

# **Impact de l'introduction d'unités de méthanisation à la ferme sur le bilan humique des sols de l'ouest de la France. Analyse sur 10 exploitations agricoles de la région Pays de la Loire**

Anne-Monique Bodilis<sup>1</sup>, Robert Trochard<sup>1</sup>, Gwendoline Lechat<sup>2</sup>, Alain Airiaud<sup>3</sup>,  
Lise Lambert<sup>4</sup>, Simone Hruschka<sup>5</sup>

1 : ARVALIS-Institut du végétal, station expérimentale de la Jaillière, F-44370, La Chapelle-Saint-Sauveur ;  
am.bodilis@arvalisinstitutduvegetal.fr

2 : Elève Ingénieur INP-ENSAT, av. de l'Agrobiopole, B.P. 32607, Auzeville-Tolosane, F-31326 Castanet-Tolosan cedex

3 : Chambre d'Agriculture de Loire Atlantique, rue P.-A. Bobierre, La Géraudière, F-44939 Nantes cedex 9

4 : ADEME, 20, avenue du Grésillé, BP 90406, F-49004 Angers cedex 01

5 : AILE 73, rue de Saint-Brieuc - CS 56520 - F-35065 Rennes cedex

## **Résumé**

Les projets de méthanisation sont en forte progression en Pays de Loire. Cette technique de valorisation des matières organiques pose la question de la valeur fertilisante du digestat, et celle des conséquences à terme de l'exportation supplémentaire de carbone hors des parcelles cultivées. Cet article restitue les résultats de l'évaluation a priori des effets à moyen et long terme de l'introduction d'unités de méthanisation dans les exploitations de polyculture – élevage ligériennes sur les teneurs en matières organiques des sols. Dans ces exploitations, l'introduction de la méthanisation peut conduire à modifier l'équilibre exportation – restitution de matières organiques sur les parcelles cultivées. L'étude s'est attachée en particulier à évaluer l'impact de l'exportation systématique des productions végétales - pour l'élevage, la vente ou la méthanisation - et de sa compensation partielle par l'apport de digestat sur l'évolution de la matière organique des sols (bilan humique).

## **1. Contexte et objectifs de l'étude**

La méthanisation, processus anaérobie qui transforme les produits organiques en biogaz et en digestat, tous deux valorisables, contribue aux enjeux de diversification de la production d'énergie et de diminution des émissions de gaz à effet de serre. Elle valorise les effluents d'élevage, des végétaux et une grande part des déchets organiques. Le développement de cette filière sur un territoire exige des débouchés biogaz (épuration puis possibilité d'injection dans un périmètre proche) ou chaleur (cogénération électricité-chaleur). Il nécessite également parfois d'accentuer l'exportation de biomasse des parcelles cultivées pour équilibrer les apports au digesteur afin d'en améliorer le rendement énergétique. Il doit donc prendre en compte les besoins d'autres filières valorisant la biomasse (alimentaires, énergétiques...). La méthanisation est aussi à l'origine d'un nouvel effluent organique, le digestat, dont la composition et la dynamique de décomposition dans le sol sont encore mal connus.

Initié en 2013, avec l'appui financier de l'ADEME et de la Région des Pays de la Loire, le projet VADIMETHAN cherche à répondre à deux questions – valeur fertilisante des digestats de méthanisation et évolution du bilan humique des sols d'exploitations pratiquant la méthanisation – dans le contexte de cette région. Les partenaires fédérés par ce projet sont la Chambre régionale d'Agriculture des Pays de la Loire, les Chambres départementales d'Agriculture de Loire-Atlantique, Maine-et-Loire et Sarthe, ARVALIS-Institut du végétal, l'ADEME, AILE et les coopératives Terrena et CAVAC.

Dans les exploitations ligériennes, l'introduction de la méthanisation peut modifier l'équilibre exportation – restitution de matières organiques sur les parcelles cultivées. L'étude s'est attachée à évaluer l'impact de l'exportation systématique des productions végétales (pour l'élevage, la vente ou la méthanisation) et de sa compensation partielle par l'apport de digestat sur l'évolution de la matière organique des sols (bilan humique).

### – L'état des sols remis en question ?

Plusieurs études font état de déficits en Matières Organiques (MO) dans certains sols français (BALESDENT, 1996). La proportion de sols déficitaires en France oscillerait entre 30 et 39 % (ROUSSEL *et al.*, 2001), principalement des sols sableux avec de faibles restitutions (WYLLEMAN *et al.*, 2001). Parallèlement, une proportion tout aussi importante de sols français (25 %) a connu une augmentation de stock de MO ces 50 dernières années en raison de plus fortes restitutions liées notamment à la progression des rendements. Avec du recul, les baisses de MO n'ont généralement pas eu d'incidence sur les rendements mais ont conduit à la réduction de l'activité biologique des sols (CHAUSSOD, 1996). La MO modifie les paramètres physiques, chimiques et biologiques des sols et contribue à améliorer leur fertilité. Avec la crainte de voir disparaître ce potentiel de fertilité, la MO fait aujourd'hui partie des préoccupations des agriculteurs.

### – Des enjeux possibles sur le réchauffement global

Facteur majeur de la qualité des sols, la MO caractérise aussi le retour de carbone atmosphérique dans le sol (THOMSEN *et al.*, 2013), ce qui en fait la deuxième plus grande réserve au monde (BRETHOME, 2011). Dans un contexte de changement climatique, pour lequel l'activité anthropique joue un rôle non négligeable, les scientifiques se penchent sur les leviers d'actions envisageables à l'échelle agricole. Depuis 1980, les modifications des pratiques agricoles auraient participé à l'émission supplémentaire de 1 à 2 Gt/an de CO<sub>2</sub> à l'échelle mondiale par accélération de la minéralisation (INGRAM et FERNANDES, 2001). Toutefois, les pratiques de l'agriculture de conservation basées sur un travail du sol réduit et la pratique de couverts végétaux à l'interculture ou associés aux cultures contribuent potentiellement au stockage de carbone dans les sols. Ce stockage n'est toutefois pas infini (POWLSON *et al.*, 2011). L'étude de la dynamique du carbone dans les sols révèle qu'un sol pauvre en matières organiques et en situation de stockage accumule des quantités importantes de carbone les premières années jusqu'à atteindre un niveau d'équilibre. Ce stockage est également réversible : un changement de pratiques ou une séquence climatique pluvieuse peuvent favoriser la minéralisation. Le stockage du carbone dans les sols est donc délicat à organiser à l'échelle d'un territoire.

### – Un fort développement de la filière méthanisation dans l'Ouest

La filière méthanisation française n'a pas été fortement soutenue politiquement contrairement à sa voisine allemande. Alors qu'elle perdait en vitesse, elle a été relancée par la méthanisation agricole à partir de 2007 (ATEE CLUB BIOGAZ, 2011). Les projets développés sont majoritairement « à la ferme », à l'échelle d'une exploitation, ou bien « centralisés » (territorialisées) à l'échelle d'un groupement d'agriculteurs. La France, face à des inquiétudes environnementales (pollutions des eaux par le nitrate et les phosphates) et sociétales (risques liés à l'énergie nucléaire), souhaite rattraper son retard technologique et accompagner le développement et la rémunération de la filière. Le gouvernement s'est ainsi fixé la construction de 1 000 unités de méthanisation agricole d'ici 2020 alors qu'on ne dénombrait que 90 installations en fonctionnement fin 2012. Pour y parvenir, 130 projets par an devront être déposés d'ici 2020 contre 70 actuellement initiés chaque année

(Ministère de l'agriculture, 2013). Ces ambitions rejoignent celles affichées dans le cadre du Grenelle de l'environnement (2007-2012) qui prévoit d'atteindre 23 % d'énergies renouvelables consommées sur le territoire en 2020 (ATEE CLUB BIOGAZ, 2011).

La filière est particulièrement séduisante car elle propose une énergie renouvelable et envisage des solutions techniques pour optimiser la gestion des éléments fertilisants. Le compostage du digestat permet d'exporter les nutriments excédentaires vers des zones déficitaires plus éloignées. Les digestats devraient permettre une meilleure valorisation des éléments fertilisants par les cultures et remplacer une partie des engrais de synthèse.

En Pays de la Loire, 26 installations étaient en fonctionnement en 2013, 25 projets faisaient l'objet de demande de financement et 60 autres étaient en phase d'émergence (AIRAUD, 2013). Les projets territorialisés sont majoritaires par rapport aux projets à la ferme (9 dossiers d'unités territorialisées sur 10 déposés en 2013) (BOIREAU et BORDEREAU, 2013).

Un développement important de cette filière est donc attendu pour les années à venir alors que la caractérisation des digestats et leurs impacts sur les sols sont encore mal connus.

## **2. Les transformations opérées par la méthanisation**

### **– La méthanisation agricole conserve les éléments fertilisants des effluents**

La méthanisation en milieu agricole est un processus supplémentaire de transformation des effluents agricoles dans les systèmes d'exploitation en polyculture-élevage. Ce processus est réalisé par des bactéries qui n'évoluent qu'en l'absence d'oxygène. La transformation conduit à la production de biogaz ( $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$ ) et d'un résidu, le digestat, utilisé pour fertiliser les cultures. Le biogaz peut être épuré et utilisé dans les transports ou destiné à la production d'électricité et de chaleur après combustion.

Deux technologies sont développées (voie liquide pour le traitement de lisiers et voie sèche pour les fumiers) mais, dans les deux cas, l'ajout de biomasse issue de l'exploitation ou de l'extérieur peut être nécessaire pour équilibrer la ration des bactéries. Le temps de séjour des effluents dans le digesteur peut être de 40 à 60 jours où les matières sont constamment mélangées et chauffées, en général à 37°C, pour un processus homogène. Des transformations supplémentaires peuvent être appliquées au produit résiduaire à la sortie du digesteur comme la séparation de phase ou le compostage.

A l'intérieur du méthaniseur, plusieurs familles de bactéries anaérobies transforment des molécules organiques complexes (protéines, cellulose, hémicellulose, amidon, acides gras), en molécules simples (GOBAT *et al.*, 2013). Seule la lignine, contenue dans les végétaux âgés ne peut être dégradée par voie anaérobique. La dégradabilité varie en fonction du temps de séjour dans le digesteur. Pour des raisons de rentabilité, le processus est rarement mené jusqu'au bout, ce qui conduit à un produit résiduaire encore riche en MO dégradable (ALBURQUERQUE *et al.*, 2012). Les 2/3 de la MO biodégradable introduite dans le digesteur sont transformés en biogaz ce qui implique qu'une part importante de carbone est exportée de l'exploitation sous la forme de  $\text{CH}_4$  et de  $\text{CO}_2$ .

Le digestat final contient donc du carbone en majeure partie non dégradé et du carbone biodégradable. L'azote, comme les autres minéraux (P, K...), est totalement conservé lors du processus - une partie étant transformée en ions ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ). Après séparation de phase, on retrouve le  $\text{NH}_4^+$  majoritairement dans la phase liquide du digestat, le phosphore et le carbone restant préférentiellement dans la phase solide. Le digestat permet donc de gérer plus finement la fertilisation qu'un fumier. Des précautions doivent en revanche être prises pour limiter les pertes d'azote ammoniacal par volatilisation lors du stockage et de l'épandage.

La méthanisation modifie donc les caractéristiques des effluents organiques produits sur l'exploitation. Le carbone du digestat est réduit en quantité par rapport à l'effluent initial mais la proportion de carbone qui pourra potentiellement rejoindre le stock actif du sol est augmentée.

## – La méthanisation agricole exporte du carbone supplémentaire à l'échelle de l'exploitation

La durabilité d'un système de culture passe par le retour au sol de matières organiques (résidus de culture, effluents d'élevage) pour garantir la fertilité physique, chimique et biologique des sols. Les systèmes en polyculture - élevage valorisent l'énergie de la biomasse végétale pour produire du lait et de la viande. La méthanisation se greffe au système pour une ultime valorisation de l'énergie contenue dans les effluents. A chaque étape, du carbone sort du système, par l'intermédiaire des produits (lait, viande, biogaz) ou des molécules résiduelles non recyclées (CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub>). L'exportation systématique des résidus de culture et des fumiers pourrait contribuer à une baisse du stock de carbone des sols cultivés.

Une étude danoise, publiée en 2013, évalue les quantités de carbone non dégradé à la suite des différents processus de transformation de la MO en système d'élevage. Elle estime la proportion de carbone qui retourne au sol *via* différents produits : la biomasse enfouie sans transformation restitue 100 % de son carbone au sol, la biomasse digérée par le méthaniseur ne restitue que 20 % de son carbone initial. De la biomasse qui aurait été consommée par le troupeau et restituée au sol sous forme de lisier ou de fumier restitue 30 % de son carbone tandis qu'une transformation anaérobie supplémentaire ne permettrait de restituer que 16 % du carbone au sol.

Après retour au sol, ce carbone subit de nouvelles transformations microbiologiques. Une partie seulement alimentera l'humus du sol à moyen et long terme. 14 % du carbone restitué par une biomasse non transformée alimentent l'humus du sol, 48 % du carbone restitué par un fumier, 58 % pour de la biomasse digérée par méthanisation et 76 % pour un fumier également digéré par méthanisation (THOMSEN *et al.*, 2013).

En conséquence, même si la quantité du carbone initial contenu dans les différents substrats diminue avec l'intensité des processus de transformation, la part du carbone restant qui réintègre le stock actif du sol, augmente considérablement pour des produits en fin de processus. Ainsi, la biomasse restituée au sol contient de fortes quantités de carbone dont une faible fraction sera transformée en humus. *A contrario*, un digestat dont les quantités de carbone sont fortement réduites après transformation, contient un carbone avec un fort potentiel d'humification. L'étude conclut donc que, à long terme, les restitutions du carbone actif par les différents produits de la chaîne sont proches.

Si le digestat et les fumiers se valent sur le plan du retour de carbone actif au sol, le bilan humique global doit être évalué au regard des doses épandues et des pratiques culturales mises en œuvre dans les systèmes de polyculture élevage.

### 3. Matériel et méthode

#### – Le modèle de simulation de bilan humique des sols : AMG

Pour évaluer l'évolution du stock de carbone dans un sol, nous avons utilisé le modèle AMG<sup>1</sup>. Ce modèle, dérivé du modèle de Hénin-Dupuis, différencie deux pools de matières organiques aux dynamiques différentes dans le temps. Il permet d'évaluer l'effet à long terme des pratiques culturales sur le stock de carbone d'un sol. Il a l'avantage d'être simple à mettre en œuvre à l'échelle d'une exploitation et a déjà été utilisé dans de nombreux projets. Le modèle évalue chaque année le stock de carbone du sol en fonction des quantités de carbone humifiées et minéralisées durant la période culturale (figure 1) :

Bilan humique = carbone humifié (Résidus de cultures, Résidus de couvert, PRO)- carbone minéralisé

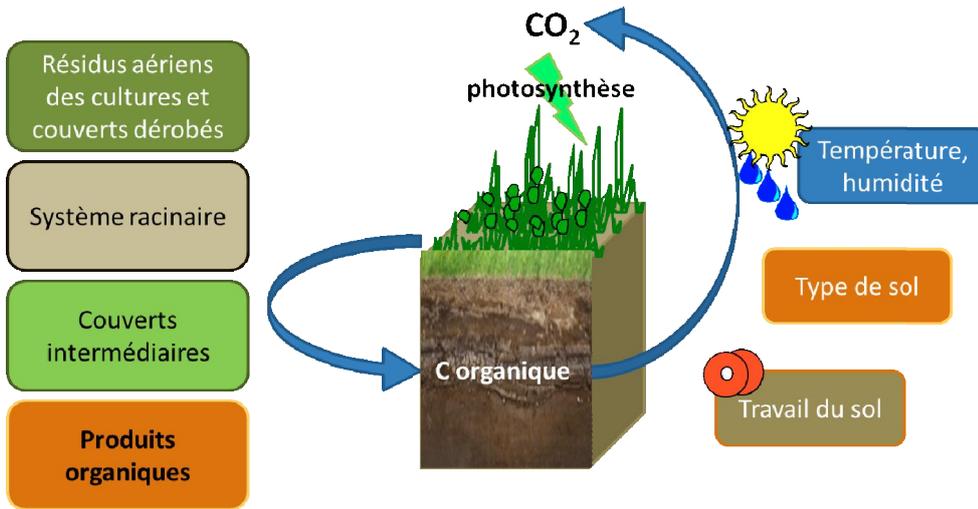
Il fait intervenir trois variables : le stock de carbone actif à l'ouverture du bilan, le coefficient de minéralisation  $k$  lié au contexte pédoclimatique et au travail du sol et le coefficient d'humification  $h$  (ou iso-humique) dépendant des résidus et produits organiques épandus.

---

<sup>1</sup> AMG : du nom de ses auteurs Argentins et Français (Andriulo, Mary et Guérif)

<sup>2</sup> Produits résiduels organiques

**Figure 1 : Paramètres de l'équation de bilan humique selon AMG (d'après Agro-Transfert).**



**– Typologie des exploitations pratiquant la méthanisation en Pays de la Loire selon les matières utilisées**

Une typologie *a priori* des exploitations pratiquant la méthanisation a été proposée sur la base des matières entrantes des digesteurs qui conditionnent le plus la nature et la quantité du carbone présent à la sortie. Deux sous-facteurs ont été retenus pour discriminer les digestats et leur aptitude à stocker du carbone : l'origine des matières entrantes (interne ou externe à l'exploitation) et le type d'effluent agricole traité (figure 2). Le croisement de ces facteurs conduit à six cas-types auxquels nous avons cherché à rattacher chaque exploitation réelle à étudier.

Les simulations ont été réalisées sur 6 des 13 méthaniseurs à la ferme déjà en fonctionnement sur la région et sur 4 autres exploitations engagées dans des projets collectifs. En définitive, il a été difficile de trouver des exploitations appartenant strictement à un seul type, la plupart des installations de la région valorisant différents produits organiques. La majorité des systèmes rencontrés valorisent de la biomasse exogène ; seules 2 exploitations sur les 10 étudiées n'alimentent leur méthaniseur qu'avec de la biomasse exclusivement produite sur l'exploitation.

**Figure 2 : Typologie *a priori* et positionnement des 10 exploitations enquêtées.**

Produits d'entrée du digesteur	Fumier de bovin ou de porcs	Fumier de volailles	Lisier
Végétaux produits sur l'exploitation	Type 1	Exploitation A Type 2	Type 3 Exploitation B
Bio-déchets exogènes	Type 4	Exploitation C Type 5	Type 6 Exploitation G
	Exploitation D Exploitation E	Exploitation H Exploitation I Exploitation J	Exploitation F

*Exemple : l'exploitation A alimente le méthaniseur avec les fumiers de bovin et de volaille produits sur l'exploitation et introduit également du ray-grass d'Italie produit sur l'exploitation en dérobée pour équilibrer la ration du digesteur.*

## - La collecte des données pour les simulations

Les informations relatives aux 10 exploitations et nécessaires à la modélisation ont été collectées au cours d'entretiens dirigés avec les agriculteurs.

Une caractérisation analytique des digestats présents dans chaque exploitation a été effectuée pour déterminer leur coefficient d'humification  $h$ . Ce coefficient représente la fraction du carbone du produit organique qui va contribuer à alimenter le stock d'humus du sol (compris entre 20 et 80 %). Il se mesure à partir d'expérimentations de terrain de longue durée (3 ans minimum, de préférence 8 à 10 ans) et est très variable en fonction des conditions pédoclimatiques rencontrées. S'il est assez bien connu pour la majeure partie des résidus de cultures, le référentiel est incomplet pour les produits résiduaux organiques (PRO) qui ont des compositions variées.

Des méthodes analytiques au laboratoire, moins longues et moins coûteuses que les expérimentations au champ, sont proposées pour approcher cette valeur :

- La minéralisation sur 91 jours (XPU 44-163) : on détermine un coefficient de minéralisation, par différence entre les mesures de  $\text{CO}_2$  dégagé d'une terre de référence et d'une terre contenant le produit à analyser. Nous avons choisi de définir le coefficient iso-humique comme étant la valeur correspondant au complémentaire de la minéralisation sur 91 jours ( $1-C_{\text{min}91}$ ).

- L'indice ISMO (Indice de Stabilité de la Matière organique) : calculé à partir des différentes fractions biochimiques de la MO (fraction soluble (SOL), cellulose (CEL), lignine et cutine (LIC)) obtenues par solubilisations successives (Norme XPU 44-162). Cet indicateur intègre également la mesure du carbone minéralisé après 3 jours d'incubation ( $C_{\text{m}3}$ ) (Norme XPU 44-163). L'ISMO est le résultat de l'équation généralisée  $\text{ISMO} = 44,5 + 0,5\text{SOL} - 0,2\text{CEL} + 0,7\text{LIC} - 2,3C_{\text{m}3}$  (exprimé en % de carbone organique ; LASHERMES *et al.*, 2009).

Les coefficients d'humification  $h$  utilisés sont ceux de la bibliographie pour les cultures et pour les PRO en dehors des digestats. Pour ces derniers, nous avons considéré en priorité les valeurs données par la minéralisation sur 91 jours lorsque cette donnée était disponible ou à défaut l'ISMO. Nous disposons ainsi de résultats d'analyses pour 7 des 10 digestats étudiés. Le coefficient d'humification des 3 autres digestats a été estimé par rapprochement de ces produits à des digestats connus, sur la base des produits entrant dans le méthaniseur.

## 4. Analyse des résultats obtenus

### - Evolution des stocks de carbone des sols des exploitations sur 20 ans

Les simulations avec AMG fournissent l'état des stocks de carbone organique des sols après 20 années de pratiques, en faisant l'hypothèse que celles-ci étaient constantes sur 20 ans. Chaque exploitation enquêtée a fait l'objet de deux simulations : un scénario sans méthanisation et un scénario avec méthanisation. Les résultats sont synthétisés dans le tableau 3.

Compte tenu de la précision des mesures du carbone organique des sols exprimées en % de la terre fine sèche (écarts types observés compris entre 0,05 et 0,1 point de MO), nous avons estimé que seules les évolutions de la MO supérieures à 0, 1 point étaient significatives à l'échelle de 20 ans de modélisation.

### - Des systèmes encore non stabilisés

Même en l'absence de méthanisation, les simulations révèlent que l'ensemble des systèmes de culture étudiés n'est pas encore à l'équilibre. Ainsi, 8 situations stockent encore du carbone dans les sols (+ 0,2 à + 2,1 points de MO sur 20 ans), 2 perdent entre 0,3 et 0,4 point de MO sur 20 ans. Pour les exploitations qui stockent encore, la pratique encore récente de couverts durant l'interculture conduit à la progression des stocks de carbone dans les sols à faible taux de MO (teneur en MO comprise entre 1,6 à 2,6 % dans notre échantillon). Le stockage de carbone important observé dans les exploitations A et D s'explique par les épandages de PRO. Ces deux exploitations ont vu leurs ateliers de production animale augmenter ces 30 dernières années, avec l'épandage en plus grande quantité de fumier de bovin, effluent à fort potentiel de stockage de carbone.

Les deux cas qui déstockent se caractérisent par un taux de MO initial élevé dû à une occupation prolongée du sol par de la prairie. Le passage récent à une rotation céréalière, conduit temporairement au déstockage de carbone jusqu'à un nouvel état d'équilibre.

**Tableau 3 : Ordres de grandeur des taux de matière organique (MO) stockée ou déstockée et écarts entre situations sans et avec méthanisation dans les 10 exploitations agricoles suivies.**

	Exploitation agricole	Taux de MO au début de la simulation (%)	Evolution du stock de MO après 20 ans - écart par rapport à la situation initiale (% MO)		Effet de la méthanisation : Ecart de stockage de carbone après 20 ans entre avec et sans méthanisation (% MO)	
			système sans méthanisation	système avec méthanisation		
Méthaniseur collectif	I	1,8	+0,2	0	<b>-0,2</b>	
	H	1,6	+0,4	+0,3	-0,1	
	J	3	-0,3	-0,4	-0,1	
	D	1,6	+1	+0,8	<b>-0,2</b>	
Méthaniseur à la ferme	Lisier	F	2,6	*	*	<b>+0,2</b>
		C	2,4	+0,2	0	<b>-0,2</b>
		G	1,7	+0,3	0	<b>-0,3</b>
		B	3,4	-0,4	-0,3	+0,1
	Fumier	A	2,3	+2,1	+1,6	<b>-0,5</b>
		E	2,6	*	*	<b>-0,2</b>

\* Les systèmes avec prairies assolées (cases grisées) ne peuvent pour le moment pas être analysés en valeur absolue car le modèle Prairies proposé par ARVALIS-Institut du végétal n'a pas encore été validé par le groupe de travail AMG. Les résultats ont donc été interprétés en écart (avec et sans méthanisation) en faisant l'hypothèse que, à mode d'exploitation et production identiques, l'effet de la prairie sur le stock de C du sol est constant.

### – Ce que modifie la méthanisation

Dans les parcelles recevant des digestats après introduction de la méthanisation, la comparaison des évolutions de stocks de carbone entre les situations sans et avec méthanisation pour chacun des 10 cas-types enquêtés conduit à trois trajectoires d'évolution :

- **l'évolution des stocks de carbone n'est pas modifiée** : l'introduction de la méthanisation ne modifie pas la trajectoire d'évolution des stocks de carbone du sol.

Cette situation concerne 3 des exploitations étudiées avec la même tendance de stockage avec et sans méthanisation (exploitations B et H), ou la même tendance de déstockage (exploitation J).

- **l'évolution est amplifiée** : cette trajectoire d'évolution englobe les cas qui stockent ou qui déstockent plus de carbone avec méthanisation que sans méthanisation sur 20 ans.

Une seule exploitation étudiée (F) est dans ce cas de figure, avec un stockage supplémentaire de carbone permis par la méthanisation. A noter qu'aucune des 10 exploitations étudiées ne se trouve en situation d'aggravation d'une tendance au déstockage.

Pour cette exploitation F, l'arrivée de la méthanisation s'est accompagnée de la mise aux normes du bâtiment lait avec un système en logettes sur copeaux de bois. Ces copeaux, introduits dans le méthaniseur via le lisier, sont très peu dégradés par les bactéries anaérobiques. Un créneau supplémentaire pour la fertilisation organique au printemps sur blé s'est également ouvert grâce aux propriétés physiques et chimiques du digestat. Ces deux changements permettent un retour supplémentaire de carbone au sol.

- **l'évolution est atténuée** : cette trajectoire d'évolution englobe les cas qui stockent ou qui déstockent moins de carbone avec méthanisation comparativement à la situation sans méthanisation.

C'est la situation majoritairement rencontrée avec 6 exploitations concernées par un moindre stockage de carbone suite à la méthanisation. Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine de ce moindre stockage :

- Pour les exploitations G et E, une partie du digestat est exportée pour rééquilibrer le plan d'épandage (respectivement 30 % et 20 % de la production totale du digesteur).

- Pour les exploitations I, C et A, le potentiel de stockage de carbone du digestat est réduit par rapport aux fumiers épandus avant méthaniseur. Les doses épandues ne permettent pas de compenser.

- Pour les exploitations A et G, la réduction du stockage peut également s'expliquer par l'exportation d'un couvert auparavant intégralement restitué à la parcelle. Cependant, cette exportation de biomasse supplémentaire a beaucoup moins d'impact sur le bilan humique que la réduction des restitutions de carbone permises par les effluents organiques.

- Dans cette étude, il n'a pas été rencontré de cas avec inversion de tendance.

### – Recoupement des tendances obtenues par simulation avec la typologie « *a priori* »

Cette typologie « *a priori* », basée sur les entrées dans le méthaniseur (figure 2), ne permet pas d'expliquer la trajectoire d'évolution de la matière organique des sols.

L'hypothèse selon laquelle la biomasse exogène, valorisée dans le méthaniseur, apporterait du carbone supplémentaire aux parcelles, n'est pas validée ici. Pour 7 exploitations sur 8 qui valorisent de la biomasse extérieure, on n'observe pas de stockage supplémentaire de carbone avec la méthanisation. Seuls les copeaux de l'exploitation F améliorent le potentiel de stockage du digestat.

La deuxième hypothèse selon laquelle l'export supplémentaire de biomasse des parcelles pour l'alimentation du digesteur pourrait entraîner une diminution du bilan humique des sols n'est pas non plus vérifiée : 3 exploitations sur 10 valorisent des Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique (CIVE) dans le méthaniseur mais seulement 2 d'entre elles ont recours à une exportation supplémentaire de biomasse des parcelles. L'exploitation C, qui auparavant ne valorisait pas la période d'interculture, implante désormais un couvert de Moha récolté pour le méthaniseur. Même s'il est exporté, ce couvert constitue un apport de biomasse supplémentaire au sol par rapport à la situation initiale par la restitution des chaumes et des racines. Pour les deux autres exploitations (A et G), cette exportation supplémentaire de biomasse pèse peu face au moindre potentiel de stockage du digestat comparé au fumier de bovin.

Pour les exploitations J et H, le digestat restitue moins de carbone humifié au sol que les effluents d'élevage bruts. Toutefois, la forme digestat ouvre une opportunité supplémentaire de fertilisation organique sur blé qui compense en partie et conduit à des situations proches entre les systèmes avec et sans méthanisation.

En définitive, l'évolution des stocks de carbone dans le sol dépend essentiellement du stock de départ et des choix d'itinéraire technique de l'exploitant. Ainsi, l'exportation de biomasse supplémentaire ne pourrait devenir problématique que dans les cas où les pratiques culturales déjà en place ont un impact négatif sur le bilan humique.

## Conclusion

A la lumière des 10 situations étudiées, l'introduction de la méthanisation dans les systèmes de culture ligériens ne devrait pas bouleverser fondamentalement le bilan humique des sols. La méthanisation ne fait qu'atténuer ou stabiliser les tendances déjà amorcées. En effet, l'introduction d'un méthaniseur s'accompagne d'une évolution des pratiques culturales, source de carbone supplémentaire (couverts, quantités apportées...). Ainsi, le moindre potentiel de stockage du digestat restitué par rapport à l'effluent initial a été en grande partie compensé par l'adaptation des pratiques : périodes d'apport supplémentaires dans la rotation, généralisation des couverts d'interculture... Ce résultat est toutefois à nuancer : il repose sur l'hypothèse forte que les pratiques culturales actuellement mises en œuvre sont constantes sur 20 ans. De plus, l'étude s'est focalisée uniquement sur les surfaces recevant les digestats. Or, dans certains systèmes, on constate une concentration des épandages sur une partie de la sole, les parcelles les plus éloignées, qui recevaient historiquement des effluents, sont désormais exclues de la surface réceptrice du digestat, pour des raisons logistiques. Dans ces situations, si le stock de carbone est maintenu sur les surfaces d'épandage, les parcelles exclues devront faire l'objet d'une surveillance particulière.

La nature des sols et les pratiques culturales ont un poids important dans le bilan humique. L'évolution des stocks de carbone n'a pas de sens en valeur absolue mais est à interpréter en fonction du système étudié et des objectifs que se fixent les agriculteurs.

## Références bibliographiques

- AIRIAUD A. 2013. Quelle valeur agronomique pour les digestats issus de méthaniseur ? Loire-Atlantique Agric. 16.
- ALBURQUERQUE J.A., FUENTE C. DE BERNAL M.P. 2012. Chemical properties of anaerobic digestates affecting C and N dynamics in amended soils. "Agriculture, Ecosyst. Environ. 160, 15–22. doi:10.1016/j.agee.2011.03.007
- ATEE CLUB BIOGAZ 2011. Etat des lieux de la filière méthanisation en France [WWW Document]. URL <http://www.biogaz-europe.com/OpenDocument.aspx?open=y&docid=316>
- BALESDENT J., 1996. Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols en France. *Etude Gest. des Sols* 3, 245–260. Boireau, S., Bordereau, S., 2013. La méthanisation, principes et potentialités sur les Mauges.
- BRETHOMÉ G. 2011. Protection des sols : l'absence de directive européenne coûte cher [WWW Document]. Actu-Environnement. URL <http://www.actu-environnement.com/ae/news/protection-sol-directive-europeenne-bureau-europeen-environnement-13907.php4> (accessed 9.7.14).
- CHAUSSOD R. 1996. La qualité biologique des sols : Évaluation et implications. *Etude Gest. des Sols* 3, 261–278.
- GOBAT J.-M., ARAGNO M., MATTHEY W. 2013. Le sol vivant - Bases de pédologie - Biologie des sols, Presses Po. ed.
- INGRAM J.S.I., FERNANDES E.C.M. 2001, Managing carbon sequestration in soils: concepts and terminology
- LASHERMES *et al.* 2009, Apport de matières organiques exogènes en agriculture : indicateur de potentialité de stockage de carbone dans les sols et définition de classes de disponibilité d'azote.
- POWLSON D.S., WHITMORE A.P., GOULDING K.W.T. 2011. Soil carbon sequestration to mitigate climate change: a critical re-examination to identify the true and the false. *Eur. J. Soil Sci.* 62, 42–55. doi:10.1111/j.1365-2389.2010.01342.x
- ROUSSEL O., BOURMEAU E., WALTER C. 2001. Évaluation du déficit en matière organique des sols français et des besoins potentiels en amendements organiques. *Etude Gest. des sols* 8, 65–82.
- THOMSEN I.K., OLESEN J.E., MØLLER H.B., SØRENSEN P., CHRISTENSEN B.T. 2013. Carbon dynamics and retention in soil after anaerobic digestion of dairy cattle feed and faeces. *Soil Biol. Biochem.* 58, 82–87. doi:10.1016/j.soilbio.2012.11.006
- WYLLEMAN R., MARY B., MACHET J.-M., GUÉRIF J., DEGRENDEL M. 2001. Evolution des stocks de matière organique dans les sols de grande culture : analyse et modélisation. La dégradation du taux de matière organique est-elle une crainte justifiée ? *Perspect. Agric.* 8–14.

