,92**	**0,69**	**0,79**	**1**	**1.14**

Tableau 17 : Valeurs des coefficients de pratiques et d'usages pour l'application d'IPCC tier 1 sur les prairies permanentes

	Gr - Milk1 [WTpM]		Gr - Milk2 [WTpM]		Gr - Beef [WTpM] : N-Imp	
	Usage A	Usage B	Usage A	Usage B	Usage A	Usage B
F_{LU}	1	1	1	1	1	1
F_{MG}	1,14	1,14	1	1	1	1,14
F_I	1,11	1,11	1	1	1	1,11
$F_{LU\ x}\ F_{MG\ x}\ F_I$	**1,27**	**1,27**	**1**	**1**	**1**	**1,27**

Choix des facteurs F_{LU}, F_{MG}, F_I utilisés pour les cas d'étude grandes cultures :

		PCQE T6	PCQE T5
Information descriptive itinéraire technique	**Type de produit**	Blé tendre d'hiver et maïs ensilage	Blé tendre d'hiver et maïs ensilage
	Région géographique	France, Pays de la Loire, Loire Atlantique, La Jaillière	France, Pays de la Loire, Loire Atlantique, La Jaillière
	Région climatique	T° moy annuelle = 12°C ; Précipitations/ETP = 1.04	T° moy annuelle = 12°C ; Précipitations/ETP = 1.04
	Type de sol	Luvisol → sol argileux très actif	Luvisol → sol argileux très actif
	Caractéristiques itk	Prairie de 1987 à 1995* Rotation MF/BTH à partir de 1996 TCSL à partir de 2007 (apports fumier bovin, couverts) Pas de couverts ni de PRO avant 2007 Pailles exportées	Rotation BTH/MF TCLS Couverts intermédiaires Apports de fumier ou lisier bovin Pailles exportées
	Rendement moyen	Blé : 73.9 q/ha ; maïs : 13.1 t MS/ha	Blé : 74 q/ha ; maïs : 11.1 t MS/ha
Mise en œuvre IPCC tier1	**SOC natif (t C/ha)**	88	88
	Facteur d'affectation des sols	Tempérée/boréale/humide 0.69	Tempérée/boréale/humide 0.69
	Facteur d'ajustement travail du sol	Labour complet 1	Pas de labour 1.15
	Facteur d'ajustement niveau d'intrants	Faibles 0.92	Modérés 1
	Stocks C sol à l'équilibre (t C/ha)	**56**	**70**
	Incertitude	22%	29%
	Stocks C sol à 100 ans (t C/ha), AMG	**50**	**57**

5.5. Des incohérences internes

Limites perçues et questions posées :

Entre différentes parties du document, nous avons rencontré des incohérences dans les options proposées. Le cas a été rencontré pour l'exemple d'une rotation de cultures, avec interculture et apport de fumier. La question est de savoir comment caractériser le niveau de carbone entrant dans le système de culture.
En suivant l'arbre de la Figure 5.1, le raisonnement conduit à sélectionner la classe « Medium » ; mais en suivant les descriptions données dans le tableau 5.5, on ne sait pas clairement s'il faut se classer dans la catégorie « Low » ou « Medium ».
Le rapport INRA InfoSOI (2013) propose également un arbre de décision, mais qui emprunte un autre chemin et conduit à une autre conclusion.

Figure 5.1 **Classification scheme for cropland systems. In order to classify cropland management systems, the inventory compiler should start at the top and proceed through the diagram answering questions (move across branches if answer is yes) until reaching a terminal point on the diagram. The classification diagram is consistent with default stock change factors in Table 5.5. C input classes (i.e., low, medium, high and high with organic amendment) are further subdivided by tillage practice.**

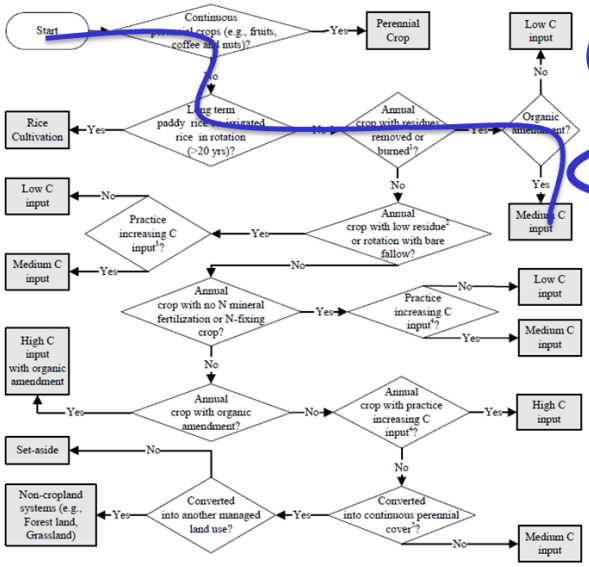


TABLE 5.5 (CONTINUED)
RELATIVE STOCK CHANGE FACTORS (F_{LU}, F_{MG}, AND F_I) (OVER 20 YEARS) FOR DIFFERENT MANAGEMENT ACTIVITIES ON CROPLAND

Factor value type	Level	Temperature regime	Moisture regime[1]	IPCC defaults	Error[2,3]	Description
Input (F_I)	Low	Temperate/ Boreal	Dry	0.95	± 13%	Low residue return occurs when there is due to removal of residues (via collection or burning), frequent bare-fallowing, production of crops yielding low residues (e.g., vegetables, tobacco, cotton), no mineral fertilization or N-fixing crops.
			Moist	0.92	± 14%	
		Tropical	Dry	0.95	± 13%	
			Moist/ Wet	0.92	± 14%	
		Tropical montane	n/a	0.94	± 50%	
Input (F_I)	Medium	All	Dry and Moist/ Wet	1.00	NA	Representative for annual cropping with cereals where all crop residues are returned to the field. If residues are removed then supplemental organic matter (e.g., manure) is added. Also requires mineral fertilization or N-fixing crop in rotation.
Input (F_I)	High without manure	Temperate/ Boreal and Tropical	Dry	1.04	± 13%	Represents significantly greater crop residue inputs over medium C input cropping systems due to additional practices, such as production of high residue yielding crops, use of green manures, cover crops, improved vegetated fallows, irrigation, frequent use of perennial grasses in annual crop rotations, but without manure applied (see row below).
			Moist/ Wet	1.11	± 10%	
		Tropical montane[4]	n/a	1.08	± 50%	
Input (F_I)	High – with manure	Temperate/ Boreal and Tropical	Dry	1.37	± 12%	Represents significantly higher C input over medium C input cropping systems due to an additional practice of regular addition of animal manure.
			Moist/ Wet	1.44	± 13%	
		Tropical montane[4]	n/a	1.41	± 50%	

[1] Where data were sufficient, separate values were determined for temperate and tropical temperature regimes; and dry, moist, and wet moisture regimes. Temperate and tropical zones correspond to those defined in Chapter 3; wet moisture regime corresponds to the combined moist and wet zones in the tropics and moist zone in temperate regions.
[2] ± two standard deviations, expressed as a percent of the mean; where sufficient studies were not available for a statistical analysis to derive a default, uncertainty was assumed to be ± 50% based on expert opinion. NA denotes 'Not Applicable', where factor values constitute defined reference values, and the uncertainties are reflected in the reference C stocks and stock change factors for land use.
[3] This error range does not include potential systematic error due to small sample sizes that may not be representative of the true impact for all regions of the world.
[4] There were not enough studies to estimate stock change factors for mineral soils in the tropical montane climate region. As an approximation, the average stock change between the temperate and tropical regions was used to approximate the stock change for the tropical montane climate.
Note: See Annex 5A.1 for the estimation of default stock change factors for mineral soil C emissions/removals for Cropland.

5.6. Des valeurs par défaut éloignées de celles de la littérature, de mesures ou simulations

Limites perçues, questions posées, options retenues:

Par exemple, pour les **stocks de C de la biomasse des cultures pérennes**, une seule valeur est proposée par zone climatique en différenciant 4 zones : tempérée, tropicale sèche, tropicale humide et tropicale très humide. Dans le cas de la vigne, cette valeur est de 43,2 t C/ha,. Cette valeur de stock de C dans la biomasse des pérennes en milieu tempéré est valable quelle que soit la culture considérée. Par exemple, des arbres fruitiers ou des ceps de vigne, ont la même valeur de stock, ce qui, a priori semble sous-estimé pour les vergers et surestimé pour la vigne. Cela nous a conduits, dans le cadre du projet à retenir une valeur issue de la bibliographie (Colin, Barnérias et al. 2009) de 3t C/ha.
En ce qui concerne les **stocks de C du sol sous la vigne**, quelle que soit la conduite considérée pour le travail du sol, l'enherbement de l'inter-rang ou l'apport de sarments, les valeurs fournies par l'IPCC sont systématiquement plus élevées que celles utilisées dans le projet (cf. cas d'étude vigne). Pour le cas de la garrigue méditerranéenne (qui est considérée comme une des végétations naturelles potentielles du cas d'étude vigne), la valeur du stock de C dans la biomasse est donnée selon les zones climatiques (tropicale,

subtropicale et tempérée), elles-mêmes déclinées selon les continents où elles se trouvent (Afrique, Amériques du Nord et du Sud, Asie continentale, Asie insulaire, Australie et Europe). Cette valeur correspond à celle d'une « brousse », i.e. « végétation composée de plantes ligneuses de moins de 5m de haut qui n'ont pas la physionomie d'arbres ». Cette valeur est de 37 t C./ha pour la zone subtropicale européenne du cas d'étude vigne du projet.

Concernant les **cas d'étude grandes cultures**, les estimations de stockage de carbone du sol avec la méthode IPCC tier 1 et celles obtenues avec AMG sont proches pour l'itinéraire technique sans fertilisation organique, sans couvert et avec labour tandis que l'écart est important pour l'itinéraire technique avec fertilisation organique, avec couvert et sans labour (70 t C/ha contre 57 tC/ha). Cette valeur de 70 tC/ha semble peu adaptée au contexte étudié : elle est également supérieure à la référence régionale RMQS maximale pour l'usage étudié.

Dans les **cas d'étude élevage**, les modalités de changement de pratique étudiées sont le passage d'un itinéraire associant fertilisation organique et labour à un itinéraire avec fertilisation organique et sans labour. L'estimation des stocks avec IPCC met en évidence un effet du non labour permettant d'accroitre les stocks, de 0.07 à 0.62 t C / ha / an en fonction des rotations étudiées. Cet effet est cependant discuté dans des travaux plus récents : l'effet n'est pas vérifié dans toutes les situations, par ailleurs le passage au sans labour peut conduire à des émissions induites de N_2O supplémentaires, ne constituant donc pas une pratique bénéfique pour le climat dans toutes les situations. Ainsi, Pellerin et al. (2013) mettent en évidence le caractère très variable des données de la bibliographie et retiennent pour cette option technique une valeur moyenne de stockage additionnel de 0,15 t C/ha/an, et des extrêmes de 0 et 0,3 t C/ha/an. Si les estimations obtenues ici avec IPCC Tier 1, sont généralement proches de la moyenne préconisée par Pellerin et al., certaines dépassent la valeur extrême supérieure : 0.46 t C/ha /an pour Rot3 - Milk1 [WTpM] : Ti-NoTi et 0.62 t C/ha /an pour Rot2 - Milk2 [WTpM] : Ti-NoTi.

6. Fiche thématique - Utilisation du modèle AMG pour déterminer les stocks de carbone du sol de différents usages

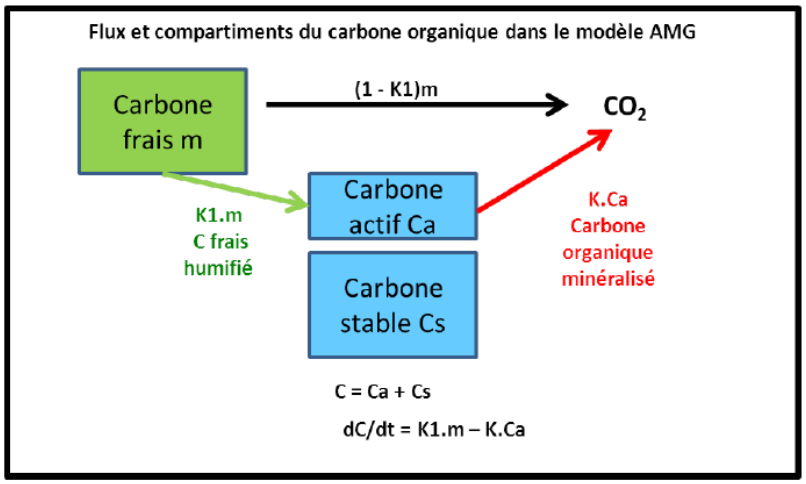
Lors la mise en application des différentes méthodes sur les cas d'étude, une analyse de sensibilité a été conduite par aux choix de la méthode utilisée pour estimer les stocks de carbone des usages étudiés : application du modèle IPCC tier 1 / une modélisation plus fine prenant en compte des données spécifiques au cas d'étude.

En seconde approche, le modèle AMG a été utilisé dans le cadre du projet pour déterminer des stocks de carbone pour les usages cultures annuelles, en rotation ou non avec des prairies temporaires ainsi que sur vigne.

Cette note a pour objectifs de faire le point sur le domaine de validité, les atouts et limites du modèle, et des différents outils qui l'intègrent, en vue d'alimenter des études ACV.

6.1. Principe du modèle

D'après Bouthier et al, 2014 et Duparque et al, 2011.
Le modèle AMG (du nom de ses auteurs : Andriulo, Mary, Guérif) a été mis au point dès 1999 par l'INRA de Laon (Andriulo et al, 1999).
Il a été adapté à partir du premier modèle de bilan humique réalisé en France par Hénin et Dupuis (1945). Celui-ci considère deux compartiments de carbone organique (CO) : apports de carbone frais m dans le schéma ci-dessous) par les résidus aériens et racinaires des cultures et des amendements organiques et carbone organique du sol (COS). Dans le modèle AMG, le pool de COS humifié est divisé en deux compartiments : un compartiment de carbone actif (Ca) et un second de carbone stable (Cs) qui est considéré totalement inerte sur le court et moyen terme (i.e. son temps de turnover est de l'ordre du millénaire). Le compartiment actif est le seul à être alimenté par les apports de carbone frais et affecté par la minéralisation annuelle (sorties).



Il a trois principaux paramètres:

- K1 = " coefficient d'humification ", ie. efficience de conversion des apports de carbone frais en carbone humifié ;
- K = taux annuel de minéralisation du Ca ;
- Cs/Co = proportion initiale de carbone stable (Co =teneur en COS initiale).

Selon les hypothèses de construction du modèle, k1 dépend uniquement de la nature des apports de carbone frais, alors que k dépend des caractéristiques du sol (teneur en argile et en carbonate de calcium,

pH et C/N des MO du sol[4]), du travail du sol (nature, fréquence et profondeur) et des conditions climatiques (température moyenne de l'air et bilan hydrique).
Par comparaison avec d'autres modèles plus complexes (Century), AMG constitue un modèle simple, dont les données d'entrées sont faciles à réunir. Il est notamment destiné à aider à la décision sur le mode de gestion de l'état organique du sol à l'échelle de la parcelle ou de l'exploitation.
Bien que simple, le modèle AMG est robuste et de bonne valeur prédictive pour simuler l'évolution à long terme des stocks de carbone des sols en grandes cultures (Saffih et Mary, 2008 ; Dinh, 2012 ; Duparque et al, 2013 ; Clivot et al, 2018, à paraître).

6.2. Les outils basés sur le modèle AMG

Le modèle a servi de base au développement de différents outils informatisés :

- SIMEOS-AMG : outil web (http://www.simeos-amg.org/) destiné aux conseillers, techniciens agricoles, agriculteurs, enseignants et étudiants, qui a été réalisé dans le cadre du projet 'Gestion et Conservation de l'Etat Organique des Sols' (GCEOS, 2004-2011, http://www.agro-transfert-rt.org/projets/gestion-conservation-etat-organique-des-sols/), mené à Agro-Transfert Ressources et Territoires. Il est accessible sous licence d'utilisation en version « complète » et librement en version « démo ». Les différences entre les 2 versions de l'outil accessibles en ligne tiennent principalement à la capitalisation des données saisies et à possibilité de réaliser directement des comparaisons de scénarios : ces fonctions ne sont pas accessibles en version démo
- Applications AMG ARVALIS et CHN (Labardesque M et al, 2017) : outils internes ARVALIS non destinés à la diffusion.

Les outils SIMEOS-AMG et applications ARVALIS s'appuient sur les développements conduits par le Consortium AMG[5] et reposent globalement sur le même paramétrage. Ils divergent cependant sur les points suivants :

- Simulation de l'évolution année par année dans le cas d'AMG ARVALIS tandis que SIMEOS-AMG simule l'évolution des stocks sur le long terme en s'appuyant sur des entrées et sorties comptabilisées pour chacune des années de cultures d'une rotation et ramenées à une moyenne annuelle.
- AMG ARVALIS estime l'évolution de la MO cm par cm tandis que SIMEOS-AMG l'estime sur l'ensemble de l'horizon travaillé ou de la zone de prélèvement. Du fait de ce choix, les deux outils ont retenu une méthode pour le calcul du stock de carbone stable différente.

Les deux outils (AMG-Arvalis version 2016-2017, Simeos-AMG version 1.2) ont fait l'objet de comparaisons afin de quantifier l'écart sur différentes situations. Ces travaux sont en cours de finalisation mais les premiers résultats permettent de chiffrer un écart de l'ordre de 5%.

6.3. Domaine de validité

6.3.1. Situations pédo-climatiques

Le modèle a été évalué sur une base de données d'essais de longue durée répartis sur le territoire de de France métropolitaine (Dinh, 2012 ; Clivot et al, 2018, à paraître). La validation du modèle AMG reste encore à préciser et paramétrer pour les sols très riches en matière organique, les sols hydromorphes et les sols sous prairie permanente ou récemment affectés par des changements d'usage : retournement d'une prairie, déboisement…

[4] Les paramètres pH et C/N des MO du sol sont intégrés à la fonction de calcul de k dans la nouvelle version du modèle AMG, qui sera publiée en 2018 (Clivot et al, à paraître)
[5] Consortium réunissant Agro-Transfert- Ressources et Territoires, Arvalis Institut du végétal, INRA (US1158 AGRO-IMPACT Laon-Mons, UMR 1401 ECOSYS INRA Agroparistech Grignon, UMR TCEM Bordeaux), LDAR (Laboratoire d'Analyses et de Recherche de l'Aisne), ayant pour objectif de maintenir un cœur de modèle commun, de faciliter son évaluation, ainsi que de permettre son amélioration et sa validation.

6.3.2. Cultures et pratiques couvertes

a) Cultures couvertes

Le modèle est paramétré pour les principales cultures annuelles.

Liste des cultures principales actuellement couvertes par AMG (outil SIMEOS-AMG v1.3, 2018 et application ARVALIS) (**en bleu**, cultures spécifiques à Simeos-AMG V1.3 de 2018).

Céréales	Protéagineux	Oléagineux	Cultures industrielles dont légumes	Légumes	Cultures fourragères
avoine p&h blé dur blé tendre p&h orge p&h seigle triticale maïs grain **sarrazin** **sorgho**	féverole **lentille** **lupin** pois prot. **soja**	**cameline** colza p&h **colza h associé** **moutarde noire** lin oléagineux tournesol **chanvre (chènevis)**	betterave sucrière carotte industrielle endive épinard haricot vert **haricot flageolet** lin fibre pois conserve pomme de terre (conso, fécule, plant) salsifis	ail carotte légumière chicorée chou (fleur, brocoli, Bruxelles, fourrager, pommé) laitue oignon poireau	betterave fourr. luzerne maïs fourrage RGA RGI

p : culture de printemps ; h : culture d'hiver

La pratique des cultures intermédiaires (CI) et des cultures dérobées (CD) est prise en compte : deux listes respectivement de 60 espèces de CI et de 20 espèces de CD sont disponibles au choix, dans la version 1.3 de Simeos-AMG. Pour introduire une CI dans la rotation, celle-ci est sélectionnée dans la liste déroulante puis l'utilisateur indique sa fréquence d'intervention et la biomasse aérienne produite au moment de l'enfouissement (4 classes de biomasse). L'introduction d'une culture dérobée reprend le même schéma de saisie que celle des cultures principales.

b) Technique de travail du sol

Le recours au labour et la profondeur du travail du sol influence la minéralisation du carbone actif du sol. Le paramétrage de l'effet du travail du sol est cependant à actualiser (cf. développements en cours et à venir) afin de tenir compte des derniers résultats obtenus sur des essais longue durée. En l'état actuel, le paramétrage de Simeos-AMG (v1.2) pour ce facteur s'appuie sur les résultats observés il y a 30 ans sur l'essai travail du sol de Boigneville. Les résultats actuels de la comparaison du labour au non labour à Boigneville et de synthèses bibliographiques internationales récentes conduisent à nuancer la prise en compte de l'effet du travail du sol. Si le calcul des comparaisons des stocks sont réalisés de façon très rigoureuse (comparaisons de date à date sur une même masse de terre), les différences de stocks de C organique constatées sur le long terme entre ces deux modes de conduite du sol sont nulles à Boigneville (Dimassi et al, 2013 et 2014), ou faibles (Virto et al, 2012 ; Meurer et al, 2018). Sur la base des travaux cités, un nouveau paramétrage du modèle AMG sera proposé en 2018 (en cours de travail dans le cadre du projet SoléBIOM[6]).

c) Fertilisation organique

Ce module permet de calculer les apports au sol de C organique par les PRO (Produits Résiduaires Organiques) en s'appuyant le choix d'un PRO dans une liste préétablie, en indiquant la fréquence d'apport

[6] Projet SOLéBIOM (2015-2018 ; AàP SAS PIVERT 2014) : « Evaluation de prototypes de systèmes de grande culture orientés vers la production de biomasse pour la bioraffinerie, vis à vis de la préservation du bilan de carbone organique des sols à long terme », porté par Agro-Transfert-RT en partenariat avec l'INRA (UR Agro-Impact Laon, UMR Ecosys Grignon), Terres Inovia et Arvalis Institut du Végétal. L'objectif du 1er axe du projet est l'amélioration du modèle AMG.

du PRO choisi dans la rotation et la dose d'apport. La liste actuelle (versions 1.2 et 1.3 de Simeos-AMG) propose 30 produits, paramétrés suivant leur teneur en C organique (kg C org/ t de produit brut) et par un coefficient isohumique k1. Elle est composée de 21 PRO classiques + 9 PRO fictifs balayant une gamme de types de produits en croisant le niveau de teneur en Corg (3 classes) et la valeur de k1 (3 classes).

6.4. Les données d'entrée nécessaires

Données pédologiques	Données climatiques	Données pratiques culturales
argile vraie (après décarbonatation en sol si la teneur en $CaCO_3$ du sol l'implique)	Température	Rotation
$CaCO_3$ total	Pluie	Rendement aux normes /culture
Cailloux	ETP	Gestion des résidus (fréquence de restitution par culture de la rotation)
pH *		Cultures intermédiaires (nature ; fréquence dans la rotation ; classe de biomasse produite)
C organique		Cultures dérobées (nature ; rendement ; fréquence dans la rotation)
C/N de la MO du sol *		Fertilisation organique : nature, fréquence d'apport et dose
Densité apparente (connue ou estimée)		Travail du sol (labour/non labour), profondeur de travail
		Irrigation

* : pris en compte en version v2 d'AMG (Clivot et al, 2018) et v1.3 de Simeos-AMG

Le stock de C organique initial est une des données d'entrées qui influencent le plus l'évolution du bilan humique, d'où l'importance d'une détermination rigoureuse de cette grandeur. Le modèle est également sensible aux entrées de carbone, directement indexées sur les rendements indiqués en données d'entrées, et modulées par les règles de gestion des résidus de culture (retour à la parcelle des pailles). Enfin, parmi les conditions pédoclimatiques, la modulation de la minéralisation potentielle est particulièrement sensible à la température moyenne annuelle, aux teneurs en argiles, ainsi qu'au $pH_{eau\ du\ sol}$.

6.5. Développement en cours et à venir

La nouvelle version du modèle AMG (V2) en cours de publication (Clivot et al, 2018, à paraître) intègre la nouvelle fonction de minéralisation de la MO du sol développée initialement dans STICS[7] (Clivot et al., 2017) et comprenant la prise en compte du pH et du C/N des MO. Cette fonction est intégrée à la version 1.3 de Simeos-AMG et le sera prochainement (1er semestre 2018) à l'outil AMG-Arvalis. La modification du mode de prise en compte de l'effet du travail du sol sur la vitesse de minéralisation annuelle est encore en cours de travail.

L'intégration d'une calculette permettant de visualiser les biomasses des résidus des différentes cultures de la rotation à la version 1.3 de Simeos-AMG permet d'affiner l'analyse des contributions des différentes

[7] Modèle STICS : Brisson et al, 2008.

cultures à l'apport de carbone frais au sol. Jusqu'à présent, seules les quantités de biomasse aérienne et racinaires globales à l'échelle de la rotation étaient consultables.

Le paramétrage du modèle AMG pour tenir compte des prairies (en culture pluriannuelle de longue durée et/ou prairies permanentes) est envisagé, en lien direct avec celui du modèle STICS. Des travaux sont prévus sur ce sujet en 2018 à l'INRA.
Des travaux sont en cours dans le cadre de SOLéBIOM (travaux de l'équipe de Sabine Houot – INRA ECOSYS Grignon) pour affiner et adapter les valeurs des k1 des PRO classiques. Il s'agit notamment d'examiner dans quelle mesure la valeur de l'indicateur ISMO (Indice de Stabilité des Matières Organiques ; Lashermes et al, 2009) déterminable en laboratoire, peut être assimilé au k1 des PRO ou servir à le déterminer. L'intérêt de prendre en compte une fraction stable du C organique des PRO qui alimenterait le compartiment de C organique stable du sol est à l'étude dans le cadre de ce projet. Dans ce cadre, des références pour le fumier bovin ont déjà été utilisées pour partitionner le carbone total apporté par ce type de PRO. La grande diversité de produits et la rareté des références disponibles rend ce type d'amélioration du paramétrage complexe. Les échéances de valorisation des avancées de ces travaux dans les outils restent à préciser.

6.6. Points forts et points de vigilance pour une utilisation en vue d'alimenter des ACV

Points forts	Points de vigilance
• La mise en œuvre simplifiée par l'existence d'outils (logiciels) facilement accessibles et disponibles. • Le nombre de données d'entrée réduit et communément accessibles. • La prise en compte des pratiques agricoles des systèmes de grandes cultures annuelles, notamment : cultures intermédiaires, apports de produits organiques interculture. • Les nombreuses cultures paramétrées. • L'estimation de valeurs de stocks de C à l'équilibre combinant les effets des pratiques agricoles	• La forte sensibilité à la valeur du stock de C initial du sol et le besoin d'une valeur fiable pour cette donnée d'entrée. • La validation du modèle se limite à la France métropolitaine, bien que la forme initiale du modèle (Hénin-Dupuis) soit générique. • Le modèle n'est pas validé pour des sols très riches en matière organique, des sols hydromorphes : il n'est pas adapté pour simuler l'évolution de C du sol quand le stock de C initial est trop élevé (sols sous prairie permanente ou récemment affectés par des changements d'usage : retournement d'une prairie permanente ou temporaire, déboisement, …).

7. Fiche thématique – Obtention de dynamiques d'évolution de stock de carbone du sol

Une description des dynamiques d'évolution des stocks de carbone lors de changements d'usages ou de pratiques s'est révélée nécessaire pour l'application d'une méthode et d'un élément de méthode utilisés au cours du projet SOCLE :

- L'ACV dynamique, pour laquelle une description complète de la dynamique est nécessaire, c'est-à-dire l'évolution annuelle des stocks ; et
- La répartition temporelle des impacts de transformation, pour laquelle une des options utilisée nécessite de connaître la durée nécessaire pour que se réalise 90 % de l'évolution entre deux stocks d'équilibre.

Pour cela, à travers les différents cas d'étude du projet, trois types de sources de données ont été mobilisés :

- Des relevés expérimentaux de terrain,
- Des modèles mécanistes, calibrés et paramétrés pour les conditions pédoclimatiques et pour les usages ou pratiques étudiés, ou
- Des données de la littérature.

Le **Tableau 18** ci-dessous récapitule les sources de données utilisées dans le cadre du projet pour chaque cas d'étude.

Tableau 18 : Ensembles des sources de données utilisées pour chaque cas d'étude et apport

Cas d'étude		Source de données utilisée	Source alternative
Blé Maïs ensilage	NC	AMG	
	LUC (forêt-> culture)	/	
	LUC (prairie -> culture)	/	
	LMC	AMG	
Systèmes lait	LMC	AMG	
Système viande	LMC	AMG	
Vigne	LUC (garrigue -> vigne)	AMG	Roth-C
	LUC (forêt -> vigne)	AMG	Roth-C
	LMC	AMG	/
Soja	LMC	Traitement de données expérimentales issues de la littérature selon le modèle Hénin-Dupuis)	/
	LUC (forêt -> culture)	Roth-C (données issues de la littérature)	
Canne à sucre	LMC	CENTURY (données issues de la littérature)	
	LUC (forêt -> culture)	Pas de données disponibles	

NC = No Change, LUC = Land Use Change, LMC = Land Management Change

Cette fiche a pour objectif de formaliser l'expérience acquise au cours du projet dans ces trois situations.

7.1. Utilisation de relevés expérimentaux de terrain

Voir fiche « Exploitations de mesures ».

7.2. Utilisation de modèles mécanistes

L'utilisation de modèles mécanistes permet d'accéder à des données cohérentes, en particulier lorsque des données primaires, issues d'enquêtes, d'expérimentation ou de statistiques spécifiques du cas étudié font défaut. Leur utilisation est notamment indispensable pour la mise en œuvre de l'ACV dynamique, car elle nécessite d'estimer les flux de carbone et de GES annuellement. Dans le cas des cultures pérennes, cet inventaire pluriannuel prend tout son sens pour quantifier, de manière la plus adaptée et cohérente possible, les émissions et variations de stock de carbone au cours des différentes phases du cycle (cf. fiche sur les spécificités des cultures pérennes).

7.2.1. Modèles et ACV dynamique

Dans le cas de la culture de la vigne, l'obtention des dynamiques a été réalisée avec les modèles AMG et RothC pour estimer les variations annuelles de carbone organique des sols (SOC) issus de changements d'usage ou affectation des sols (CAS) et de changements de pratiques. Ils ont également permis d'estimer les stocks de C du sol à l'équilibre dans les scénarios d'étude, pour les situations avant et après les changement étudiés. L'utilisation de ces deux modèles n'est qu'une étape dans l'obtention des dynamiques car ils ne prennent pas en compte le carbone stocké dans la biomasse.

L'utilisation de modèles permet également de donner une cohérence aux données expérimentales, et de reconstituer une évolution continue des stocks, en particulier quand les mesures disponibles le sont pour des dates éloignées (cf. cas du soja Figure 36 et section 7.3). Dans le cas de systèmes de culture pour lesquels on dispose d'un suivi expérimental annuel, l'utilisation d'un modèle requiert d'harmoniser au préalable les données d'entrée (cf. section 7.1). C'est-à-dire de conserver, dans l'itinéraire technique, celles qui sont les plus pertinentes vis-à-vis de l'étude, car en réalité, il n'est jamais reproduit à l'identique année après année pour une culture donnée d'une rotation. Dans le cas illustré dans la figure ci-après (Figure 35), il s'agissait d'un changement de pratiques actuelles courantes vers des pratiques plus favorables au stockage de carbone.

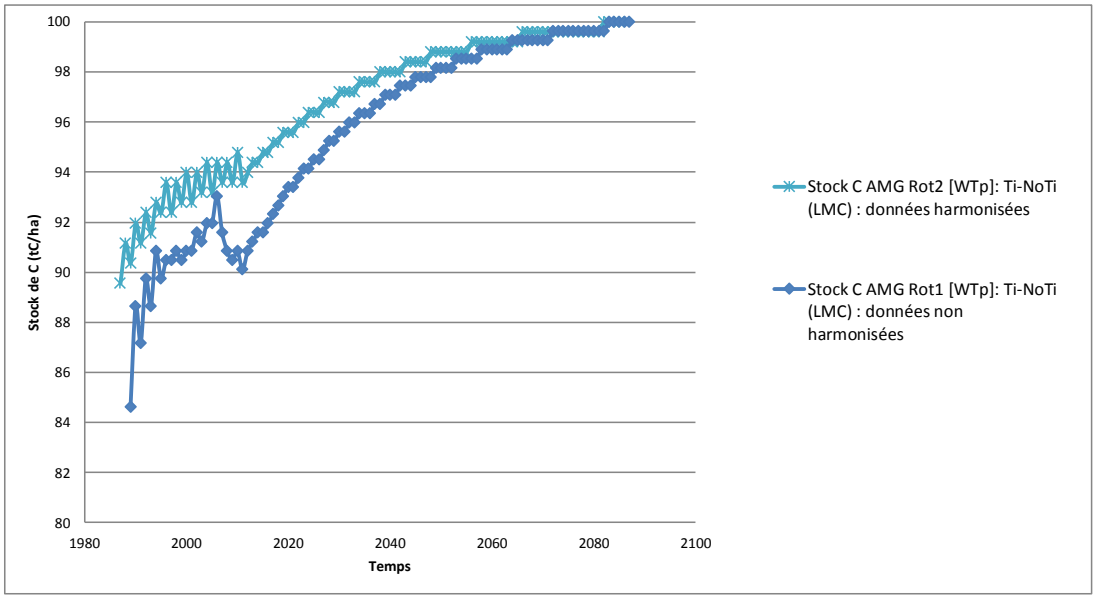


Figure 35 : Exemples de dynamiques de C simulées avec AMG pour un même système de culture (avant et après harmonisation des données d'entrée du modèle).

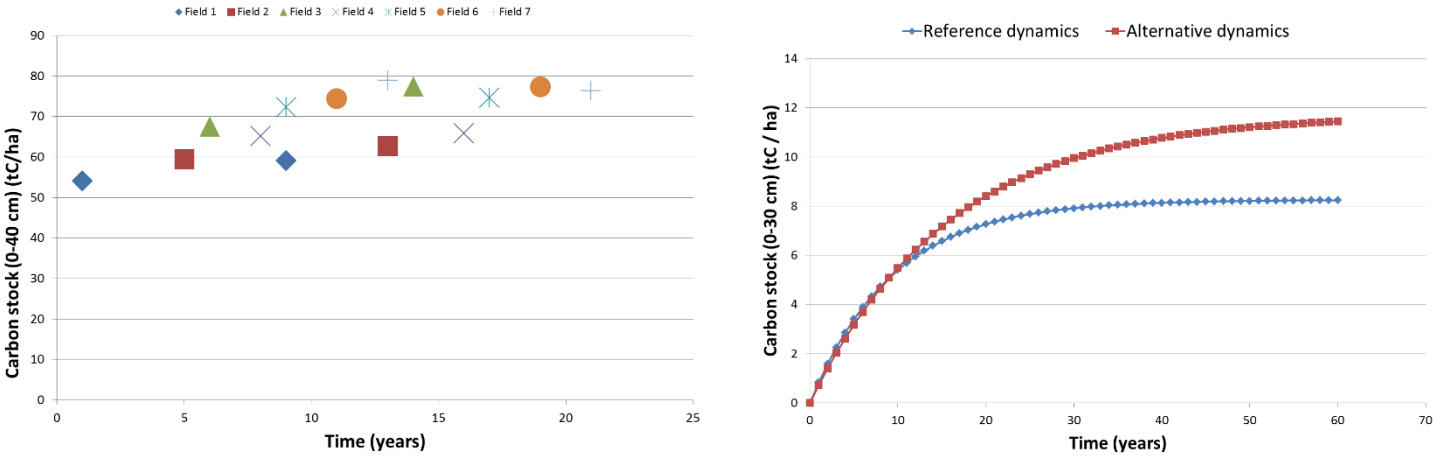


Figure 36 : Exemple d'une dynamique de C du sol reconstituée à partir de mesures de stock de C sur la zone cultivée (cas du soja) : à gauche données expérimentales pour 7 parcelles ; à droite, évolution des stocks de C du sol reconstitués avec le modèle Hénin-Dupuis pour la zone à partir des données expérimentales.

Les modes d'utilisation et recommandations de l'utilisation des modèles développés ci-après sont issus des travaux menés sur la vigne dans le projet.

7.2.2.Utilisation du modèle Siméos-AMG

L'utilisation du modèle AMG (cf. fiche sur le modèle AMG) est assez simple, de nombreuses cultures sont paramétrées et les données d'entrée à renseigner sont généralement accessibles (rendements annuels, type de travail du sol, teneur en calcaire et en argile de la couche travaillée, stock de carbone du sol au début de la simulation, données météo annuelles pré-paramétrées pour certaines zones métropolitaines).

Si on utilise Siméos-AMG, il est nécessaire de recalculer l'évolution annuelle du stock de C du sol, en effet, le modèle simule l'évolution au pas de temps de la durée de la rotation, puis à moyen-long terme. Pour cela, il faut diviser par le nombre d'années de la rotation les évolutions du stock de C du sol. Cependant, ce n'est pas très satisfaisant pour accéder à des variations annuelles de stock de C du sol.

Ainsi, il est plus adapté d'utiliser la version « recherche » du modèle, pour simuler l'évolution annuelle du stock de C du sol. Dans cette version, les quantités de C entrant dans le sol par la biomasse (aérienne et racinaire) doivent être entrés directement par l'utilisateur. D'après travaux de A. Duparque et B. Caruel (Caruel 2013; Duparque, Caruel et al. 2014), ces valeurs ont pu être :

- 1/ calculées avec Siméos-AMG adapté pour simuler : la vigne, les retours de sarment au sol et l'effet d'un enherbement inter-rang,
- 2/ entrées dans AMG-recherche pour simuler l'évolution annuelle du stock de C du sol.

Cependant, **le modèle AMG, quelle que soit sa version, n'est pas valide ni utilisable dans les cas où la situation de référence est de la forêt ou un autre état naturel avec une valeur de SOC élevée**. Il s'agit d'un outil **adapté pour évaluer l'impact des changements de pratiques sur le SOC**. Cependant AMG a pu être utilisé avec un sol de référence « Garrigue » (scénario « Garrigue vers une vigne labourée, sarments exportés et sans enherbement de l'inter-rang ») car celui-ci ne présente pas une valeur de SOC élevée.

Utilisation du modèle RothC

L'utilisation de RothC est plus compliquée que celle de Siméos-AMG et AMG, à cause des données nécessaires en entrée qui sont plus nombreuses, avec un pas de temps mensuel et qui peuvent être peu disponibles (par exemple : quantité de C mensuelle issue de la plante entrant dans le sol). Cependant, en théorie, tout est paramétrable, ainsi, il est possible d'évaluer à la fois un CAS et un changement de pratique à condition de disposer des données.

Dans le cas d'un changement de pratique, il est particulièrement compliqué d'accéder à des données de quantité de C mensuelle issue de la plante et entrant dans le sol, par exemple pour le scénario « avec labour» et « sans labour ». Seul le scénario de la vigne avec un CAS a été simulé avec RothC. Les valeurs d'entrée mensuelle de C issu de la plante peuvent être calculées par RothC en mode inverse, à condition de posséder une valeur de SOC à l'équilibre. A partir de cette valeur, RothC peut estimer les quantités de C mensuelles issues de la plante et entrant dans le sol, pour que la valeur de SOC à l'équilibre soit possible.

Cette utilisation est complexe car il y a besoin de faire plusieurs allers-retours entre le mode normal et le mode inverse.

7.2.3.Conclusion sur les modèles et leur utilisation

Sur le scénario « Garrigue vers une vigne labourée, sarments exportés et sans enherbement de l'inter-rang », les résultats à 100 ans sont quasiment identiques pour les 2 modèles. Les dynamiques calculées sont différentes surtout les toutes premières années (RothC présente des delta SOC supérieurs à ceux simulés par AMG jusqu'à une vingtaine d'années), mais sur 50 ans les deltas SOC sont quasiment identiques.

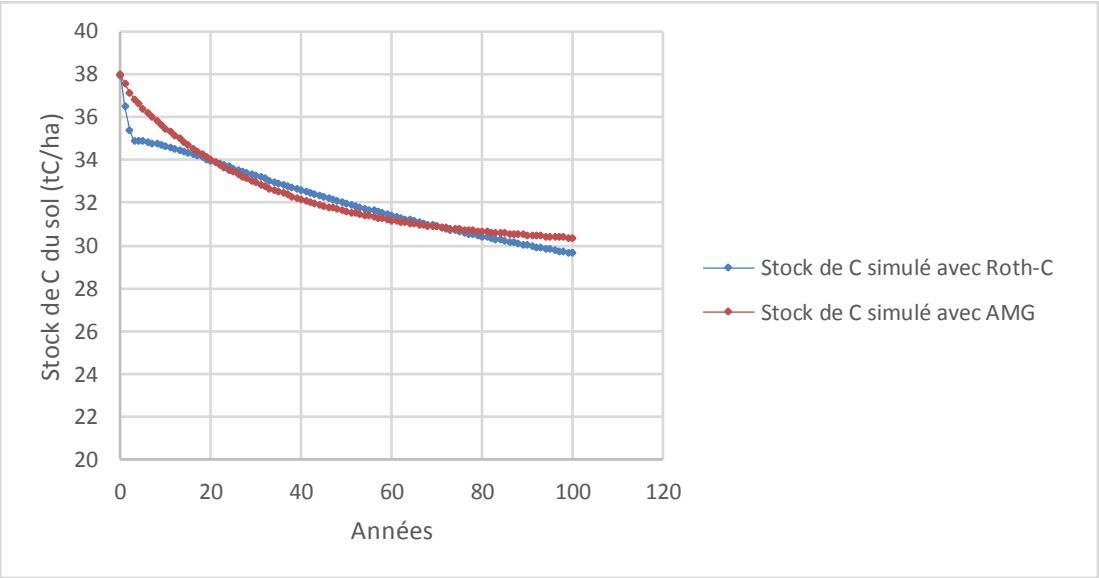


Figure 37 : Evolution du stock de C du sol simulée avec AMG et Roth-C pour un changement d'usage garrigue à vigne labourée, sarments exportés.

Le modèle AMG (recherche ou Siméos) est plus facilement utilisable pour estimer les deltas SOC dus aux changements de pratiques mais son adaptation à la vigne manque encore de validation, ainsi que pour les autres cultures pérennes. RothC est adapté pour toutes les cultures et pour tout type de conditions pédo-climatiques contrairement à AMG (qui n'est pas adaptés pour les sols tropicaux, par exemple), cependant, les données d'entrée sont plus compliquées à renseigner qu'AMG. En particulier des données d'entrée de biomasse mensuelle dans le sol sont nécessaires. Celles-ci peuvent être reconstituées en faisant tourner le modèle en mode inverse, et sous réserve de disposer de mesures (expérimentales ou de la littérature), de biomasse au moins en début et fin de cycle.
Enfin, il est plus facile d'utiliser RothC pour estimer l'effet de CAS que pour des changements de pratiques, c'est le contraire d'AMG. Ainsi les deux modèles peuvent s'avérer complémentaires du fait que leurs résultats respectifs semblent cohérents entre eux.
La figure ci-après reprend les utilisations des deux modèles Roth-C et AMG tels qu'ils ont été envisagés pour évaluer les stocks de C à l'équilibre et leur variation interannuelle.

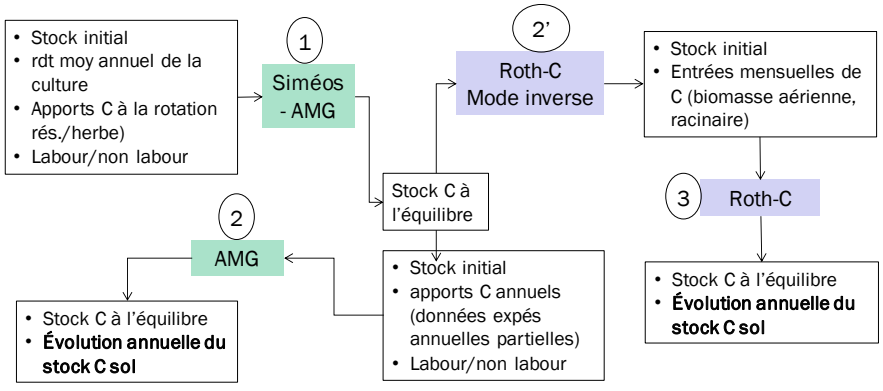


Figure 38 : Utilisation combinée des modèles Roth-C et AMG pour évaluer les stocks de C à l'équilibre et les dynamiques de C du sol

7.3. Utilisation de données de la littérature

7.3.1. Situations rencontrées

L'utilisation de données de la littérature a été la principale source de données mobilisée pour les deux produits étudiés en conditions tropicales : la canne à sucre et le soja. En effet, pour ces cas d'étude, les données expérimentales n'étaient pas disponibles et/ou accessibles, et l'utilisation et la calibration de modèles, en termes de conditions pédoclimatiques et de cultures, constituaient un travail important, qui n'était pas compatible avec le temps disponible.

L'obtention des dynamiques d'évolution de stocks de carbone s'est alors faite au cas par cas, selon les données disponibles dans la littérature pour les différents changements d'usages ou de pratiques étudiés. Dans la majorité des cas, ces données étaient malheureusement absentes et les méthodes requérant l'utilisation de dynamiques n'ont pas pu être appliquées. Ainsi, parmi les 9 changements d'usages ou de pratiques considérées pour la canne à sucre ou le soja, seuls trois disposaient de données suffisamment satisfaisantes pour être étudiés. Les solutions alors adoptées sont données dans le
Tableau 19 suivant.

Tableau 19 : Type et source de données disponibles pour la description des dynamiques de carbone pour les produits canne à sucre et soja

Code du scénario	Source de données
SCane [TrM]: Burn-NoExp (LMC)	Utilisation de résultats de la littérature, issus du modèle CENTURY (Brandani et al., 2015)
Soy [TrW]: Fo-Cr (LUC)	Utilisation de résultats de la littérature, issus du modèle RothC (Fujisaki, 2014)
Soy [TrM]: Ti-NoTi (LMC)	Exploitation de différentes mesures expérimentales diachrones de la littérature (Corbeels et al., 2016)

Dans les cas des scénarios d'arrêt du brûlis des pailles de canne à sucre (*SCane [TrM]: Burn-NoExp (LMC)*) et de déforestation pour mise en culture de soja (*Soy [TrW]: Fo-Cr (LUC)*), il a pu être trouvé des travaux de modélisation des dynamiques d'évolution des stocks de carbone, traitant du même changement de pratiques ou d'usages et dans des conditions pédoclimatiques similaires (Brandani et al., 2015; Fujisaki, 2014). Les résultats de ces travaux ont alors été directement repris.
Dans le cas du scénario d'arrêt du labour pour la culture du soja (*Soy [TrM]: Ti-NoTi (LMC)*), des données étaient disponibles mais ont nécessité un traitement spécifique pour pouvoir être exploitées dans le cadre du projet.

7.3.2. Exploitation des données de la littérature

Ce paragraphe concerne le scénario d'arrêt du labour pour la culture du soja, dans le Mato Grosso, au Brésil (*Soy [TrM]: Ti-NoTi (LMC)*).
Plusieurs sources de relevés expérimentaux dans la zone étudiée sont disponibles dans la littérature. Celles-ci peuvent être distinguées en deux grands types :

- Plusieurs sources de données synchrones, fournissant des mesures de stocks de carbone pour différents couples de parcelles proches, en labour et en non-labour, pour une même année (Corazza et al., 1999; Jantalia et al., 2007; Maia et al., 2010) ; et
- Une source de données diachrones, fournissant des couples de mesures de stocks de carbone, espacées de 8 ans, pour 7 différentes parcelles s'étant converties au non-labour, lors de la première mesure, depuis 1 à 13 ans selon les parcelles (Corbeels et al., 2016).

Les données récoltées, synchrones et diachrones, sont représentées aux Figure 39 et Figure 40 respectivement. Pour ces deux figures, le temps 0 en abscisse correspond à l'année de conversion de la parcelle de soja en non-labour. L'ordonnée correspond soit à la différence de stocks entre parcelles en

labour et parcelles en non-labour dans le cas des données synchrones (Figure 39), soit directement aux stocks de carbone dans le cas des données diachrones (Figure 40).

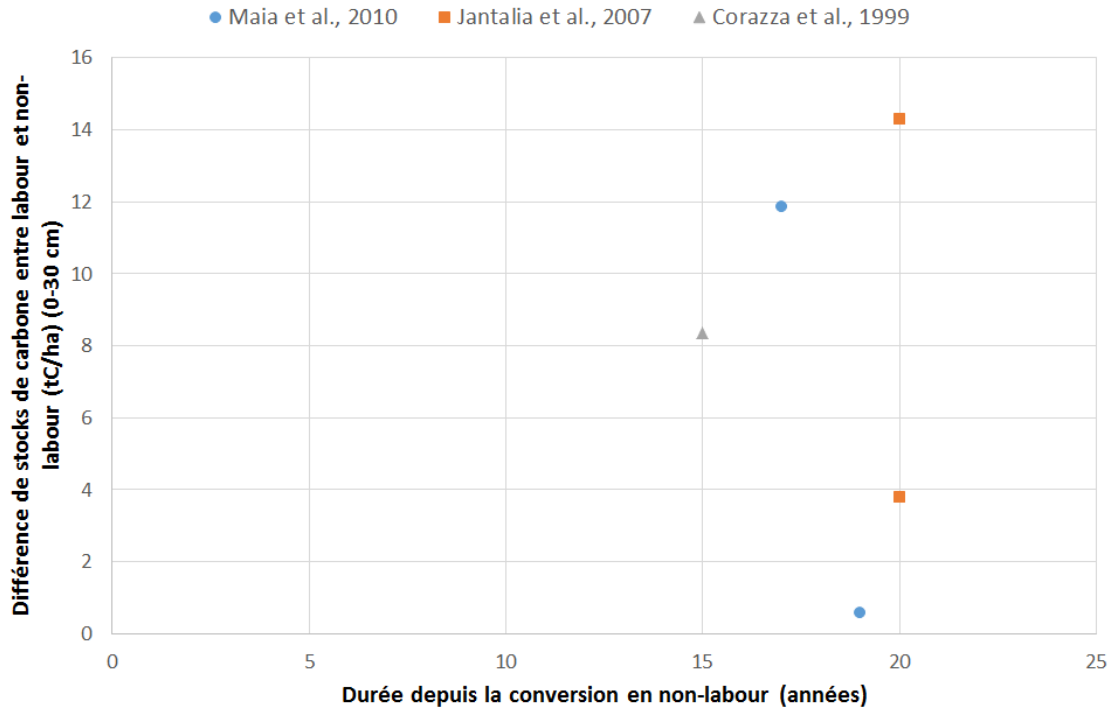


Figure 39 : Synthèse des données synchrones disponibles d'évolutions de stocks de carbone du sol après conversion en non-labour pour la culture du soja

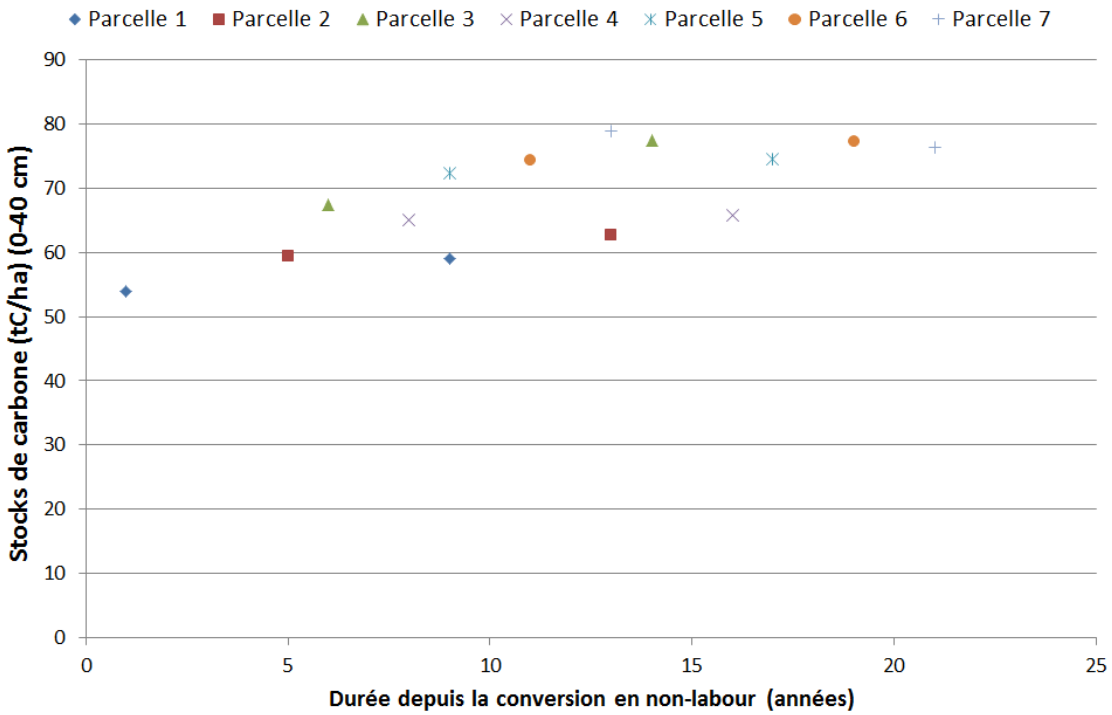


Figure 40 : Synthèse des données diachrones disponibles d'évolutions de stocks de carbone du sol après conversion en non-labour pour la culture du soja

L'analyse des données synchrones de la Figure 39 montre, pour toutes les mesures récoltées, un effet positif de la conversion au non-labour sur le stock de carbone du sol. Toutefois, compte tenu de la variabilité entre les sites étudiés et de la fenêtre temporelle relativement réduite (données comprises entre 15 et 20 ans après la conversion), il semble difficile d'extrapoler une dynamique d'évolution.
A l'inverse, les données diachrones disponibles représentées à la Figure 40 peuvent *a priori* être plus intéressantes, compte tenu de la plus large fenêtre temporelle disponible, comprise entre 1 et 21 ans. Toutefois, la comparaison des stocks de carbone n'a de sens qu'entre mêmes parcelles, et les données disponibles doivent donc être traitées pour extrapoler une dynamique.
Pour cela, il a d'abord été supposé que la dynamique recherchée était une exponentielle décroissante du premier ordre, en accord avec le modèle Hénin-Dupuis (Arrouays et al., 2002). En effet, compte tenu des limitations en termes de données disponibles, ce modèle simple, qui ne considère qu'un seul compartiment de carbone du sol, semble parfaitement satisfaisant. L'évolution C(t) du stock de carbone du sol en fonction du temps peut alors s'écrire selon la forme suivante :

$$C(t) = C(t=0) + \Delta\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

où Δ est la différence entre les stocks d'équilibre des situations avec et sans labour, et τ est la constante de temps caractéristique de la dynamique.
En supposant que chacune des parcelles respecte une telle dynamique, la différence entre les données diachrones peut s'exprimer de la façon suivante :

$$C(T + 8\ ans) - C(T) = \Delta\left(e^{-\frac{T}{\tau}} - e^{-\frac{T+8}{\tau}}\right)$$

où T est l'année de la première mesure de chaque couple de données diachrones.
Pour extrapoler une dynamique à partir de l'ensemble des données, il est alors nécessaire de supposer que chaque couple de données diachrones est lié selon une même dynamique, c'est-à-dire selon une même différence Δ entre stocks d'équilibre et une même constante de temps τ, et ce malgré les potentielles différences de stock initial et de conditions pédoclimatiques.
En excluant la parcelle 7, pour laquelle les mesures expérimentales rapportent une baisse de stock de carbone entre les années 13 et 21 après conversion, l'équation précédente peut être transformée pour être écrite de la façon suivante :

$$ln(C(T+8) - C(T)) - C(T) = \ln(\Delta) + ln\left(1 - e^{-\frac{T+8}{\tau}}\right) - \frac{T}{\tau}$$

Selon cette écriture, il vient que le logarithme de la différence de stocks de chaque couple de données diachrones, noté LD, et l'année T de la première mesure sont liés par une relation linéaire de pente a et d'ordonnée à l'origine b, avec :

$$\begin{cases} a = -\dfrac{1}{\tau} \\ b = \ln(\Delta) + ln\left(1 - e^{-\frac{T+8}{\tau}}\right) \end{cases}$$

La Figure 41 présente le traitement réalisé pour les parcelles 1 à 6 et la régression linéaire obtenue. Compte tenu de l'impact des parcelles 3 et 4 sur cette régression, la Figure 42 présente les résultats obtenus après suppression de ces parcelles.

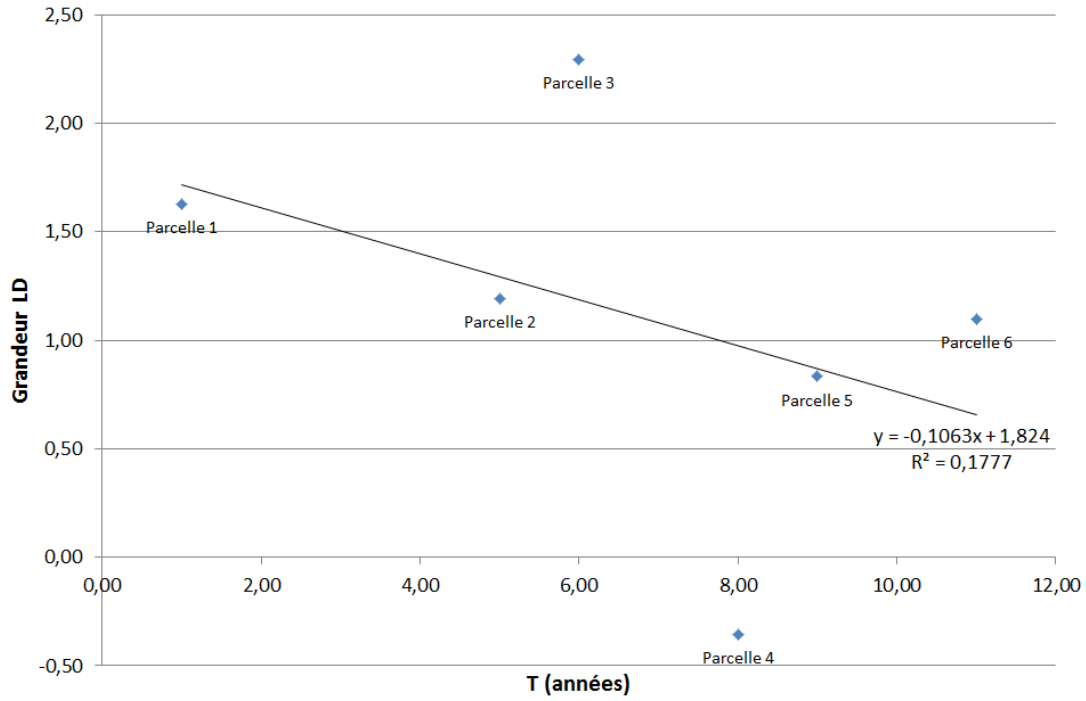


Figure 41 : Traitement réalisé sur les données diachrones des parcelles 1 à 6 de soja après conversion en non-labour

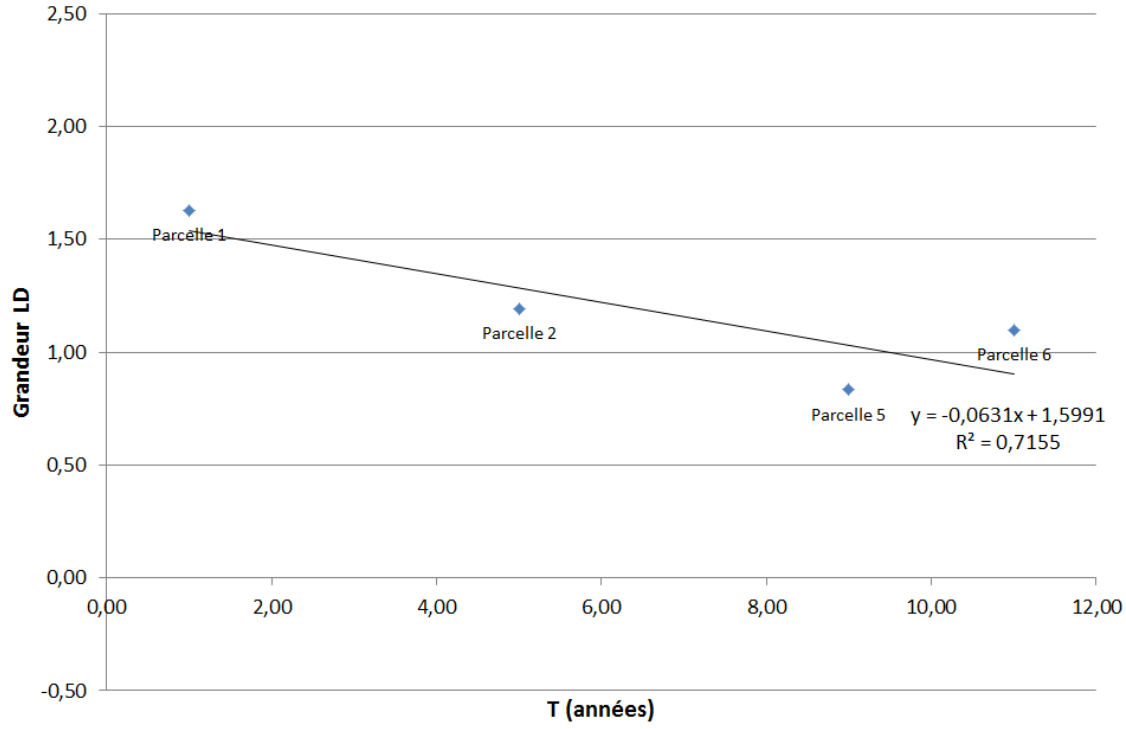


Figure 42 : Traitement réalisé sur les données diachrones des parcelles 1, 2, 5 et 6 de soja après conversion en non-labour

Les différences de stocks d'équilibre et les constantes de temps caractéristiques obtenues dans les deux cas sont données dans le

Tableau **20**. Les dynamiques correspondantes sont représentées à la Figure 43, où la dynamique de référence est celle considérant les parcelles 1 à 6, et la dynamique alternative celle réduite aux parcelles 1, 2, 5 et 6.

Tableau 20 : Caractérisation des dynamiques d'évolution des stocks de carbone obtenues après traitement des données diachrones des parcelles de soja après conversion en non-labour

Parcelles considérées	1 à 6	1, 2, 5 et 6
Constante de temps τ (années)	9,4	8,1
Différence de stocks de carbone (tC/ha) (0-40 cm)	15,8	11,7

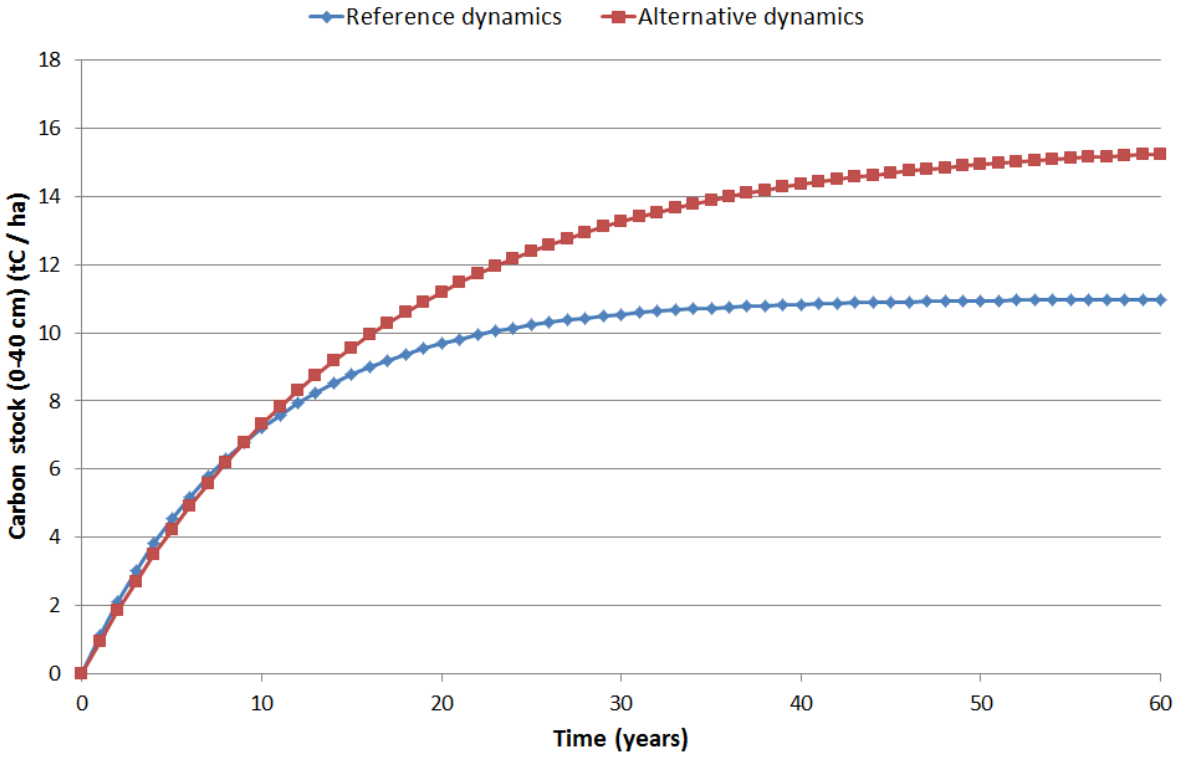


Figure 43 : Représentation des dynamiques d'évolution des stocks de carbone obtenues après traitement des données diachrones des parcelles de soja après conversion en non-labour

La Figure 43 montre que les deux dynamiques extrapolées à partir des données expérimentales concordent de façon satisfaisante sur les 10 premières années après conversion, mais divergent fortement ensuite, avec une différence relative finale de 35 % sur les stocks d'équilibre attendus sur l'horizon 0-40 cm en non-labour.

7.3.3. Conclusions sur l'utilisation des données de la littérature

Il peut être considéré que pour l'étude de produits tropicaux, l'absence de données dynamiques facilement disponibles, ou d'outil ou modèle facilement mobilisables, est un cas relativement courant. Cela a été confirmé par l'étude réalisée ici de la canne à sucre et du soja au Brésil. Dans la majorité des cas (6 sur 9 ici), cela a conduit à ne pas pouvoir appliquer les méthodes ou éléments de méthode nécessitant de renseigner une dynamique d'évolution des stocks de carbone.

Dans les autres cas, les données disponibles dans la littérature ont permis de fournir directement une dynamique, ou se sont avérées suffisantes pour extrapoler une dynamique à partir de données expérimentales. Néanmoins, ce type d'extrapolation nécessite un nombre d'hypothèses et d'approximations relativement important, conduisant à une incertitude difficilement quantifiable mais *a priori* grande sur les dynamiques obtenues. En particulier, dans le cas de la conversion de la culture du soja en non-labour, il a été possible d'estimer qu'une des hypothèses réalisées, portant sur le nombre de points considérés lors

d'une régression linéaire réalisée pour le traitement des données, conduisait à une différence relative de 35 % sur les stocks d'équilibre.

7.4. Conclusion

L'établissement des dynamiques de C a été possible dans le projet en se basant sur : des données expérimentales, des modèles mécanistes adaptés (calibrés et paramétrés) pour la zone pédoclimatique d'étude, et des données de la littérature. La mise en œuvre de chacune de ces approches appelle cependant plusieurs points à noter :

- Les données expérimentales, en particulier sur les systèmes de culture, doivent être harmonisées et lissées pour correspondre au « régime » d'entrée et de sortie de carbone dans le sol du système (ce qui n'est pas nécessairement le cas des données « brutes », i.e. représentant exactement les pratiques annuelles influençant le bilan humique, comme les apports organiques, les retours au sol des résidus, etc.…).
- Les modèles mécanistes utilisés sont plus adaptés à l'évaluation des changements de pratiques pour AMG et des changements d'usage pour Roth-C. Les résultats de simulations peuvent également être accessibles via la littérature et certaines études (ce qui a été le cas ici, notamment pour les systèmes tropicaux).
- Les données de la littérature restent la source principale de données pour reconstituer des dynamiques, notamment pour les systèmes tropicaux et les changements d'usage. Cependant, compte tenu d'une part de l'harmonisation et des hypothèses nécessaires pour les utiliser, et d'autre part, de l'accès facile aux dynamiques « vraies », les incertitudes engendrées restent fortes, ce qui en fait plutôt une solution par défaut.

Enfin, plusieurs points n'ont pas été traités spécifiquement dans le projet, mais sont également à considérer. D'une part, la dynamique d'évolution du C de la biomasse, en particulier pour les pérennes, qui peut être estimée à partir des trois grandes d'approches identifiées et utilisées pour le C du sol. D'autre part, faute de modèle adapté à la fois aux prairies et cultures, il n'a pas été possible d'étudier dans le projet les dynamiques de stockage/déstockage de carbone pour des successions de cultures annuelles en rotation avec des prairies temporaires.

8. Fiche thématique - Spécificité des cultures pérennes : Cycle de vie des pérennes, ACV et stocks de carbone

Du fait de la durée de leur cycle de production, évaluer les cultures pérennes et leurs productions en utilisant l'ACV soulève plusieurs questions spécifiques, et en particulier lorsqu'il s'agit de prendre en compte l'évolution des stocks de carbone, dans le sol et dans la biomasse.

8.1. Les caractéristiques spécifiques des pérennes qui influencent les résultats de l'ACV

Les cycles des cultures pérennes présentent des durées qui peuvent aller de quelques années à plusieurs décennies. Par exemple, dans les cas étudiés dans le projet SOCLE, la vigne est cultivée pendant 32 ans (référence issue d'Agribalyse 1.3).

La durée du cycle pérenne affecte de plusieurs manières la gestion du système productif et par conséquent la modélisation de ces impacts en ACV.

Tout d'abord, la productivité d'une culture pérenne varie en général au cours de son cycle (Tableau 21 : Phases de production considérées dans la base de données Agribalyse 1.3. pour la vigne en intégré en Languedoc Roussillon.Tableau 21), avec plusieurs phases non productives (comme par exemple la pépinière, la mise en place et la phase de destruction). Pour des nécessités techniques ou pour optimiser la mise en production, des étapes préliminaires telles qu'une pépinière ou le prétraitement de rhizomes sont nécessaires. Une fois implantées, certaines cultures pérennes peuvent ne pas être productives les premières années du cycle. Puis, après une phase de pleine production, la plupart ont une productivité qui diminue en fin de cycle et le cycle peut être abrégé pour optimiser la production (Figure 44 : Représentation de l'évolution du rendement, réel et modélisé, d'un verger de pommes de la province de Cuneo (Italie du Nord), sur l'ensemble de son cycle de vie, divisé en six phases de production. (Cerutti et al., 2014, d'après Cerutti et al. 2011).Figure 44). Dans certains cas (comme pour les vergers fruitiers), la phase de pleine production peut être également être marquée par l'alternance qui fait varier les rendements d'une année sur l'autre. Dans une perspective ACV holistique, il est essentiel de considérer l'ensemble des phases d'un cycle pérenne dont résulte la productivité moyenne au cours du cycle. Selon la durée totale du cycle, les phases initiales telles que la pépinière ou la mise en place de la culture peuvent s'avérer négligeables en termes d'impact. Néanmoins, cet aspect doit être analysé à la lumière des spécificités de chaque système étudié et en prenant en compte l'ensemble des impacts potentiels : *e.g.* pour une plantation industrielle standard de palmier à huile non irriguée, la pépinière peut fortement contribuer à l'impact sur l'épuisement de la ressource eau malgré la répartition temporelle de cette phase sur l'ensemble du cycle.

Phase du cycle de production de la vigne	Durée de la phase (années)	Rendement moyen annuel (kg/ha)
Montée en production	2	5250
Pleine production	30	10 500

Tableau 21 : Phases de production considérées dans la base de données Agribalyse 1.3. pour la vigne en intégré en Languedoc Roussillon.

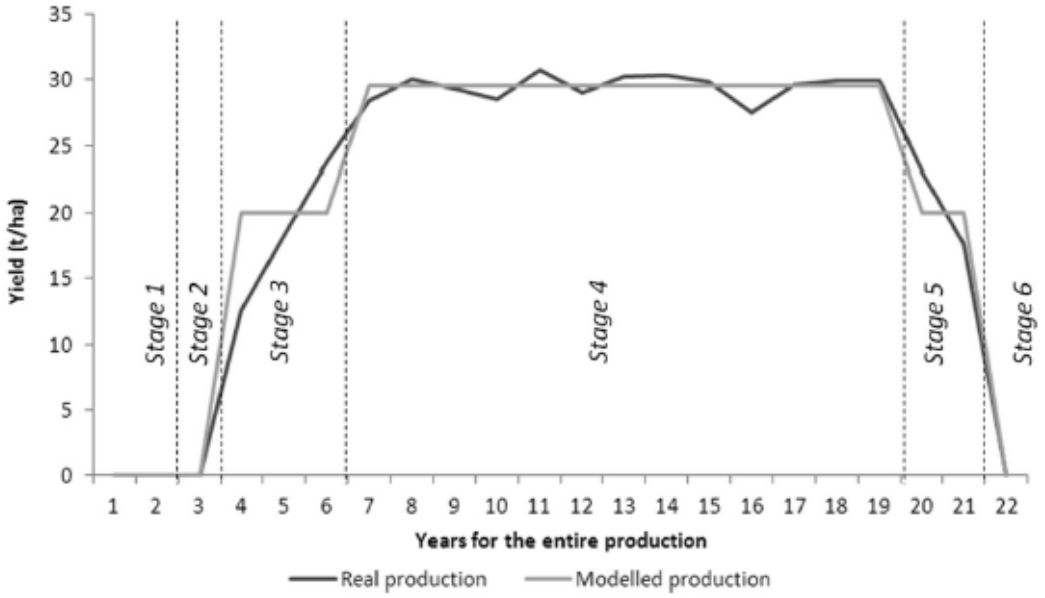


Figure 44 : Représentation de l'évolution du rendement, réel et modélisé, d'un verger de pommes de la province de Cuneo (Italie du Nord), sur l'ensemble de son cycle de vie, divisé en six phases de production. (Cerutti et al., 2014, d'après Cerutti et al. 2011).

Deuxièmement, les cultures pérennes, de par la durée du cycle, développe une empreinte spécifique sur l'agroécosystème (*e.g.* profondeur d'enracinement, hétérogénéité spatiale du couvert, recyclage interne de nutriments etc.). Ces spécificités entraînent des gestions agronomiques singulières par rapport aux cultures annuelles. Ces singularités sont de deux ordres : 1) des pratiques avec des effets à différents pas de temps ; 2) des pratiques spécifiques. Les cultures pérennes présentent divers mécanismes métaboliques leur permettant de survivre plusieurs années (rhizomes, dormance, réallocation de métabolites, etc.). Pour certaines cultures, le large réseau racinaire permet également d'explorer plus d'horizons pour puiser les ressources nécessaires à la production. Ainsi, les plantations pérennes ont potentiellement une plus forte résilience et/ou des capacités de tampon faces aux stress. Par conséquent, les effets des pratiques agronomiques, au même titre que pour les stress, ne se ressentent pas nécessairement l'année où elles sont appliquées. Il est dès lors essentiel de considérer en ACV plusieurs années pour caractériser une phase du cycle en prenant en compte les pratiques et leurs effets lissés à court, moyen et long termes. Parmi ces pratiques, il est également important de considérer certaines pratiques spécifiques peu communément caractérisées en ACV (*e.g.* la taille des arbres, enherbement entre les rangs, le recyclage interne des résidus, etc.). Or ce n'est pas tant la caractérisation « amont » de ces pratiques qui pose problème, *e.g.* l'énergie utilisée pour la taille ou l'enherbement, mais plutôt la caractérisation des impacts aval sur le système, *e.g.* la réduction du ruissellement grâce à l'enherbement ou l'effet du recyclage interne des résidus sur les émissions au champ. Bien que l'ensemble des mécanismes ne soit pas encore parfaitement maîtrisés et modélisables en ACV, il est important de les prendre en compte en fonction de l'état de l'art. Certaines de ces pratiques ont un lien direct avec l'évolution des stocks de carbone de la biomasse et du sol et les émissions de CO_2. Elles sont résumées dans le tableau (Tableau 22) ci-après.

Type de pratique culturale	Exemple de culture où la pratique est mise en place	Influence ou lien avec le C du sol ou de la biomasse dans le temps
Taille et gestion des résidus de taille	• Retour des sarments au sol en vigne	Entrée de carbone dans le sol par les parties aériennes lignifiées et augmentation du stock de C du sol par humification à moyen terme
Période de coupe et gestion des feuilles/ parties aériennes	• Coupe tardive du miscanthus et retour des feuilles au sol	Entrée de carbone dans le sol par les feuilles et augmentation du stock de C du sol par humification à moyen terme
Brûlis répétés en cours de culture ou en fin de vie	• Brûlis des pailles de la canne à sucre • Combustion du bois et souches d'un verger après arrachage	Déstockage de C de la biomasse et émission ponctuelle de CO_2 (éventuellement répétée)
Enherbement de l'inter-rang	• Enherbement de l'inter-rang d'une vigne	Stockage de C dans le sol à moyen terme sous réserve d'une durée suffisante de présence du couvert (peu le cas en conditions sèches)
Arrachage	• Désouchage d'un verger	Pertes de C de la biomasse souterraine
Apports de matière organique	• Retour des rafles compostées dans les palmeraies • Apports de résidus de distillerie dans les vignes	Apports de C au sol et augmentation du stock de c du sol par humification à moyen terme

Tableau 22 : Exemples de pratiques culturales sur des systèmes pérennes en lien avec l'évolution des stocks de carbone des sols et de la biomasse

Enfin, la proportion de la biomasse exploitée selon les cultures pérennes peut être très variable ; depuis toute la biomasse aérienne (*e.g.* le miscanthus valorisé en combustion), la récolte des fruits (*e.g.* le raisin), jusqu'à l'extraction d'un métabolite (*e.g.* le latex saigné de l'hévéa). Outre les difficultés de la modélisation des modes et fréquences de récolte et des rendements, il est important de noter que les stocks de biomasse non directement exploités peuvent être non négligeables. En ACV, le carbone biogénique contenu dans le produit d'intérêt n'est généralement pas considéré ou évalué en marge des résultats d'ACV. Dans le cas de certaines cultures pérennes, le carbone biogénique stocké dans différents compartiments du système peut jouer un rôle considérable. C'est le cas notamment du carbone stocké dans le sol (à l'instar des coefficients utilisés dans l'IPCC pour les cultures pérennes) ou du compartiment végétal sous couvert végétal. Ces stocks de carbone sont souvent mal quantifiés faute de données spécifiques bien qu'ils nécessitent une attention particulière. Par ailleurs, d'autres stocks, tels que les troncs pouvant être valorisés en bois d'œuvre à la fin du cycle doivent être également considérés et les impacts alloués.

8.2. Recommandations pour la modélisation du cycle pérenne en ACV

Les recommandations issues de la littérature pour l'ACV de pérennes (Cerutti, Bruun et al. 2011; Bessou, Basset-Mens et al. 2013; Cerutti, Beccaro et al. 2014; Bessou, Basset-Mens et al. 2016) sont i) de considérer toutes les phases du cycle de production dans l'analyse, et, ii) dans la mesure du possible, de disposer de données chronologiques, c'est-à-dire représentant les variations interannuelles des rendements et pratiques culturales d'une même culture permettant d'intégrer leurs effets à moyen et long terme. A défaut, l'explicitation des hypothèses considérées pour représenter les différentes phases du cycle et la description précise des sources des données permet une exploitation transparente des résultats de

l'évaluation. Ces recommandations sont d'autant pertinentes lorsque l'on s'intéresse à la prise en compte des stocks de carbone et de leur évolution par l'ACV car : i) dans le sol, l'évolution du stock de C est lente et n'est mesurable qu'au bout de quelques (3 à 5) années au moins (Saffih-Hdadi and Mary 2008), et ii) une culture pérenne stocke du carbone dans sa biomasse aérienne et racinaire tout au long de son cycle de vie.

Cependant, comme la littérature le souligne également, disposer de telles données sur des séries chronologiques lorsque l'on réalise une ACV est peu fréquent, et ce, d'autant plus pour des valeurs de stocks de carbone dans la biomasse nécessaires à la mise en œuvre des trois méthodes principales étudiées dans le projet SOCLE : IPCC, Muller-Wenk et Brandão et ACV Dynamique.

8.3. Spécificités des méthodes de prise en compte des stocks de carbone

8.3.1. Méthode IPCC

Dans la méthode IPCC, des valeurs par défaut sont fournies pour les stocks de carbone dans les sols et la biomasse des pérennes.

Les stocks de carbone des sols étant définis selon la zone climatique d'intérêt, cette approche ne prend pas en compte les différents types de sol pour un même climat. Par exemple, pour un climat méditerranéen il existe une seule valeur standard de stock de carbone dans le sol (38 tC/ha).

Cette valeur standard est modérée par plusieurs facteurs représentant les usages et les pratiques de gestion des sols, et les entrées de carbone dans les sols (cf. fiche IPCC définissant les facteurs d'usage, de gestion et d'entrée de carbone dans les sols). Pour les pérennes, les trois facteurs F_{LU}, F_{MG} et F_{LI} sont définis pour chacune des 5 régions climatiques, pour des cultures dont la tige ou le tronc ne sont pas récoltés annuellement. Si certaines pratiques rencontrées fréquemment pour les pérennes (comme l'enherbement de l'inter-rang) ne sont pas explicitement définies, il est nécessaire de les rattacher à une catégorie par défaut, ce qui a toujours été possible dans les cas étudiés.

Le stock de carbone dans la biomasse est défini par défaut comme la somme du stock de carbone dans la végétation aérienne et souterraine d'une part et de la matière organique morte aérienne et souterraine d'autre part. La matière organique morte est supposée égale à zéro dans le cas de cultures pérennes. La teneur en carbone de la biomasse vivante est aussi définie par défaut pour :

- certaines cultures sans zone climatique préférentielle : noix de coco, jatropha, jojoba et palmier à huile,
- des pérennes « génériques » (4 types selon 4 zones climatiques).

Selon la culture pérenne, le stock effectif de C dans la biomasse aérienne est cependant très dépendant de l'espèce et de ses conditions de culture (climat et pratiques culturales). Par exemple, pour la vigne étudiée dans le projet, la valeur du stock de C est de 3 t C/ha pour les parties aériennes (Colin, Barnérias et al. 2009), ce qui est beaucoup moins élevé que la valeur de référence de 43,2 t C/ha donnée par défaut pour les pérennes en conditions tempérées. De plus, pour définir la teneur en C dans les parties souterraines, il est nécessaire de connaître la biomasse racinaire (en matière sèche) que l'on multiplie par le coefficient 0,47 donné par défaut par l'IPCC. Pour cela, l'IPCC recommande d'utiliser la production d'une année moyenne de pleine production, ce qui n'est pas en accord avec les recommandations de la littérature en ACV de manière générale, mais se montre opérationnel, en particulier dans le cas où on ne dispose pas de données expérimentales et/ou issues d'enquêtes de terrain permettant de prendre en compte les différentes étapes de cycle de vie de la pérenne. La canne à sucre est finalement traitée avec la méthode IPCC comme une annuelle pour les facteurs de gestion, de carbone organique entrant dans le sol et de stock de C dans la biomasse. Cette approche est cohérente avec le cas traité dans le projet SOCLE où, d'un point de vue agronomique, dans le contexte du Brésil, la culture est installée pour une durée relativement courte qui peut être assimilée à la durée d'une rotation (4-5 ans) avec des pratiques assez "perturbatrices" pour le stockage de C (un labour tous les 4-5 ans et du brûlis chaque année).

Dans le cas de l'étude d'un changement d'usage (i.e. mise en culture pérenne), la valeur du stock de C contenu dans la biomasse de la végétation de l'usage précédent la culture dépend du % de couverture de la canopée, ce qui peut être discuté. En effet, ce taux de couverture peut être subjectif, et certaines végétations ne sont pas référencées, comme la garrigue, qui est une végétation pouvant précéder la vigne. Ainsi, les valeurs de 84tC/ha pour la forêt méditerranéenne (canopée >30%) et de 37 tC/ha pour la garrigue (soit la valeur d'une brousse européenne car la valeur spécifique à la garrigue n'existe pas) ont été retenues pour les végétations précédant la vigne. Du fait d'un grand nombre de cas et de valeurs par défaut associées à ces cas, il est possible de substituer un cas d'étude spécifique par un "cas répertorié".

8.3.2.Méthode de Müller-Wenk et Brandão

Dans la méthode de Müller-Wenk et Brandão, le cas spécifique des cultures pérennes n'est pas distingué, ce sont des cultures au même titre que les autres.
Pour mettre en œuvre cette méthode dans le projet, des valeurs de stock de carbone pour l'état avant le changement d'usage et pour le biome de référence (végétation naturelle potentielle, i.e. supposée « sans intervention humaine ») considérées proviennent de l'IPCC, ou de modèles ou de la littérature (voir détails dans les fiches de chaque cas d'étude).

Pour la mettre en œuvre, il est également nécessaire de connaître la durée de vie de la transformation (qui correspond à la moitié du temps de la régénération vers l'état de référence). On peut supposer que pour une pérenne, cette régénération sera plus rapide que pour une culture annuelle, or cette différence n'est pas prise en compte dans les définitions des temps de régénération proposés par défaut dans la méthode actuelle.

En résumé, la méthode est globalement facile à mettre en œuvre, mais les données spécifiques de stocks de C et de temps de régénération que ceux proposés par défaut la rendraient plus adaptée aux pérennes.

8.3.3.Méthode ACV dynamique

L'ACV dynamique est adaptée et pertinente pour les cultures pérennes, mais requiert l'accès à un inventaire dynamique dont la cohérence est importante et peu aisée à valider en l'absence de données primaires (expérimentales ou statistiques) propres au système de culture pérenne étudié. En effet, disposer à un pas de temps annuel, de l'évolution du stock de carbone dans le sol et dans la biomasse (aérienne et souterraine) de la culture, et également les émissions de GES, année après année peut se faire par : i/ un jeu de données expérimentales permettant d'accéder à cet inventaire exhaustif et cohérent sur les différentes phases du cycle de vie, ii/ le recours à des statistiques de la région d'étude iii/ l'utilisation d'un modèle mécaniste (voir la fiche sur la définition d'une dynamique de C et les sources de données). En zone tempérée, la disponibilité des statistiques sur les rendements et pratiques culturales peut être moins aisée pour les pérennes (souvent arboriculture, viticulture ou cultures spéciales, comme celles dédiées à la valorisation énergétique) que pour les cultures annuelles principales. Elles restent cependant plus accessibles qu'en zone tropicale et pays du Sud. Les modèles sont eux aussi généralement moins bien paramétrés et validés dans les conditions de production et espèces tropicales (Bessou, Basset-Mens et al. 2016).

9. Fiche thématique - Obtention et analyses des données sols des essais PCQE

En vue d'évaluer la sensibilité des résultats des différentes méthodes testées à l'utilisation de données génériques ou spécifiques à une parcelle étudiée, les cas d'études grandes cultures se basent sur un dispositif expérimental pour lequel un suivi de l'évolution du stock de carbone est réalisé depuis 1987. L'objectif de cette fiche est de décrire comment ces données expérimentales ont été utilisées pour estimer les données nécessaires à la mise en œuvre des différentes méthodes.
Ces données ont été utilisées dans un premier temps 1) afin d'identifier les itinéraires techniques qui paraissaient plus pertinents à simuler dans les cas d'étude, 2) puis dans le but d'affiner les simulations conduites avec AMG. En revanche, les mesures réalisées ne sont pas directement intégrables dans les travaux ACV puisque les méthodes proposées considèrent les stocks de carbone à l'équilibre. Or, l'estimation de ces stocks requiert des modèles. Une autre valorisation possible était de comparer les résultats obtenus avec l'ACV dynamique en utilisant la dynamique soit observée soit simulée mais cette comparaison n'a pu être réalisée dans le cadre du projet.

9.1. Dispositif PCQE et protocole expérimental de suivi de la teneur en matière organique

Les cas d'étude sont issues de données d'expérimentation des essais Pratiques Culturales et Qualité des Eaux (PCQE) implantés sur la station expérimentale ARVALIS Institut du végétal de La Jaillière (Loire Atlantique) en 1987. Le sol du site est argilo-limoneux sur des formations de schiste altérées.

L'essai comporte onze parcelles d'essais, de 0.5 à 1 ha, dont neuf sont drainées. Chacune des parcelles est conduite selon différents itinéraires techniques, en particulier, en termes de rotation, de gestion de résidus et de l'interculture, et du travail du sol. La teneur en matière organique est régulièrement mesurée.

Les mesures de la teneur en matière organique des sols ont été effectuées en 1987 (année d'implantation des essais), 1994, 2000, 2004, 2009 et 2014, à partir de 10 prélèvements réalisés sur la diagonale. Les horizons prélevés sont 0-50 cm, 5-10 cm, 10-25 cm, 25-50 cm et 50-80 cm pour les parcelles en technique culturale simplifiée et 0-25 cm, 25-50 cm et 50-80 cm pour les parcelles labourées. Les échantillons prélevés sont séchés à température ambiante avant conditionnement et envoi au laboratoire d'analyse.

9.2. Sélection des parcelles et scénarios pour la construction des cas d'étude

Deux parcelles drainées (pas de possibilité d'AMG de simuler des phénomènes d'engorgement) ont été retenues pour le projet SOCLE avec des restitutions en carbone contrastées.

Les parcelles T5 et T6 ont été retenues pour illustrer un changement de pratique (Tableau 23).

Tableau 23 : itinéraire technique des parcelles T5 et T6 du dispoostif PCQE de la Jaillière

Parcelle	Surface (ha)	Travail du sol	Cultures	Apport de PRO	Gestion des résidus	Couvert intermédiaire	Année de mise en place
T5	0.89	TCSL depuis 1989	Blé, maïs fourrage	Apport chaque année, en moyenne 23 t fumier bovin	Paille de blé tendre récoltée	Avant maïs	1987
T6	1.01	TCSL depuis 2007	Blé, maïs fourrage (prairie jusqu'en 1995)	Apport sur 2 des 17 années, en moyenne 24 t fumier bovin	Paille de blé tendre récoltée	Depuis 2006 avant maïs	1987

La parcelle T5 est une rotation blé tendre d'hiver et maïs fourrage conduite sans labour, avec apport régulier en PRO et mise en place de couvert après la récolte du blé. La parcelle T6 était une prairie (ray grass anglais) de 1987 à 1995. A partir de 1996, une rotation maïs fourrage/blé tendre d'hiver a été mise en place. La parcelle a été labourée tous les ans de 1995 à 2006. Sur cette période, aucun apport organique ni

de mise en place de couvert n'a été effectué. A partir de 2007, cette parcelle est passée en technique culturale sans labour avec une mise en place de couvert (trèfle et/ou moutarde) après chaque blé tendre et un apport de fumier bovin est effectué avant le semis du maïs.

Pour les cas d'étude, il a été jugé intéressant d'étudié un changement de pratique en passant d'une situation à faible capacité de stockage (T6) à une situation favorable au stockage de carbone dans les sols (T5).

9.3. Comparaison des stocks de carbone mesurés et modélisés avec AMG

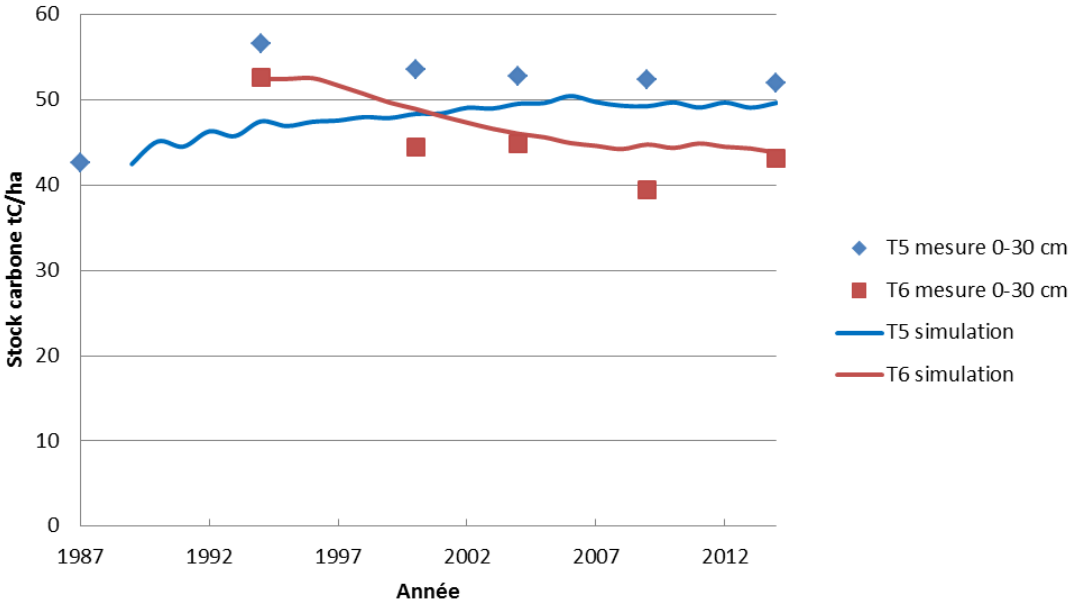


Figure 45 : Évolution des stocks de carbone des sols des parcelles T5 et T6, comparaison valeurs mesurées et modélisées avec AMG

Les périodes en prairie ne sont pas simulées, AMG n'étant pas paramétré sur cette culture.Sur les deux parcelles, AMG permet de simuler correctement l'évolution du stock de carbone sur T6 (erreur relative moyenne : 5%), Figure 45. Sur T5, les niveaux de stocks de carbone sont cohérents mais il y a un écart entre les cinétiques mesurées et simulées (erreur relative moyenne : 9.4%). L'écart peut venir en partie de l'écart de restitution des résidus de cultures : les quantités de paille exportée mesurées sur l'essai représentent seulement 50% de la partie végétative aérienne du blé alors qu'elle est fixée à 70% dans AMG.

9.4. Conclusion

Des données mesurées ne peuvent être directement utilisés intégrables dans les travaux ACV puisque les méthodes proposées considèrent les stocks de carbone à l'équilibre. Pour estimer ce stock à l'état d'équilibre, il est nécessaire de faire tourner un modèle sur un long pas de temps, ce qui nécessite de s'appuyer sur l'hypothèse que les pratiques actuelles sont conservées dans le temps. Il s'agit donc d'une estimation d'un stock de carbone « théorique ».

Pour le cas d'étude grande culture, les mesures réalisées sur les parcelles du dispositif PCQE ont été utilisées :

- En données d'entrée d'AMG concernant la caractérisation initiale du sol,
- Pour valider certaines hypothèses de modélisation AMG (ex : choix de la forme d'engrais organique).

L'écart entre valeur observé et simulé s'est avéré relativement faible sur ces cas d'étude.

10. Fiche thématique - allocation entre culture d'une succession culturale

10.1. Contexte

Il est difficile de réattribuer les impacts d'un système à chacune des cultures pour les raisons suivantes. Certaines pratiques peuvent bénéficier à plusieurs cultures de la succession culturale. Par ailleurs, certaines émissions sont fonction des pratiques et caractéristiques liées à une culture mais également de celles liées aux cultures suivantes ou précédentes.

L'évaluation des évolutions du stock de carbone dans le sol ne peut se faire à la culture mais doit être conduite à l'échelle du système de culture. En effet, à très court terme (en deçà de 5 ans environ), on n'observe pas expérimentalement d'évolution du carbone organique du sol. Cette évolution est fonction de différentes caractéristiques du système de culture dont certaines d'entre elles sont difficilement attribuables à une culture (ex : mode de travail du sol, fertilisation organique, gestion des résidus, présence de couverts intermédiaires). La contribution d'une culture à cette évolution est ainsi complexe à déterminer.

10.2. Choix retenu dans la bibliographie

Différents référentiels et guides méthodologiques préconisent d'allouer certains flux entre les cultures de la succession culturale mais ceux-ci traitent plus généralement de l'allocation d'éléments de nutritifs ou de leur pertes dans l'environnement (ex : Audsley et al, 2003, ILCD Handbook -Specific guide for Life Cycle Inventory data sets, Blonk et al 2010, FAO 2016). Les publications traitant de l'allocation sur la succession culturale sont nombreuses (Martínez-Blanco, J., et al, 2014, Goglio et al, 2017).

Cependant peu traitent de l'allocation de stockage ou déstockage de carbone entre les cultures. Goglio et al, 2017 recommandent d'allouer les effets à long terme du système de culture sur la base d'un critère générique, tel que le critère d' « unité céréalière » (indice de contenu en énergie métabolisable par comparaison à celui de l'orge), la biomasse produite, le contenu énergétique ou un indicateur économique.
Il est proposé dans cette note de tester une règle permettant d'attribuer des flux de stockage ou déstockage de carbone entre les cultures, au prorata de la quantité de carbone humifié provenant des résidus restitués par chacune d'elle. Le pilotage de la fertilisation organique ou le choix de l'implantation d'un couvert intermédiaire étant géré à l'échelle de la rotation, l'impact positif de la fertilisation organique ou de l'implantation de couvert sur le stockage de carbone n'est pas attribué à la culture recevant les apports ou suivant un couvert.

10.3. Description de la règle d'allocation testée

- Dans le cas d'un stockage de carbone, estimer différentes fractions :
    - RPRO+couvert = Quantité de carbone humifié PRO + couvert / quantité de carbone humifié totale (résidus culture + couvert + PRO) -> allouer la quantité stockage de carbone * RPRO+couvert également entre les cultures
    - Rculture i= Quantité de carbone humifié culture i / quantité de carbone humifié totale (résidus culture + couvert + PRO) -> allouer la quantité stockage de carbone * Rculture i à la culture i
- Dans le cas d'un destockage de carbone, estimer différentes fractions :
    - allouer la quantité destockage de carbone * (1-RPRO+couvert) également entre les cultures
    - Rculture i= Quantité de carbone humifié culture i / quantité de carbone humifié totale (résidus culture + couvert + PRO) -> allouer la quantité stockage de carbone * (1-Rculture i) à la culture i

Mise en œuvre de la règle sur un cas d'étude maïs fourrage – blé tendre

La règle a été mise en œuvre sur le cas d'étude LMC_2, soit une simulation d'un changement d'un itinéraire technique sans couvert, ni fertilisation organique à un itinéraire technique avec couvert et fertilisation organique.

Données considérées pour le test	
Flux de carbone lié au stockage du sol considéré à l'échelle de 20 ans (données spécifiques)	906 kg éq CO2/ha
Quantité de carbone humifié provenant des résidus de blé tendre	0.35 t C/ha par année de culture
Quantité de carbone humifié provenant des résidus de maïs fourrage	0.39 t C/ha par année de culture
Quantité de carbone humifié totale par an	0.99 t C/ha/an
Résultats	
RPRO+couvert	0.62
Rblé	0.18
Rmaïs	0.20
Stockage de carbone attribué au blé	444 kg éq CO2/ha
Stockage de carbone attribué au maïs	462 kg éq CO2/ha

Les quantités de carbone humifié provenant des résidus de blé tendre et maïs fourrage étant très proches, les quantités de stockage allouées entre chacune des cultures pour ce cas d'étude. La mise en œuvre de cette règle est possible à condition soit de disposer d'informations détaillées sur les quantités de matière sèches restituées par les résidus (racinaires et aériens) de cultures et des couverts, teneurs en carbone et coefficients de minéralisation de ce résidus et des produits organiques, soit d'un outil de simulation détaillant en résultats de calculs intermédiaires ces quantités de carbone humifié.

11. Références

Andriulo A., Mary B., Guérif J., 1999. Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. Agronomie 19, 365-377.

Arrouays, D., Balesdent, J., Germon, J.C., Jayet, P.A., Soussana, J.F., Stengel, P., 2002. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Paris, France.

Audsley, E., Alber, S., Clift, R., Cowell, S., Crettaz, P., Gaillard, G., Hausheer, J., Jolliet, O., Kleijn, R., Mortensen, B., Pearce, D., Roger, E., Teulon, H., Weidema, B.P., Zeijts, H., 2003. Harmonisation of Environmental Life Cycle Assessment for Agriculture. Final report concerted action

Besson A., Martin M., Tosser V. Amélioration de la méthodologie d'inventaire des stocks de carbone dans les sols agricoles et forestiers. Avril 2013

Bessou, C., C. Basset-Mens, et al. (2013). "LCA applied to perennial cropping systems: a review focused on the farm stage." The International Journal of Life Cycle Assessment 18(2): 340-361.

Bessou, C., C. Basset-Mens, et al. (2016). "Partial modelling of the perennial crop cycle misleads LCA results in two contrasted case studies." International Journal of Life Cycle Assessment 21(3): pp 297–310.

Bicalho, T., C. Bessou, and S.A. Pacca. 2016. Land use change within EU sustainability criteria for biofuels: The case of oil palm expansion in the Brazilian Amazon. Renew. Energy 89: 588–597. doi: 10.1016/j.renene.2015.12.017.

Blonk Consultants, 2013. Direct Land Use Change Assessment Tool, Version 2013.1,.

Blonk H, Kool A, Luske B, Ponsioen T, and Scholten J, March 2010. Methodology for assessing carbon footprints of horticultural products.

Bouthier A, Duparque A, Mary B, Sagot S., Trochard R, Levert M, Houot S, Damay N, Denoroy P, Dinh J.-L, Blin B, Ganteil F., 2014 - Adaptation et mise en oeuvre du modèle de calcul de bilan humique à long terme AMG dans une large gamme de systèmes de grandes cultures et de polyculture-élevage. Innovations Agronomiques 34 (2014), 125-139

Brandani, C.B., Abbruzzini, T.F., Williams, S., Easter, M., Pellegrino Cerri, C.E., Paustian, K., 2015. Simulation of management and soil interactions impacting SOC dynamics in sugarcane using the CENTURY Model. GCB Bioenergy 7, 646–657. doi:10.1111/gcbb.12175

Brisson, N., Launay M., Mary B., Beaudouin. N., 2008. Conceptual basis formalisations and parameterization of the STICS crop model. Ed QUAE. Versailles. 300p.

Caldeira-Pires, A., S.M. da Luz, S. Palma-Rojas, T.O. Rodrigues, V.C. Silverio, F. Vilela, P.C. Barbosa, and A.M. Alves. 2013. Sustainability of the Biorefinery Industry for Fuel Production. Energies 6(1): 329–350. doi: 10.3390/en6010329.

Caruel, B. (2013). Développer les outils du conseil pour améliorer la gestion des matières organiques en viticulture: 33p. + annexes.

Cerutti, A. K., G. L. Beccaro, et al. (2014). "Life cycle assessment application in the fruit sector: State of the art and recommendations for environmental declarations of fruit products." Journal of Cleaner Production 73: 125-135.

Cerutti, A. K., S. Bruun, et al. (2011). "A review of studies applying environmental impact assessment methods on fruit production systems." Journal of Environmental management 92(10): 2277-2286.

Clivot H., Mary B., Valé M., Cohan J.P., Champolivier L., Piraux F., Laurent F., Justes E. (2017) Quantifying in situ and modeling net nitrogen mineralization from soil organic matter in arable cropping systems. Soil Biology and Biochemistry, Volume 111, pp. 44-59.

Clivot H., Mouny J.C., Duparque A., … , Mary, B. (2018) Modeling soil organic carbon in long-term experiments in France with AMG model, à paraître.

Colin, A., C. Barnérias, et al. (2009). Biomasse forestière, populicole et bocagère disponible pour l'énergie à l'horizon 2020, Etude réalisée pour le compte de l'ADEME. : 105 p.

Corazza, E.J., Silva, J.E., Resck, D.V.S., Gomes, A.C., 1999. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de Cerrado. Rev. Bras. Ciência do Solo 23, 425–432. doi:10.1590/S0100-06831999000200025

Corbeels, M., Leandro Marchão, R., Siqueira Neto, M., Garcia Ferreira, E., Emöke Madari, B., Scopel, E., Rodrigues Brito, O., 2016. Evidence of limited carbon sequestration in soils under no-tillage systems in the Cerrado of Brazil. Sci. Rep. 6, 1–8. doi:10.1038/srep21450

Curran, M.A., 2008. Development of Life Cycle Assessment Methodology: A Focus on Co-product Allocation. Erasmus University Rotterdam, p. 204.

Dimassi B, Cohan JP, Labreuche J, Mary B (2013) Changes in soil carbon and nitrogen following tillage conversion in a long-term experiment in Northern France. Agriculture, Ecosystems and Environment, 169: 12-20.

Dimassi B, Mary B, Wylleman R, Labreuche J, Couture D, Piraux F, Cohan JP (2014) Long-term effect of contrasted tillage and crop management on soil carbon dynamics during 41 years. Agriculture, Ecosystems and Environment 188: 134-146.

Dinh JL. 2012. Modélisation et correction des erreurs de prédiction du modèle AMG par des modèles linéaires à effets mixtes. Mémoire de fin d'étude -AgroParis-Tech. 41 pages.

Duparque, A., B. Caruel, et al. (2014). Modélisation de l'évolution du stock de matière organique du sol ? Les entretiens du Beaujolais, Villefrance sur Saône

Duparque, A. V.Tomis, B. Mary, H. Boizard, et N. Damay. 2011. « Le bilan Humique AMG, pour une démarche de conseil fondée sur des cas-types régionaux ». In : 10e rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre. GEMAS-COMIFER. Reims : 16p

Duparque, A., JL Dinh et B. Mary. 2013. AMG: a simple SOC balance model used in France for decision support. International workshop SOMpatic Rauischholtzhausern (Germany), November 20-22, 2013.

FAO. 2016. Environmental performance of animal feeds supply chains: Guidelines for assessment. Livestock Environmental Assessment and Performance Partnership. FAO, Rome, Italy.

Fujisaki, K., 2014. Devenir des stocks de carbone organique des sols après déforestation et mise en culture : une analyse diachronique en contexte amazonien. Centre International d'Etudes Supérieures en Sciences Agronomiques (Montpellier SupAgro).

Goglio P, Brankatschk G, Knudsen M, Williams AG, Nemecek, 2017. Addressing crop interactions within cropping systems in LCA. International Journal of Life Cycle Assessment. DOI 10.1007/s11367-017-1393-9

IPCC, 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Vol 4 Agriculture, Forestry and other Land Use.

Jantalia, C.P., Resck, D.V.S., Alves, B.J.R., Zotarelli, L., Urquiaga, S., Boddey, R.M., 2007. Tillage effect on C stocks of a clayey Oxisol under a soybean-based crop rotation in the Brazilian Cerrado region. Soil Tillage Res. 95, 97–109. doi:10.1016/j.still.2006.11.005

Labardesque M., Bessard Duparc P, Soenen B., Métais P., Trochard R, Lebris X, 2017. CHN: practical case of valorization of a dynamic crop model to estimate the number of available days for cultivation works. Conference: EFITA WCCA Montpellier 2017

Lashermes G., Nicolardot B., Parnaudeau V., Thuriès L., Chaussod R., Guillotin M.L., Linères M., Mary B., Metzger L., Morvan T., Tricaud A., Villette C., Houot S., 2009. Indicator of potential residual carbon in soils after exogenous organic matter application. European Journal of Soil Science, 60, 297-310

Macedo, I.C., J.E.A. Seabra, and J.E.A.R. Silva. 2008. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. Biomass Bioenergy 32(7): 582–595. doi: 10.1016/j.biombioe.2007.12.006.

Maia, S.M.F., Ogle, S.M., Cerri, C.C., Cerri, C.E.P., 2010. Changes in soil organic carbon storage under different agricultural management systems in the Southwest Amazon Region of Brazil. Soil Tillage Res. 106, 177–184. doi:10.1016/j.still.2009.12.005

Martínez-Blanco, J., Rieradevall, J., Antón, A., Muñoz, P., Multifunctionality-solving approaches of compost application in crop rotations. Journal of Cleaner Production 64 (2014) 384e395

Meurer K.H.E,. Haddaway N.R,. Bolinder M.A,.Kätterer T. 2018. Tillage intensity affects total SOC stocks in boreo-temperate regions only in the topsoil—A systematic review using an ESM approach. Earth Science Review. 177 : 613 – 622.

Milà i Canals, L., J. Romanyà, and S.J. Cowell. 2007. Method for assessing impacts on life support functions (LSF) related to the use of “fertile land” in Life Cycle Assessment (LCA). J. Clean. Prod. 15(15): 1426–1440. doi: 16/j.jclepro.2006.05.005.

Müller-Wenk, R., and M. Brandão. 2010. Climatic impact of land use in LCA—carbon transfers between vegetation/soil and air. Int. J. Life Cycle Assess. 15(2): 172–182. doi: 10.1007/s11367-009-0144-y.

Saffih-Hdadi, K. and B. Mary (2008). Modeling consequences of straw residues export on soil organic carbon. Soil Biology and Biochemistry 40(3): 594-607.

Sampère J., 2017. Mise en place d’un protocole d'estimation des changements d’occupation des sols sur le territoire de France métropolitaine. Mémoire de fin d’étude.

Tuomisto H.L., Saouter E., Pant R., 2015. Default approaches for cross-cutting issues for the cattle related product environmental footprint pilots. European Commission, Joint Research Center. Italy. 21p.

Union Européenne, 2010, Commission Decision of 10 June 2010 on guidelines for the calculation of land carbon stocks for the purpose of Annex V to Directive 2009/28/EC (notified under document C(2010) 3751), 22p.

Virto I, Barré P, Burlot A, Chenu C (2012) Carbon input differences as the main factor explaining the variability in soil organic C storage in no-tilled compared to inversion tilled agrosystems. Biogeochemistry 108:17–26.

L’ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L’ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

ADEME
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE
MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE, DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr