

PROJET CE-CARB

CULTURES ENERGETIQUES ET STOCKAGE
DE CARBONE DANS LES SOLS

SYNTHESE DU RAPPORT FINAL



EXPERTISES

Fév.
2022

REMERCIEMENTS

Les auteurs de ce rapport remercient toutes les personnes qui sont intervenues dans la conduite des dispositifs expérimentaux, en particulier Emilie MIGNOT (INRAE) et Florianne COULOUMIES (ARVALIS), et dans l'acquisition des données au champ et au laboratoire. Ils remercient également les deux stagiaires qui ont travaillées dans le cadre du projet : Thidarat RUPNGAM (M2 AgroParisTech) et Bérénice DEBRIL (M1 UPJV). Les auteurs remercient aussi Thomas EGLIN (ADEME), Sylvain PELLERIN (INRAE) et Sylvie RECOUS (INRAE) pour les échanges et conseils.

CITATION DE CE RAPPORT

FERCHAUD Fabien, BOISSY Joachim, MOUNY Jean-Christophe, DUPARQUE Annie, MARSAC Sylvain, CHENU Claire, 2022. **Projet CE-CARB : cultures énergétiques et stockage de carbone dans les sols. Synthèse du rapport final.** 18 pages.

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'oeuvre 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.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 17-03-C0005

Étude réalisée par INRAE, Agro-Transfert Ressources et Territoires et GIE GAO pour ce projet financé par l'ADEME

Projet de recherche coordonné par : INRAE

Appel à projet de recherche : GRAINE

Coordination technique - ADEME : EGLIN Thomas

Direction : Bioéconomie et Energies Renouvelables

SOMMAIRE

RÉSUMÉ	4
ABSTRACT	5
1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DU PROJET	6
2. METHODOLOGIE	7
2.1. Lot 1 – Effet des cultures énergétiques sur les stocks de carbone	7
2.2. Lot 2 – Déterminants des variations des stocks de carbone	7
2.3. Lot 3 – Bilan GES des cultures énergétiques	8
2.4. Lot 4 – Adaptation du modèle AMG de dynamique du carbone dans les sols	8
3. RESULTATS OBTENUS	10
3.1. Lot 1 - Effet des cultures énergétiques sur les stocks de carbone.....	10
3.2. Lot 2 - Déterminants des variations des stocks de carbone	12
3.3. Lot 3 – Bilan GES des cultures énergétiques	14
3.4. Lot 4– Adaptation du modèle AMG de dynamique du carbone dans les sols	14
4. CONCLUSION / PERSPECTIVES.....	16

RÉSUMÉ

La production de cultures énergétiques sera probablement amenée à se développer pour répondre aux besoins en biomasse (combustion, méthanisation, biocarburants, matériaux biosourcés). Parmi les cultures candidates, on trouve des cultures pérennes herbacées, comme le miscanthus ou le switchgrass, des cultures pluriannuelles traditionnellement fourragères, ou des cultures annuelles. Ces différentes cultures doivent pouvoir concilier forte productivité et faibles impacts environnementaux, notamment au regard de leurs bilans gaz à effet de serre (GES). Cependant, il existe encore de nombreuses incertitudes sur ces bilans, notamment concernant le stockage/déstockage de carbone (C) dans les sols. Le projet CE-CARB (Cultures Énergétiques et stockage de CARBOne dans les sols) avait pour objectifs d'apporter des références fiables concernant l'impact des cultures énergétiques sur les évolutions de stocks de C du sol dans différents contextes, d'identifier les déterminants des variations de stocks observées, d'évaluer leurs conséquences sur le bilan GES des cultures et d'adapter/paramétrer un outil de simulation de l'évolution des stocks de C du sol pour ces cultures afin d'évaluer des scénarios de production de biomasse.

Des mesures ont été effectuées sur deux plateformes expérimentales situées dans la Somme et en Haute-Garonne, douze à treize ans après leur implantation, avec des résultats contrastés : 1) augmentation des stocks de C du sol sous cultures pérennes (miscanthus et switchgrass), plus importantes sur le site de Haute-Garonne que sur celui de la Somme ; 2) pour ces cultures pérennes, tendance à une augmentation plus importante des stocks en récolte tardive (fin d'hiver) qu'en récolte précoce (automne) et avec que sans irrigation en Haute-Garonne ; 3) dans la Somme, stocks mesurés après douze ans proches des stocks initiaux sous cultures pluriannuelles (fêtuque et luzerne) et en forte diminution sous cultures annuelles.

Les mesures de restitution de résidus et les simulations réalisées avec le modèle AMG ont montré que les différences d'évolution des stocks de C du sol entre cultures pérennes, pluriannuelles et annuelles, pour le site de la Somme, s'expliquent principalement par des entrées de C au sol plus faibles pour les cultures annuelles, principalement du fait des entrées souterraines. Il n'a par contre pas été mis en évidence d'effet du type de culture sur la protection physique du C organique du sol. L'utilisation d'AMG a aussi permis de montrer que le stockage de C pour les cultures pérennes plus important en Haute-Garonne que dans la Somme s'explique à la fois par des entrées de C au sol supérieures (entrées aériennes et souterraines) et par une minéralisation du C organique du sol plus faible. Les évolutions de stock de C du sol ont un impact important sur les bilans GES réalisés pour les traitements expérimentaux du site de la Somme. Les cultures pérennes sont ainsi les moins émettrices, du fait notamment d'une atténuation importante par le stockage de C. Au contraire, les cultures annuelles ont les bilans GES les plus élevés. Une méthode générique a pu être établie pour estimer les entrées de C au sol sous miscanthus en récolte tardive. Cette méthode ne nécessite que deux variables facilement accessibles : la température moyenne annuelle du site et le rendement du miscanthus à la récolte. Ce mode de calcul pourra donc être facilement intégré dans les outils de simulation basés sur le modèle AMG. Le stockage de C après vingt ans sous miscanthus, par rapport à un système de référence en grande culture, a été simulé avec AMG dans cinq cas types : ces simulations montrent un stockage additionnel moyen de 0.25 ± 0.08 t C ha⁻¹ an⁻¹ dans le nord de la France et de 0.75 t C ha⁻¹ an⁻¹ en Haute-Garonne. Les cultures énergétiques pérennes semblent donc prometteuses pour produire de la biomasse avec de faibles émissions de GES.

ABSTRACT

Bioenergy crops are expected to provide biomass for combustion, methanization, biofuels or biomaterials. Different crop types such as perennial grasses, semi-perennial forage or annual crops are being investigated. These crops will have to fulfil several requirements, including high productivity, low environmental impacts and low greenhouse gas (GHG) emissions. However, these GHG balances remain very uncertain, particularly regarding changes in soil organic carbon stocks (SOC). The CE-CARB project had several objectives: 1) to provide new and reliable experimental data regarding SOC stock changes under bioenergy crops in different contexts; 2) to identify the causes of the observed changes; 3) to assess their consequences on the GHG balance of the crops; 4) to adapt/parameterize a model for simulating changes in SOC stocks for these crops and evaluating biomass production scenarios.

Measurements were carried out on two experimental sites located in France (Somme and Haute-Garonne), after twelve to thirteen years, with contrasting results: 1) increase in SOC stocks under perennial crops (miscanthus and switchgrass), more important in the Haute-Garonne site than in the Somme site; 2) for these perennial crops, tendency to a more important increase in stocks in late harvest (end of winter) than in early harvest (autumn) and with than without irrigation in the Haute-Garonne site; 3) in the Somme site, SOC stocks measured after twelve years close to the initial stocks under semi-perennial crops (fescue and alfalfa) and strongly decreasing under annual crops.

Crop residue measurements and simulations performed with the AMG model showed that the differences in soil C stocks between perennial, semi-perennial and annual crops, for the Somme site, are mainly explained by lower C inputs for annual crops, mainly due to belowground inputs. However, no effect of crop type on the physical protection of SOC was found. The use of AMG also showed that the higher SOC storage for perennial crops in the Haute-Garonne site than in the Somme site is explained by both higher C inputs (aboveground and belowground inputs) and lower SOC mineralization. Changes in SOC stocks have a significant impact on the GHG balances for the experimental treatments at the Somme site. Perennial crops are the least emitting, due in particular to a significant mitigation by C storage. On the contrary, annual crops have the highest GHG balances.

A generic method could be established to estimate C inputs under late-harvested miscanthus. This method requires only two easily accessible variables: the mean annual temperature of the site and the miscanthus yield at harvest. This method can therefore be easily integrated into simulation tools based on the AMG model. SOC storage after 20 years under miscanthus, compared to a reference field crop system, was simulated with AMG in five situations: these simulations show an average additional storage of $0.25 \pm 0.08 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ in northern France and $0.75 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ in Haute-Garonne. Perennial bioenergy crops such as miscanthus thus seem promising for producing biomass with low GHG emissions.

1. Contexte et objectifs du projet

La biomasse est une source de carbone renouvelable qui peut contribuer à remplacer les ressources fossiles non seulement pour l'énergie, mais aussi pour la chimie et les matériaux. Le développement de cette « bioéconomie » s'accompagne cependant d'un défi important : produire en quantité des ressources renouvelables adaptées aux valorisations énergétiques et/ou industrielles tout en assurant la sécurité alimentaire et la préservation de l'environnement. L'agriculture constitue une des sources majeures de biomasse, en particulier via les résidus (pailles) des grandes cultures. La disponibilité de ces résidus est cependant limitée. La production de cultures énergétiques valorisées en plante entière sera donc probablement amenée à se développer pour répondre aux besoins en biomasse.

Parmi les cultures candidates, on trouve des cultures pérennes herbacées en C4, comme le miscanthus (*Miscanthus x giganteus*) ou le switchgrass (*Panicum virgatum*), qui suscitent un vif intérêt. Il s'agit de plantes pérennes à rhizome, récoltées annuellement. On trouve aussi des cultures pluriannuelles traditionnellement fourragères, telles que la luzerne ou des cultures annuelles, comme le sorgho biomasse.

Pour être développées, ces différentes cultures devront concilier une forte productivité et de faibles impacts environnementaux. Dans ce contexte, le bilan gaz à effet de serre (GES) sera un critère prépondérant pour choisir les espèces et pratiques culturales les plus adaptées. Or, il existe encore de nombreuses incertitudes sur ces bilans et en particulier sur le stockage/déstockage de carbone dans les sols. Préciser ces bilans GES est important pour aider au choix des systèmes de cultures et fiabiliser les évaluations à l'échelle de la filière ou du territoire.

Le projet CE-CARB (Cultures Energétiques et stockage de CARBonne dans les sols) a été financé par l'ADEME dans le cadre de l'Appel à Projets de Recherche GRAINE 2016 (gérer, produire et valoriser les biomasses). Ces objectifs étaient : 1) d'apporter de nouvelles références fiables concernant l'impact des cultures énergétiques pérennes, pluriannuelles et annuelles sur les évolutions de stocks de carbone (C) du sol, en fonction des pratiques culturales et du contexte pédoclimatique ; 2) d'identifier les déterminants des variations de stocks observées ; 3) d'évaluer leurs conséquences sur le bilan GES des cultures ; 4) d'adapter et paramétrer un outil de simulation de l'évolution des stocks de C du sol pour ces cultures et évaluer des scénarios de production de biomasse. Ces quatre objectifs correspondent aux quatre lots du projet.

2. Méthodologie

2.1. Lot 1 – Effet des cultures énergétiques sur les stocks de carbone

Le projet s'est appuyé sur deux sites expérimentaux, initiés en 2006 et permettant d'explorer des contextes pédoclimatiques contrastés : le dispositif « Biomasse & Environnement » (B&E) d'INRAE, dans la Somme, et la plateforme du GIE GAO, en Haute-Garonne. Avant 2006, ces deux sites étaient en grandes cultures avec labour depuis de nombreuses années.

Le dispositif B&E permet de comparer des cultures énergétiques : 1) pérennes (miscanthus et switchgrass) récoltées soit en récolte précoce (octobre), avant sénescence complète et chute des feuilles, soit en récolte tardive (février-mars) ; 2) pluriannuelles, avec deux rotations (fétuque-luzerne et luzerne-fétuque, inversion tous les trois ans environ) ; 3) annuelles, avec deux rotations (sorgho-triticales et triticales-sorgho, le sorgho ayant été remplacé par du maïs à partir 2014). Ces huit systèmes sont croisés avec deux niveaux de fertilisation azotée (N- et N+) pour donner seize traitements expérimentaux

La plateforme du GIE GAO est centrée sur les cultures pérennes. Différents aspects ont été étudiés dans le cadre de CE-CARB : 1) l'alimentation hydrique (cultures pluviales ou irriguées à évapotranspiration maximale) pour miscanthus et switchgrass en récolte tardive ; 2) la date de récolte (comparaison récolte précoce et tardive) pour miscanthus et switchgrass sans irrigation. La différenciation des traitements a cependant été arrêtée pour ces deux essais respectivement après 2014 et 2013. Toutes les parcelles ont ensuite été conduites en récolte tardive sans irrigation. Tous les traitements ont reçu une fertilisation azotée.

Un état initial des stocks de carbone (C) et d'azote (N) organiques du sol a été réalisé sur chaque dispositif expérimental en 2006. Le dispositif B&E avait également fait l'objet de premières mesures de stocks en 2011-2012. Dans le cadre de CE-CARB, de nouvelles campagnes de mesure des stocks de C et N du sol ont été réalisées sur ces deux sites en 2018 ou 2019. Les stocks ont été mesurés jusqu'à 60 cm de profondeur en différenciant 5 horizons. Ils ont été calculés pour chaque site à masses de sols équivalentes pour tenir compte des différences de densité apparente du sol entre traitements et/ou années. L'analyse isotopique ¹³C a également permis de tracer le C issu des plantes en C4 (miscanthus, switchgrass, sorgho et maïs).

2.2. Lot 2 – Déterminants des variations des stocks de carbone

Dans ce lot, des mesures ont été réalisées pour quantifier les entrées de C au sol, d'autres mesures ont été effectuées pour évaluer le degré de protection physique du carbone du sol sous différents types de cultures et les traitements expérimentaux étudiés ont été simulés avec le modèle AMG afin de distinguer le rôle des entrées de C et de la minéralisation.

Des mesures de résidus laissés après récolte ont été réalisées en 2018 sur les différents traitements du dispositif B&E (cultures pérennes et annuelles). La dernière rotation entre cultures pluriannuelles ayant eu lieu en 2017-2018 (destruction des cultures par un labour à l'automne puis semis des nouvelles cultures au printemps), des prélèvements ont été effectués à l'automne 2017 afin de quantifier la biomasse restituée lors de la destruction de ces cultures.

La protection physique du C organique du sol a été étudiée sur le dispositif B&E pour 4 traitements (miscanthus tardif N+, switchgrass tardif N+, fétuque-luzerne N+, sorgho-triticales N+) et 3 horizons (0-5, 5-20 et 20-30 cm). Deux méthodes de fractionnement ont été utilisées : 1) fractionnement physique granulométrique et densimétrique de particules ; 2) fractionnement de la matière organique localisée dans les micros-agrégats. La première méthode permet de séparer les matières organiques selon leur taille : matières organiques particulaires (MOP) et matières organiques liées aux particules minérales argiles et limons. La deuxième méthode permet de quantifier la matière organique physiquement protégée dans les micro-agrégats (< 200 µm).

Le modèle AMG a été utilisé pour simuler l'évolution des stocks de C organique du sol dans l'ensemble des traitements expérimentaux étudiés dans le lot 1. AMG est un modèle simple permettant de simuler la dynamique du C du sol au pas de temps annuel, qui a déjà été évalué sur de nombreuses expérimentations de long terme en grandes cultures. Les données d'entrée nécessaires pour réaliser une simulation sont l'estimation des entrées de C annuelles au sol, les données climatiques et l'irrigation annuelle, le stock de C du sol initial et les caractéristiques du sol (teneurs en argile et calcaire, pH, C/N). Deux ensembles de simulations ont été réalisés : 1) sur tous les traitements du dispositif B&E, afin d'évaluer la capacité du modèle à simuler l'évolution des stocks de C du sol en utilisant les paramètres par défaut pour la minéralisation et en optimisant uniquement les entrées de C non mesurées, c'est-à-dire celles liées aux organes souterrains ; 2) sur les cultures pérennes pour les deux sites étudiés, afin de quantifier les entrées de C nécessaires à l'accroissement des stocks de carbone C4 observé dans chaque traitement, avec là aussi, les paramètres par défaut du modèle pour la minéralisation.

2.3. Lot 3 – Bilan GES des cultures énergétiques

Le lot 3 s'est attaché à comparer les bilans GES globaux des systèmes de cultures étudiés, via une Analyse de Cycle de Vie (ACV) allant de l'amont agricole jusqu'à la récolte. Un bilan GES global comprend à la fois une évaluation des émissions brutes de GES issues de l'utilisation d'intrants et de carburants, mais aussi une évaluation des variations de stocks de C du sol. Ce travail s'est focalisé sur le dispositif B&E, pour lequel les émissions de protoxyde d'azote (N₂O) ont été mesurées en continu, à l'aide de chambres automatiques, sur différents traitements et pendant plusieurs années.

Plus précisément, l'évaluation des émissions brutes de gaz à effet de serre intègre : 1) les émissions directes et indirectes de N₂O liées aux apports d'azote ; 2) les émissions de CO₂ liées à la combustion du carburant lors des passages des machines ; 3) les émissions liées à la production des intrants et des machines : production et transport des semences, engrais azotés de synthèse, amendements, transformation et transport des produits résiduels organiques (PRO), production et stockage du matériel). Concernant les variations de COS, une fois converties en équivalent CO₂, celles-ci sont sommées aux émissions de GES. Si elles sont négatives (stockage de COS) elles seront considérées comme une atténuation des émissions GES, si elles sont positives (déstockage de COS) il s'agit d'émissions de GES supplémentaires. Les bilans GES sont calculés pour 1 tonne de matière sèche récoltée et pour 1 hectare année (moyenne sur 12 ans).

2.4. Lot 4 – Adaptation du modèle AMG de dynamique du carbone dans les sols

Dans le lot 4 du projet, nous avons choisi de nous focaliser sur le miscanthus en récolte tardive. En effet, il s'agit d'une part, de la culture énergétique pérenne actuellement la plus cultivée en France ou en Europe et d'autre part, de celle dont on dispose du plus de références expérimentales en Europe. De plus, que ce soit en production ou en expérimentation, cette culture est conduite très majoritairement en récolte tardive.

Tout d'abord, les résultats des simulations AMG réalisées dans le lot 2 ont été complétés par des simulations sur des données issues de la bibliographie et analysés afin de pouvoir estimer les entrées de C du miscanthus à partir de données facilement accessibles. Les données de 5 sites issus de la littérature ont été utilisés, avec du miscanthus âgé de 11 à 19 ans pour des conditions pédoclimatiques relativement contrastées (climat frais dans l'ensemble). Les entrées de C souterraines ont été optimisées sur chaque site afin de simuler l'augmentation observée du stock de carbone C4. L'ensemble des situations simulées, soit sept sites au total, a alors été analysé conjointement.

Des simulations ont ensuite été réalisées avec AMG pour quantifier les évolutions de stocks de C sous miscanthus dans différents contextes pédoclimatiques et les comparer à celles

obtenues pour des systèmes de grandes cultures représentatifs du contexte étudié. Cinq « cas types » ont été simulés : trois cas types représentant trois types de sol des Hauts-de-France (limon profond, cranette sur craie, sable limoneux), un cas type en sol de craie en Champagne (Marne) et un cas type en sol argilo-calcaire dans le Lauragais (Haute-Garonne). Pour chaque cas type, trois scénarios ont été simulés : le système de culture de référence sur 20 ans, un scénario avec miscanthus implanté en première année puis en continu sur 20 ans (miscanthus permanent) et un scénario avec miscanthus implanté en première année, détruit au bout de 19 ans et avec une culture de blé en vingtième année (miscanthus destr.).

3. Résultats obtenus

3.1. Lot 1 - Effet des cultures énergétiques sur les stocks de carbone

Les mesures effectuées dans le lot 1 montrent que les cultures pérennes ont permis de stocker, en 12 ou 13 ans, 3,2 tC ha⁻¹ en moyenne pour le dispositif B&E (soit 0,26 tC ha⁻¹ an⁻¹ ou 5 ‰ an⁻¹) et 12,4 tC ha⁻¹ en moyenne pour la plateforme du GIE GAO (soit 0,96 tC ha⁻¹ an⁻¹ ou 25 ‰ an⁻¹) dans la couche de sol anciennement travaillée (couche L1-3) (Figure 1 et Figure 2). Il y a peu d'écart en moyenne entre miscanthus (Mis) et switchgrass (Swi). Les traitements en récolte tardive (T) ont eu souvent tendance à stocker plus que les traitements en récolte précoce (P), même si les différences étaient rarement significatives. De même, les traitements irrigués (ETM) sur la plateforme du GIE GAO ont eu tendance à stocker davantage que les traitements non irrigués (Pluvial). Nous n'avons par contre par observé d'effet du niveau de fertilisation azotée sur les stocks de C (sur le dispositif B&E).

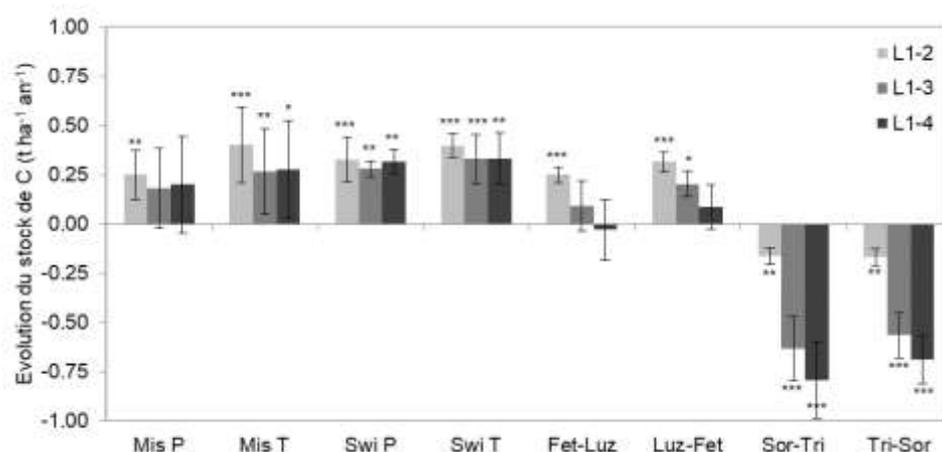


Figure 1 : Evolutions du stock de C organique du sol cumulé (t ha⁻¹) calculées à masses de sol équivalentes entre 2006 et 2018 sur le dispositif B&E (moyenne des N- et N+) pour les couches L1-2 (2865 t ha⁻¹), L1-3 (4905 t ha⁻¹) et L1-4 (5835 t ha⁻¹). Les étoiles indiquent un changement significatif entre les deux dates (*p<0.05 ; **p<0.01 ; ***p< 0.001). P : Récolte Précoce, T : Récolte Tardive

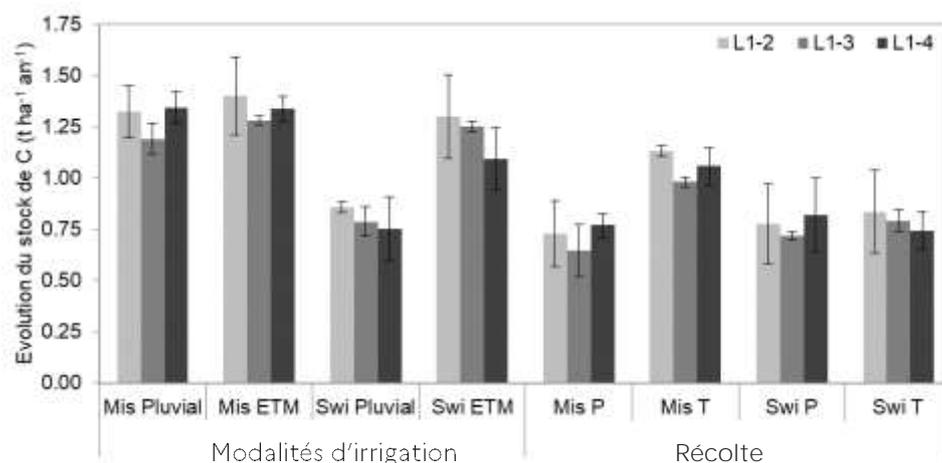


Figure 2 : Evolutions du stock de C organique du sol cumulé (t ha⁻¹) calculées à masses de sol équivalentes entre 2006 et 2019 sur la plateforme du GIE GAO pour les couches L1-2 (2920 t ha⁻¹), L1-3 (4520 t ha⁻¹) et L1-4 (9440 t ha⁻¹). L'augmentation du stock est significative (p < 0.001) pour tous les traitements et les trois couches de sol. ETM : Irrigation à évapotranspiration maximale, P : Récolte Précoce, T : Récolte Tardive

Ce stockage de C pour les cultures pérennes s'est accompagné d'une forte stratification des teneurs en C en fonction de la profondeur, avec une augmentation uniquement dans la première couche de sol (L1 ~0-5 cm) pour le dispositif B&E et dans les deux premières couches de sol (L1 ~0-5 cm et L1 ~5-20 cm) pour la plateforme du GIE GAO (Figure 3).

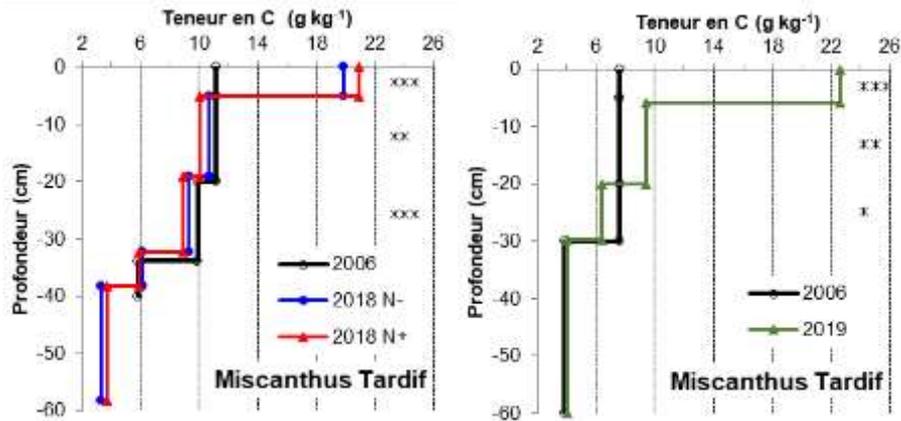


Figure 3 : Profils de teneur en C organique ($g\ kg^{-1}$) à masses équivalentes pour le miscanthus en récolte tardive, sur le dispositif B&E à gauche (2006 et 2018) et sur la plateforme du GIE GAO à droite (2006 et 2019). Les étoiles indiquent un changement significatif entre les deux dates (* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$). N- : traitement sans fertilisation azotée ; N+ : traitement avec fertilisation azotée

L'accroissement des stocks de C sous les cultures pérennes s'est aussi accompagné d'une augmentation significative du rapport C/N de la matière organique du sol : le rapport C/N moyen sur L1-3 est passé en moyenne de 9 à 9,7 pour le dispositif B&E (sans différence significative entre traitements N- et N+) et de 7,9 à 9,5 pour la plateforme du GIE GAO. Les stocks d'azote du sol sont restés stables en moyenne pour le dispositif B&E (entre -17 et +2 $kg\ N\ ha^{-1}\ an^{-1}$ selon les traitements), mais ils ont significativement augmenté pour la plateforme du GIE GAO (+0.52 $t\ N\ ha^{-1}$ en moyenne, soit entre +26 et +55 $kg\ N\ ha^{-1}\ an^{-1}$ selon les traitements).

Les mesures isotopiques ^{13}C ont permis de tracer le C issu des plantes pérennes en C4. Si l'on regarde l'accroissement des stocks de carbone C4 en fonction du temps, les mesures effectuées sont cohérentes avec les données de la littérature scientifique internationale (

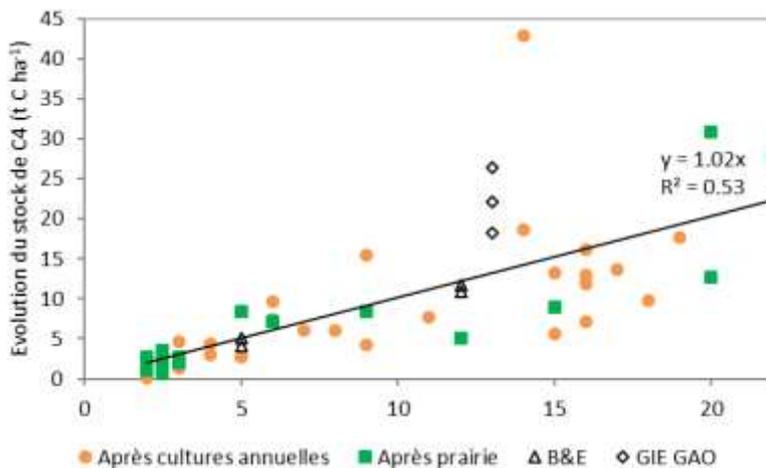


Figure 4). Les valeurs observées sur la plateforme du GIE GAO pour le miscanthus sont dans le haut de la gamme de variation, mais ce site présente le climat le plus chaud parmi tous les sites étudiés. D'autre part, l'évolution des stocks de carbone C3 montre la cohérence des mesures effectuées dans le cadre du projet, alors que les résultats de la littérature sont beaucoup plus variables. Cela s'explique probablement par la prédominance dans la littérature de mesures synchroniques, qui sont moins fiables. Le suivi diachronique d'essais de long terme devrait être la méthode privilégiée pour étudier l'impact des systèmes de culture sur les stocks de C organique du sol.

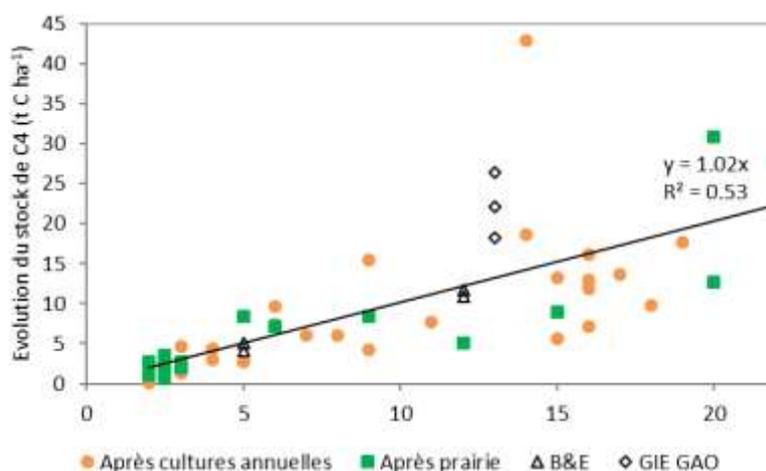


Figure 4 : Evolution du stock de carbone C4 (issu du miscanthus) dans l'horizon de surface (0-20 à 0-40 cm) après implantation de miscanthus, en fonction de l'âge de la plante (années). Données issues de la littérature pour deux utilisations du sol précédentes (cultures annuelles ou prairie) et résultats acquis dans le projet CE-CARB sur les deux sites (dispositif B&E et plateforme du GIE GAO). La ligne noire correspond à la droite de régression linéaire pour l'ensemble des données.

Sur le dispositif B&E, après avoir assez fortement augmenté entre 2006 et 2012 (1 tC ha⁻¹ an⁻¹ en moyenne sur L1-3), les stocks de C organique sous les cultures pluriannuelles (Fet-Luz et Luz-Fet) ont diminué entre 2012 et 2018 (-0.58 t C ha⁻¹ an⁻¹ en moyenne sur L1-3), pour revenir à un niveau légèrement supérieur à ceux mesurés en 2006 (voir identique à 2006 sur L1-4) (Figure 1). Une forte chute des stocks de COS a été observée après 12 ans sous les cultures annuelles récoltées systématiquement en plante entière (Sor-Tri et Tri-Sor), correspondant à en moyenne -0.60 t C ha⁻¹ an⁻¹ sur L1-3 (Figure 1).

3.2. Lot 2 - Déterminants des variations des stocks de carbone

Dans le lot 2, les mesures sur le dispositif B&E ont montré que les quantités de C restituées chaque année par les chaumes à la récolte sont faibles pour tous les traitements en cultures pérennes et annuelles (entre 0.34 et 1.01 t C ha⁻¹) et globalement non corrélées au rendement. Pour le miscanthus en récolte tardive, s'ajoutent à ces restitutions aériennes les feuilles tombées avant la récolte (environ 1.2 t C ha⁻¹ an⁻¹).

L'étude de la protection physique du COS n'a pas permis d'observer de différence entre les types de cultures (pérennes, pluriannuelles et annuelles), que ce soit pour les matières organiques particulières entre 50 et 200 μm ou pour les matières organiques associées aux fractions fines (inférieures à 50 μm) : la proportion de C occlus dans les micro-agrégats est identique dans tous les traitements étudiés. De plus, le C additionnel sous cultures pérennes (en comparaison aux cultures annuelles) est présent à la fois dans les fractions grossières (MOP) et fines de la matière organique.

Les simulations réalisées avec le modèle AMG sur le dispositif B&E ont permis de montrer que les différences observées entre d'une part, les cultures pérennes et pluriannuelles (stockage ou stabilité des stocks) et d'autre part, les cultures annuelles (fort déstockage), s'expliqueraient principalement par des entrées de C au sol environ 2.6 fois plus élevées pour les premières, principalement du fait des entrées souterraines. En effet, après optimisation des entrées de C souterraines des cultures pérennes (valeur annuelle fixe par espèce) et pluriannuelles (valeur proportionnelle au rendement), le modèle présente des performances satisfaisantes, en utilisant le paramétrage standard pour la minéralisation (Figure 5). La dynamique des stocks de C du sol est cependant moins bien reproduite pour les cultures pluriannuelles et annuelles que pour les cultures pérennes.

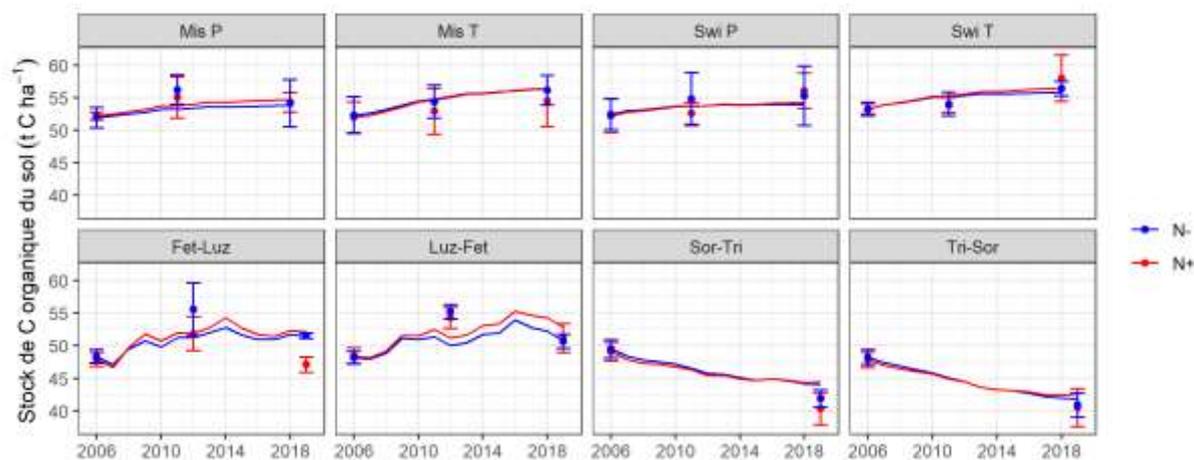


Figure 5 : Stocks de C organique du sol (couche L1-3) observés et simulés avec AMG sur le dispositif B&E.

Les simulations avec AMG ont aussi permis de confirmer que le stockage de C plus important observé sous les cultures pérennes pour la plateforme du GIE GAO par rapport au dispositif B&E, s'explique à la fois par des entrées de C supérieures (entrées aériennes et souterraines) et par une minéralisation plus faible. En effet, après optimisation pour chaque traitement des entrées de C souterraines sur la base des stocks de carbone C4, le modèle présente des performances satisfaisantes (Figure 6 et Figure 7). AMG sous-estime cependant légèrement les stocks de C du sol pour les récoltes précoces (entrées de carbone C3 par les adventices non prises en compte) et les surestime légèrement pour les traitements irrigués.

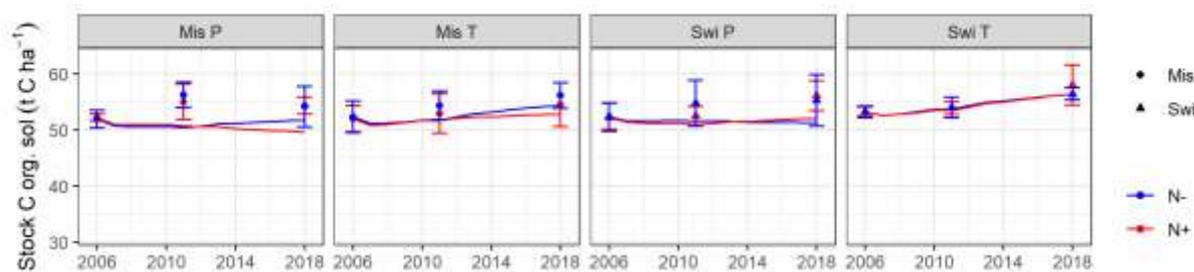


Figure 6 : Stocks de C organique du sol (couche L1-3) observés et simulés avec AMG sur le dispositif B&E pour les cultures pérennes.

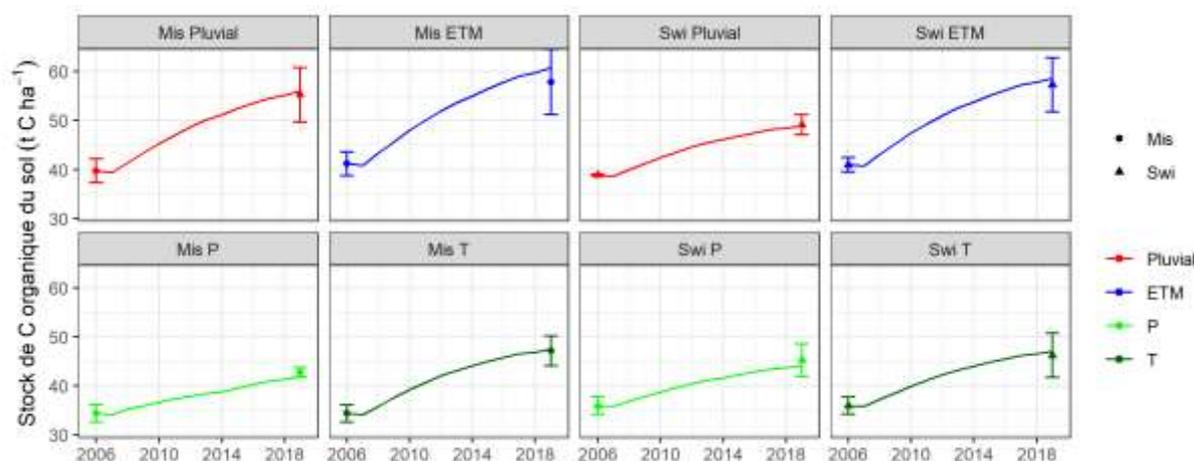


Figure 7 : Stocks de C organique du sol (couche L1-3) observés et simulés avec AMG sur la plateforme du GIE GAO

3.3. Lot 3 – Bilan GES des cultures énergétiques

Les résultats obtenus dans le lot 3 montrent, sur la base des traitements du dispositif B&E, que les bilans GES des cultures énergétiques peuvent être très différents selon le type de culture et les pratiques culturales (Figure 8).

- Les cultures pérennes (miscanthus et switchgrass) présentent les meilleurs bilans GES, notamment du fait d'une atténuation importante par le stockage de C dans le sol. Ces bilans peuvent même être négatifs dans les cas de pérennes non fertilisées (traitement N-). Les cultures pluriannuelles, selon les cas et dans une moindre mesure, peuvent aussi avoir des bilans GES intéressants.
- Pour les cultures annuelles (triticale et sorgho ou maïs), récoltées en plante entière, le déstockage de C est important et induit des émissions supplémentaires de GES conséquentes (> 50 % des émissions totales). Cela a pour conséquence des bilans GES plus élevés.
- Les traitements N-, malgré une production de biomasse plus faible qu'en N+, présentent des bilans GES par tonne de matière sèche et par hectare en général moindres que les traitements N+. Ceci s'explique par des émissions brutes plus faibles en N- avec un stockage de COS équivalent aux N+.

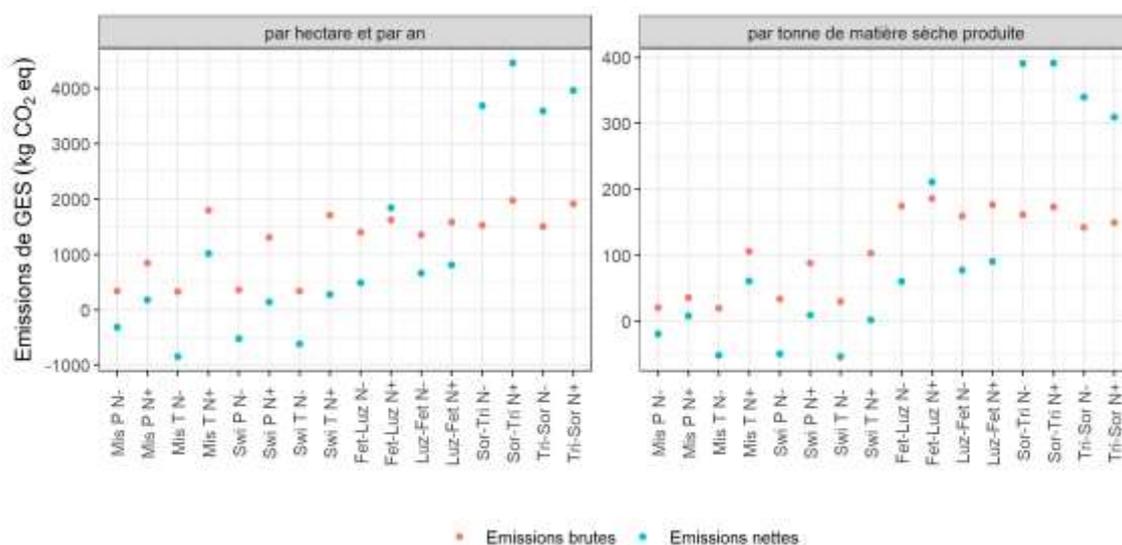


Figure 8 : Emissions de gaz à effet de serre (kg CO₂ eq) brutes (sans prise en compte des variations de stocks de C) et nettes (avec prise en compte des variations de stocks de C) pour les différents traitements du dispositif B&E exprimées par hectare et par an (à gauche) ou par tonne de MS produite (à droite).

La prise en compte des variations de stocks de C du sol modifie donc assez fortement les bilans GES. Concernant les autres postes d'émissions, les émissions de N₂O au champ sont aussi un poste important : elles représentent entre 22 et 66 % des émissions brutes (40 % en moyenne).

3.4. Lot 4– Adaptation du modèle AMG de dynamique du carbone dans les sols

Une fonction de calcul des entrées de C souterraines a pu être établie pour le miscanthus en récolte tardive à partir de simulations réalisées avec AMG (optimisation des entrées souterraines sur la base des stocks de carbone C4) dans sept sites expérimentaux, soit les deux sites étudiés dans le projet et cinq autres sites issus de la littérature. Cette fonction, qui utilise la température moyenne annuelle du site et le rendement du miscanthus, est valable pour une gamme de température assez large (9.7 à 13.7°C). Elle doit être associée à une estimation des entrées de C aériennes : valeur forfaitaire pour les chaumes et calcul à partir du rendement pour les feuilles sénescentes. Pour les sept sites testés, ce mode de calcul des entrées de C au sol permet de simuler de manière fiable les stocks de carbone C4 avec AMG (Figure 9).

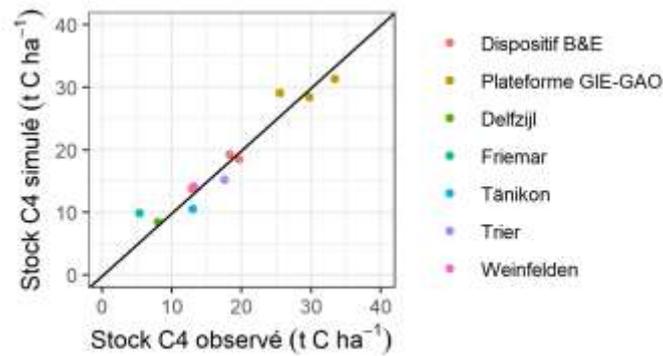


Figure 9 : Stocks de carbone C4 observés et simulés avec AMG en utilisant le modèle linéaire pour l'estimation des entrées souterraines dans les 11 traitements expérimentaux. La ligne noire représente la bissectrice.

Les scénarios simulés avec AMG montrent que la culture de miscanthus permet de stocker dans les sols environ 5.0 ± 1.6 t C ha⁻¹ de plus qu'un système de grande culture de référence au bout de 20 ans (soit 0.25 ± 0.08 t C ha⁻¹ an⁻¹), pour différents cas types au nord de la France (Figure 10). Dans le cas type du Lauragais, le stockage s'élève à 15 t C ha⁻¹ de plus que la référence au bout de 20 ans, soit 0.75 t C ha⁻¹ an⁻¹ (Figure 10). Le stockage additionnel environ trois fois plus élevé dans le cas type du Lauragais que dans les cas types du nord de la France est obtenu malgré un rendement du miscanthus plus faible, à cause du stress hydrique, et est donc principalement lié à la température moyenne annuelle élevée (14.1 °C), favorable aux entrées de C sous miscanthus, ainsi qu'aux faibles entrées de C dans le système de référence. Enfin, le stockage additionnel pourrait être plus important encore si l'on considère une destruction du miscanthus en fin de cycle, avec restitution au sol de toute la biomasse souterraine (0.37 ± 0.07 t C ha⁻¹ an⁻¹ pour les cas types du nord de la France et 0.91 t C ha⁻¹ an⁻¹ pour le cas type du Lauragais).

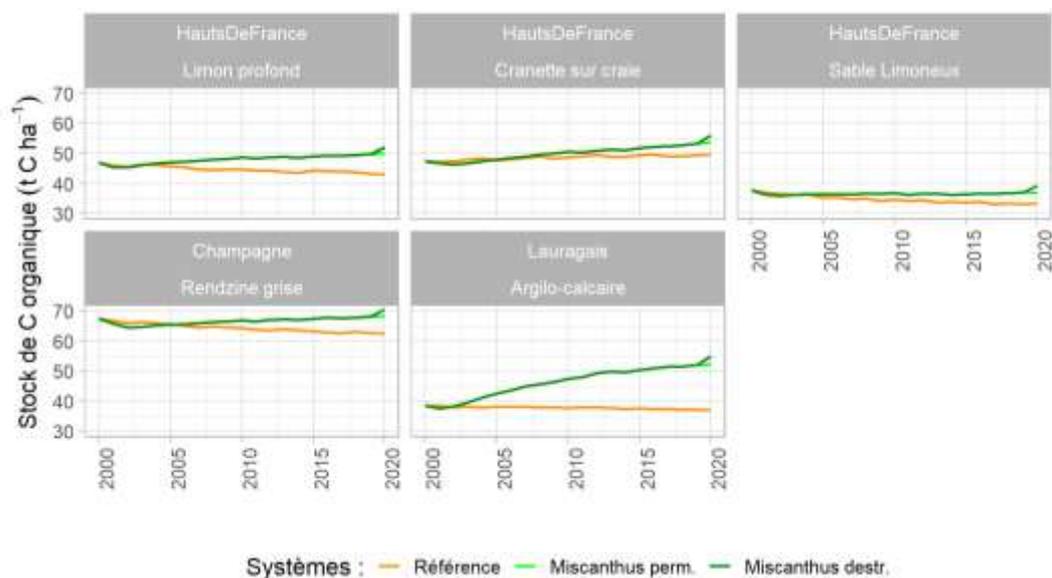


Figure 10 : Evolution des stocks de C dans les trois scénarios simulés pour les cinq cas types (Réf. = système de culture de référence ; Miscanthus perm. = miscanthus tardif permanent ; Miscanthus destr. = miscanthus tardif détruit au bout de 20 ans).

4. Conclusion / Perspectives

Le projet CE-CARB a donc permis de quantifier les évolutions de stocks de C du sol pour différentes cultures énergétiques dans deux contextes pédoclimatiques contrastés. Une augmentation des stocks de C du sol a été mise en évidence sous cultures pérennes (miscanthus et switchgrass), plus importantes sur le site de Haute-Garonne que sur celui de la Somme. Ce stockage a pu être relié à des entrées de C au sol importantes via les organes souterrains, sans modification de la protection physique des matières organiques du sol et de leur vitesse de minéralisation. Dans le site de la Somme, les stocks mesurés pour les cultures pluriannuelles après 12 ans étaient proches des stocks initiaux, alors qu'une forte diminution des stocks a été observée sous les cultures annuelles.

Pour ces cultures annuelles, la récolte en « plante entière » des cultures principales ainsi que la faible production des cultures intermédiaires font que les restitutions aériennes de C ont été particulièrement faibles. Ces traitements expérimentaux constituent donc une situation extrémisée qu'il n'est pas souhaitable d'appliquer en conditions agricoles. La fréquence d'introduction de cultures annuelles principales récoltées en « plante entière » dans les systèmes de culture devrait donc être raisonnée au même titre que l'exportation des pailles de cultures céréalières.

Les bilans GES réalisés sur les traitements expérimentaux du dispositif B&E (Somme) montrent que les cultures pérennes, et dans certains cas les cultures pluriannuelles, peuvent permettre de produire de la biomasse avec de faibles émissions de GES, particulièrement si l'on prend en compte le stockage de C dans le sol.

Les données acquises dans le projet, couplées à des données déjà publiées, ont permis de proposer un mode de calcul des entrées de C pour une culture de miscanthus, adapté au modèle AMG. Ce mode de calcul peut donc d'ores et déjà être intégré dans les outils de simulation basés sur le modèle AMG, comme SIMEOS-AMG, afin de pouvoir simuler l'évolution des stocks de C sous une culture de miscanthus. A notre connaissance, il s'agit du premier paramétrage générique du miscanthus pour un modèle de carbone du sol.

Le stockage additionnel simulé pour les cas types du nord de la France est comparable à celui permis par les pratiques les plus stockantes identifiées dans l'étude 4 pour 1000 de l'INRA (2019). Le stockage additionnel est même environ trois fois plus élevé dans le cas type du Lauragais. Dans ce type de climat, le potentiel de production du miscanthus est probablement très lié à la réserve utile du sol et l'irrigation peut s'avérer indispensable la ou les premières années pour assurer une implantation correcte. La simulation de cas types intermédiaires en matière de température moyenne annuelle serait donc intéressante. Enfin, il serait utile de confirmer par des mesures *in situ* l'effet de la destruction de la culture de miscanthus sur les stocks de C du sol.

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

Projet CE-CARB : Cultures énergétiques et stockage de C

Le projet CE-CARB a permis de quantifier les évolutions de stocks de C du sol liées à l'introduction de cultures énergétiques pérennes, pluriannuelles et annuelles dans des systèmes de cultures annuelles pour deux contextes pédoclimatiques dans le Nord et le Sud-Ouest de la France.

Une augmentation des stocks de C du sol, pouvant atteindre jusqu'à 1 tC/ha/an, a été mise en évidence sous cultures pérennes (Miscanthus - *Miscanthus x giganteus* et Switchgrass - *Panicum virgatum*). Elle est expliquée par des restitutions importantes de C par les organes souterrains. Cela se traduit par un bilan net d'émissions de gaz à effet de serre le plus faible pour ces cultures.

Le projet a également permis de proposer une paramétrisation simple et robuste du Miscanthus pour le modèle AMG, qui simule la dynamique du carbone dans les sols et est ainsi utilisable pour l'évaluation environnementale de projets d'implantation de ces cultures énergétiques.

L'essentiel à retenir

- L'implantation de cultures énergétiques pérennes (Miscanthus et Switchgrass) dans des systèmes de cultures annuelles permet d'augmenter les stocks de C dans les sols à des niveaux comparables à ceux permis par les pratiques agricoles identifiées comme les plus stockantes en France.
- Le modèle AMG permet d'évaluer de manière fiable l'effet sur le stockage de C dans les sols de projets d'implantation de Miscanthus en France.

