

Évaluer ex-ante le rapport coût- efficacité des politiques publiques de séquestration du carbone dans le sol

Jean-Marc Blazy

UR ASTRO, INRAE, Petit-Bourg, Guadeloupe, France.

Julie Subervie

(auteur de correspondance)
UMR CEE-M, Univ. Montpellier, CNRS, INRAE, Institut Agro,
Montpellier, France.
julie.subervie@inrae.fr

Jacky Paul

UR ASTRO, INRAE, Petit-Bourg, Guadeloupe, France.

François Causeret

UR ASTRO, INRAE, Petit-Bourg, Guadeloupe, France.

Loïc Guindé

UR ASTRO, INRAE, Petit-Bourg, Guadeloupe, France.

Sarah Moulla

UR ASTRO, INRAE, Petit-Bourg, Guadeloupe, France.

Alban Thomas

UMR PSAE, Université Paris-Saclay,
AgroParisTech, INRAE, Paris, France
et US ODR, INRAE, Castanet-Tolosan, France.

Jorge Sierra

UR ASTRO, INRAE, Petit-Bourg, Guadeloupe, France.

Les stocks de carbone organique dans le sol diminuent depuis plus d'un siècle, principalement dans les régions tropicales. Or, le maintien de la matière organique dans le sol est essentiel pour lutter contre le changement climatique et préserver la santé des sols. Une façon de résoudre ce problème est d'encourager les agriculteurs à séquestrer le carbone sur leur exploitation, mais les instruments de soutien disponibles aujourd'hui sont encore trop peu efficaces et doivent donc être améliorés. Nous avons évalué ex ante le rapport coût-efficacité d'une série de mesures agro-environnementales innovantes qui subventionnent l'utilisation de compost sous forme d'amendements organiques des sols, en réalisant une expérience de choix auprès de 300 agriculteurs de Guadeloupe et en simulant les gains environnementaux associés à chacune d'elles. Nous avons estimé que la mesure la plus efficace séquestrerait jusqu'à 25 000 teqCO₂ par an à l'échelle du territoire et que la mesure la plus rentable atteindrait cet objectif pour un coût d'environ 500 euros par teqCO₂.

Une démarche méthodologique originale

Depuis plusieurs années, la Politique agricole commune (PAC) de l'Union européenne a mis en place des mesures pour encourager des pratiques respectueuses de l'environnement. Il s'agit des mesures agro-environnementales (MAE) du deuxième pilier depuis 1992, de celles de l'éco-conditionnalité depuis 2003 et du verdissement dans la programmation 2014-2020, des éco-régimes à partir de 2023. Toutefois, la participation des agriculteurs à ces dispositifs a souvent été faible et leur efficacité n'a pas toujours été démontrée (Chabéferret et Subervie, 2013 ; Blazy et al., 2015). En Guadeloupe, le système des MAE existe depuis 2007 pour la pratique de l'amendement des sols par le compost, mais il a été extrêmement peu adopté jusqu'à présent (avec un taux d'adoption inférieur à 0,1 %). Parmi les raisons identifiées lors d'une consultation d'experts des services de vulgarisation agricole guadeloupéens, la complexité administrative de la procédure de contractualisation, le montant du paiement parfois insuffisant ou encore la réduction de la fertilisation chimique comme obligation associée dans le cahier des charges sont souvent mentionnés. Notre objectif était de déterminer quels types de MAE étaient susceptibles d'améliorer significativement la quantité de carbone du sol dans les exploitations agricoles guadeloupéennes et à quel coût. Pour cela, nous avons adopté une démarche méthodologique originale, combinant une expérimentation de choix impliquant 305 agriculteurs volontaires, avec des simulations biophysiques des effets de l'adoption des mesures proposées sur la séquestration du carbone dans les sols. L'analyse comprend trois étapes : (i) prédire le taux de participation des agriculteurs à chacune des MAE considérées, (ii) simuler les impacts environnementaux de l'adoption de chaque MAE dans les différentes situations agro-pédoclimatiques rencontrées en Guadeloupe, et (iii) calculer et extrapoler les gains environnementaux et les coûts économiques afin de hiérarchiser les MAE envisagées selon leur rapport coût-efficacité.

Les agriculteurs qui ont participé à l'expérience ont été invités à choisir parmi plusieurs MAE incluant des incitations monétaires et non monétaires, à utiliser le compost dans leurs activités agricoles. Outre le soutien financier, nous avons étudié trois leviers potentiels visant à améliorer le taux de participation des agriculteurs à ces MAE « compost » : une assistance technique gratuite, une prime financière conditionnelle à une adhésion collective et une réduction de l'utilisation d'engrais chimiques. Les attributs retenus correspondent aux leviers et contraintes que nous avons souhaité étudier pour accroître l'usage de compost sous forme d'amendements organiques par les agriculteurs. Pour l'expérience de choix, nous avons donc construit des profils MAE composés de quatre attributs.









Le premier attribut est un service technique et administratif et d'assistance, fourni gratuitement au bénéficiaire de la MAE, pour aider à la constitution du dossier de candidature et proposer des conseils techniques. Le deuxième attribut fait référence à l'exigence de réduction de 20 % de la fertilisation chimique. Lorsqu'il est inclus dans la MAE, une réduction de 20 % de la fertilisation chimique par rapport au taux de fertilisation recommandé est requise. Bien que cette réduction puisse être compensée par l'ajout de compost, on peut s'attendre à ce que l'introduction de cette contrainte dans le contrat diminue les chances d'adoption de la mesure. Le troisième attribut est le paiement perçu chaque année, pour chaque hectare engagé, en contrepartie du respect du cahier des charges. Ce montant est censé couvrir le prix d'achat du compost, son transport et son épandage. Enfin, le quatrième attribut est une incitation monétaire, sous forme de prime, versée individuellement, mais conditionnée à la participation d'autres agriculteurs du même secteur. Concrètement, cela signifie que l'adhérent perçoit 300 euros/ha/an (en plus de la subvention standard), dès

que 50 % des superficies agricoles de la filière à laquelle il appartient (banane, canne à sucre ou maraîchage) sont sous contrat MAE. Ce bonus collectif est censé jouer le rôle de ce que l'on appelle un *nudge* dans la littérature en économie comportementale (Thaler et Sunstein, 2009).

Conception de l'expérience de choix

Pour concevoir l'expérience de choix, nous avons suivi une approche standard (design *D-efficace*) permettant de construire un jeu de six cartes de choix pertinentes, avec un nombre limité de combinaisons, tout en restant le plus proche possible d'un plan factoriel orthogonal, c'est-à-dire dans lequel toutes les valeurs des attributs sont également représentées. Un exemple de carte de choix est décrit dans la Figure 1. Avec chacune des cartes, les agriculteurs étaient invités à choisir entre deux MAE (aux caractéristiques différentes) et l'option du statu quo.

Figure 1 : Exemple de carte de choix

Quelle mesure d'accompagnement (MAEC) pour l'utilisation du compost préférez-vous ?			
	Profil A	Profil B	
Accompagnement administratif (montage de dossier) et technique (si besoin)	 Oui	 Non	Je n'adopte aucun de ces deux profils
Réduction de fertilisation chimique obligatoire de 20%	Réduction de 20% 	Pas de réduction 	
Montant MAEC (€/ha/an)	 600 €	 600 €	
Bonus individuel (300€/ha/an) conditionné à une adhésion collective lorsque 50% des surfaces de la filière sont contractualisées			
Cochez votre option préférée : <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>			

Les enquêtes ont été menées dans les trois filières agricoles pour lesquelles l'adoption du compost représente le plus gros enjeu : la banane, la canne à sucre et le maraîchage. La filière banane se caractérise par le taux d'adoption le plus élevé et mobilise la majeure partie du compost actuel produit en Guadeloupe. Une augmentation des doses utilisées et/ou de la fréquence d'épandage de compost dans les bananeraies pourrait accélérer significativement le développement de la filière compostage. La filière canne à sucre est, quant à elle, peu consommatrice de compost mais représente près de 50 % de la surface agricole du territoire. Une augmentation de la superficie des terres en compost aurait donc un impact très important sur la demande locale en compost (Paul et al., 2017). Enfin, l'utilisation du compost dans le secteur du maraîchage est pertinente pour la sécurité alimentaire, en raison de la dégradation progressive des sols que ce type d'agriculture peut générer (Sierra et al., 2017). Notre échantillon

était composé de 305 agriculteurs, dont 99 producteurs de bananes, 105 producteurs de canne à sucre et 101 maraîchers. Ces agriculteurs ont été tirés au sort dans une base de données couvrant la majeure partie du territoire guadeloupéen (Chopin et al., 2015), selon une stratégie de stratification visant la représentativité de la diversité des types de sols de chaque secteur.

Séquestration du carbone dans le sol

Nous avons ensuite estimé la séquestration de carbone induite par chaque MAE considérée via le modèle MorGwanik (Sierra et al., 2015), qui est conçu pour simuler les variations de carbone organique du sol (COS) à l'échelle de la parcelle, en fonction des apports annuels de carbone (par exemple, les résidus de culture, y compris les racines, et les amendements organiques, y compris le compost) et les sorties de carbone (notamment par minéralisation). Les entrées et les sorties de carbone sont affectées par les conditions pédoclimatiques (par exemple, le type de sol et le climat local) et les pratiques agricoles (par exemple, la rotation, le travail du sol, la gestion des résidus de culture, le type et le taux d'engrais organiques). Le modèle a été calibré et testé pour les régions agroécologiques d'intérêt et la plupart des systèmes de culture en Guadeloupe, et a été initialisé avec la teneur moyenne en carbone observée pour chaque combinaison de sol et système de culture. Il est désormais bien établi que la séquestration du carbone n'est pas un processus linéaire mais tend vers un équilibre (ou asymptote) dans le temps, où la quantité de COS diminue au fil du temps (Don et al., 2011). Pour en tenir compte, nous avons effectué des simulations sur une période de 30 ans et le taux de séquestration du carbone a été exprimé comme l'augmentation annuelle moyenne du COS sur cette période. Dans ce qui suit, les estimations de séquestration de carbone seront exprimées en teqCO_2 (pour passer du carbone au CO_2 , on multiplie par 44/12).

Résultats sur les leviers de la participation aux MAE

Le Tableau 1 présente l'estimation des paramètres d'un modèle de participation à une MAE (modèle logit mixte), à partir des données

de l'expérience de choix, collectées auprès des 305 agriculteurs. Les résultats montrent l'importance relative des quatre attributs dans la décision de participer à la MAE et peuvent ensuite être utilisés pour prédire la probabilité de participation de chaque agriculteur à chaque MAE. La partie inférieure du tableau indique que la distribution des coefficients présente des variances statistiquement significatives dans l'ensemble de l'échantillon, ce qui reflète une certaine hétérogénéité dans les préférences des répondants.

Les résultats présentés dans la partie supérieure du tableau montrent que le montant du paiement, l'appui administratif et technique gratuit et le bonus collectif jouent un rôle statistiquement significatif et positif dans la décision d'un agriculteur de participer à une MAE. L'estimation de la constante spécifique à l'alternative statu quo a également un signe positif significatif, ce qui signifie que les répondants retirent en moyenne une certaine utilité de ne participer à aucune MAE. En revanche, la réduction de l'utilisation d'engrais chimiques, que nous pensions être un frein à l'adoption d'une MAE, s'est avérée n'avoir aucun effet statistiquement significatif sur la probabilité d'adoption en moyenne. Ceci peut traduire l'indifférence des agriculteurs à l'obligation de réduction partielle de la fertilisation chimique dans le cadre d'un usage subventionné de compost, ou refléter une grande variabilité des préférences des répondants pour cet attribut. Nous avons également calculé que la probabilité de choisir une MAE change radicalement si la MAE en question inclut une assistance technique gratuite (+31 points de pourcentage) ou un bonus collectif (+14 points de pourcentage), tandis que l'obligation de réduction de la fertilisation chimique ne diminuerait finalement la probabilité de participation que de 2 points de pourcentage en moyenne.

Résultats sur les taux de participation

A partir des estimations issues du modèle logit mixte, nous avons ensuite prédit le taux de participation à chacune des MAE pouvant être générée à partir de notre plan d'expérience, c'est à dire la combinaison de tous les niveaux d'attributs, soit 26 mesures (Blazy et al., 2021). Pour chaque mesure, nous avons ainsi prédit la décision

Tableau 1 : Résultats de l'estimation du modèle logit mixte

	Coefficients	Erreur standard	Z	P>Z	Intervalle de confiance à 95%	
Moyenne des coefficients beta						
Exigence fertilisation (oui=1)	-0,16	0,16	-1,00	0,32	-0,48	0,16
Assistance Technique (oui=1)	3,27	0,25	12,85	0,00	2,77	3,76
Paiements (0, 600, 800, 1000)	0,39	0,05	8,27	0,00	0,30	0,48
Bonus collectif (oui=1)	1,63	0,18	9,27	0,00	2,37	4,03
Statu Quo (oui=1)	3,2	0,42	7,54	0,00	2,37	4,03
Déviations standard des coefficients beta						
Exigence fertilisation (oui=1)	1,83	0,22	8,23	0,00	1,39	2,26
Assistance Technique (oui=1)	2,23	0,26	8,55	0,00	1,72	2,74
Paiements (0, 600, 800, 1000)	0,34	0,04	8,93	0,00	0,27	0,42
Bonus collectif (oui=1)	1,69	0,20	8,26	0,00	1,29	2,09
Statu Quo (oui=1)	-0,97	0,63	-1,52	0,13	-2,21	0,28
Nb d'obs. 5490 ; LR $\chi^2(5) = 426,05$; Max de vraisemblance = -1299,0035 ; Prob > $\chi^2 = 0,000$; pour des raisons de lisibilité, les coefficients de l'attribut paiement ont été divisés par 100.						

d'adoption de chaque agriculteur de l'échantillon pour chacune des 26 mesures hypothétiques. Sans surprise, le taux d'adoption le plus faible est observé pour la mesure M02, la plus contraignante et la moins incitative. Le taux d'adoption le plus élevé est observé pour les mesures M16, M20 et M24 qui incluent une assistance technique et un bonus collectif, et ne requièrent pas la réduction des engrais chimiques. A cet égard, il est intéressant de noter que le taux de participation de la mesure M16, qui propose un paiement de 600 euros par ha et par an, est égal au taux de participation des mesures M20 et M24, qui proposent des paiements plus élevés.

Résultats sur le ratio coût-efficacité

En supposant que chaque participant engagerait l'ensemble de ses terres dans la MAE choisie, nous avons extrapolé la quantité de terres qui seraient engagées sur l'ensemble du territoire, en tenant compte de la représentativité de chaque exploitation de l'échantillon en matière de culture (banane, canne, fruits et légumes) et de type de sol (andosol, vertisol, nitisol, et ferralsol). Nous avons ensuite estimé la quantité de séquestration de carbone qui aurait lieu dans ces zones sur la base des résultats du modèle MorGwanik pour chacune des MAE.

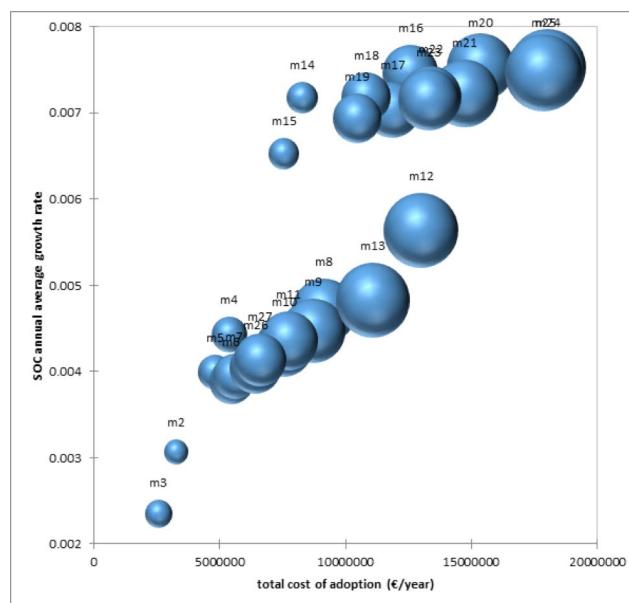
Nous avons ensuite calculé le coût de mise en œuvre de chaque MAE, incluant non seulement le paiement par hectare proposé aux bénéficiaires, mais aussi, le cas échéant, le montant du bonus collectif et le coût de l'assistance technique (approximation basée sur le coût total d'un assistant technique en Guadeloupe). Le ratio de la séquestration moyenne de carbone induite par l'épandage de compost sur le coût de la mise en œuvre de la MAE nous donne une mesure de sa rentabilité. Les résultats montrent que le coût d'une MAE varie entre 293 euros (mesure M03) et 649 euros par tonne d'équivalent CO₂ séquestrée (mesure M24). Ce coût comprend le montant versé sous forme de paiements conditionnels directs, le montant versé sous forme de bonus collectif (s'il y en a un) et le coût de l'assistance technique qui est offerte dans la MAE. On observe que la mesure M24, qui séquestre la plus grande quantité totale de carbone (25 824 teqCO₂), est aussi la mesure la moins rentable (698 euros par tonne). La MAE la plus rentable est la mesure M02 (310 euros par tonne), qui est également l'avant-dernière en quantité de carbone séquestré (c'est-à-dire 10 521 teqCO₂).

Ces résultats ne sont pas très surprenants, puisque l'accroissement de la participation aux MAE nécessite des incitations croissantes. Cependant, la relation entre efficacité et coût n'est pas nécessairement linéaire car les agriculteurs peuvent avoir des préférences différentes pour l'assistance technique ou les incitations de type bonus collectif, et sont dotés de capacités de séquestration du carbone différentes, selon la nature de leur sol. La Figure 2 montre la séquestration annuelle de carbone des MAE en fonction de leur coût total de mise en œuvre et de leur rapport coût-efficacité. Pour chaque MAE, le diamètre de la bulle est proportionnel au coût moyen de la teqCO₂ séquestrée (en euros par teqCO₂). Ainsi, plus la bulle est petite, plus la mesure est économiquement efficace. Les mesures les plus efficaces apparaissent dans la partie supérieure du graphique. Les résultats révèlent par ailleurs que quatre mesures séquestrent une quantité de carbone supérieure à 25 000 teqCO₂ (M16, M20, M24, M25) mais une seule (M16) le fait pour un coût inférieur à 500 euros par tonne. Ce chiffre est bien supérieur à la valeur carbone estimée fournie par le rapport de la Commission Quinet pour l'année 2019 (87 euros par tonne). Elle est cependant comprise entre la valeur estimée pour 2020 (250 euros par tonne) et la valeur estimée pour 2030 (775 euros par tonne).

Finalement, nous observons que le rapport coût-efficacité de la mesure M16, qui offre le paiement le plus bas mais inclut les trois

Figure 2 : Coût-efficacité des MAE proposées

(La taille des bulles est proportionnelle au coût moyen en € de la TeqCO₂ séquestrée)



autres leviers de participation, est très proche de celui de la mesure M10, qui offre le paiement le plus élevé mais aucun des autres leviers de participation. Cependant, M16 surpasse de loin M10 en termes de gain environnemental, car il séquestre plus de 25 000 teqCO₂ tandis que M10 séquestre moins de 15 000 teqCO₂. La mesure M17 est également intéressante dans la mesure où elle permet d'atteindre un niveau de séquestration très proche de celui de M16 tout en réduisant la quantité de pollution générée par l'utilisation d'engrais chimiques (si utilisation d'engrais chimiques il y a, chez les participants à la mesure). Enfin, nos simulations montrent que ces MAE induisent des taux de croissance moyens annuels du COS proches de l'objectif de 4 pour 1000 lancé par la France lors de la Conférence des Nations Unies sur le changement climatique de 2015.

Conclusion

Dans cette étude, nous avons cherché à définir et à évaluer des MAE susceptibles d'améliorer le carbone du sol à moindre coût. Nous avons conçu un cadre méthodologique original couplant un modèle économétrique, pour effectuer une estimation ex-ante de l'adoption de MAE « compost », avec un modèle biophysique décrivant la dynamique du carbone du sol, pour établir l'impact de l'adoption des MAE considérées sur la séquestration du carbone dans les sols. Cette approche nous a permis d'évaluer une variété de MAE hypothétiques combinant différentes incitations monétaires et non-monétaires, et nous a permis d'identifier la superficie des terres grâce à laquelle l'objectif des 4 pour 1000 pourrait être atteint via l'utilisation de compost.

L'une des principales conclusions de l'étude est que les incitations non-monétaires, telles que l'assistance technique apportée pour le choix et l'utilisation du compost, et l'accompagnement administratif pour la préparation du dossier de demande, peuvent jouer un rôle clé dans la perception qu'ont les agriculteurs du coût de participation au dispositif. Elles devraient donc être intégrées dans les futures MAE pour en améliorer l'adoption.

Malgré les taux de séquestration du carbone relativement élevés estimés pour la plupart des MAE testées, le coût de la tonne de carbone séquestrée (qui inclut à la fois le paiement par hectare, le montant du bonus collectif et le coût de l'assistance technique) atteint en moyenne 500 euros la teqCO₂, ce qui est bien supérieur aux valeurs rapportées dans les autres études menées en Europe. Ceci suggère que les subventions doivent être en mesure de compenser le coût élevé de la pratique en Guadeloupe (produit, transport et application du produit). En outre, les MAE proposées pour favoriser l'utilisation du compost doivent être considérées comme un outil politique offrant plusieurs autres avantages, en plus de la séquestration du carbone, tels que la réduction des risques de pollution liés à la surutilisation des engrais minéraux, le recyclage des déchets organiques, ou encore la restauration des sols tropicaux dégradés.

Pour en savoir plus :

Blazy J-M., Subervie J., Paul J., Causeret F., Guinde L., Moulla S., Thomas A. et Sierra J. (2021). Ex-ante assessment of the cost-effectiveness of public policies to sequester carbon in soils. *Ecological Economics*, 190.

Blazy J-M., Barlagne C. et Sierra J. (2015). Environmental and economic impacts of agri-environmental schemes designed in French West Indies to enhance soil C sequestration and reduce pollution risks. A modelling approach. *Agricultural Systems*, 140, 11-18.

Chabé-Ferret S. et Subervie J. (2013). How much green for the buck? Estimating additional and windfall effects of French agro-environmental schemes by DID-matching. *Journal of Environmental Economics and Management*, 65(1), 12-27.

Chopin P., Blazy J-M. et Doré T. (2015). A new method to assess farming system evolution at the landscape scale. *Agronomy for sustainable development*, 35(1), 325-337.

Don A., Schumacher J. et Freibauer A. (2011). Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks – a meta-analysis. *Global Change Biology*, 17(4), 1658-1670.

Paul J., Sierra J., Causeret F., Guindé L. et Blazy J-M. (2017). Factors affecting the adoption of compost use by farmers in small tropical Caribbean islands. *Journal of Cleaner Production*, 142, 1387-1396.

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

Sierra J., Causeret F. et Chopin P. (2017). A framework coupling farm typology and biophysical modelling to assess the impact of vegetable crop-based systems on soil carbon stocks. Application in the Caribbean. *Agricultural Systems*, 153, 172-180.

Thaler R. H. et Sunstein C. R. (2009). *Nudge: Improving decisions about health, wealth, and happiness*. Penguin Books, New York (2009).