Juin 2020
volume n°10 / numéro 1
www.agronomie.asso.fr

Agronomie
environnement & sociétés

La revue de l'association française d'agronomie

Agronomie et méthanisation

Association Française Agronomie

AGRONOMIE, ENVIRONNEMENT & SOCIETES

Revue éditée par l'Association française d'agronomie (Afa), enregistrée sous le numéro ISSN 1775-4240
Siège : 16 rue Claude Bernard, 75231 Paris Cedex 05
Secrétariat : 2 place Pierre Viala, 34060 Montpellier Cedex 2
Contact : revue_aes@agronomie.asso.fr
Site Internet : agronomie.asso.fr

Objectif
AE&S est une revue en ligne à comité de lecture et en accès libre destinée à alimenter les débats sur des thèmes clefs pour l'agriculture et l'agronomie, qui publie différents types d'articles (scientifiques sur des états des connaissances, des lieux, des études de cas, etc.) mais aussi des contributions plus en prise avec un contexte immédiat (débats, entretiens, témoignages, points de vue, controverses) ainsi que des actualités sur la discipline agronomique.

Contenu sous licence Creative Commons
Les articles sont publiés sous la licence Creative Commons 2.0. La citation ou la reproduction de tout article doit mentionner son titre, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue AE&S et de son URL, ainsi que la date de publication.

Directeur de la publication
Antoine MESSÉAN, président de l'Afa, Ingénieur de recherches, Inrae

Rédacteur en chef
Philippe PRÉVOST, Chargé des coopérations numériques à Agreenium

Membres du bureau éditorial
Christine RAWSKI, Rédactrice en chef Cahiers Agriculture, Cirad
Guy TRÉBUIL, chercheur Cirad
Olivier RÉCHAUCHÈRE, chargé d'études Direction de l'Expertise, Prospective & Etudes, Inra
François KOCKMANN, retraité, ex-directeur de la chambre d'agriculture de Saône et Loire
Jean-Robert MORONVAL, Inspecteur pédagogique en agronomie de l'enseignement agricole
Jérôme BUSNEL, animateur Afa

Comité de rédaction
- Marc BENOÎT, directeur de recherches Inra
- Héloïse BOURREAU, ingénieure à la Bergerie de Villarceaux
- Camille DUMAT, enseignante chercheuse à l'ENSAT/INPT
- Thierry DORÉ, professeur d'agronomie AgroParisTech
- Yves FRANCOIS, agriculteur
- Jean-Jacques GAILLETON, inspecteur d'agronomie de l'enseignement technique agricole
- Laure HOSSARD, ingénieure de recherche Inra Sad
- Marie-Hélène JEUFFROY, directrice de recherche Inra et agricultrice
- Aude JOMIER, enseignante d'agronomie au lycée agricole de Montpellier
- Christine LECLERCQ, professeure d'agronomie Institut Lassalle-Beauvais
- Francis MACARY, ingénieur de recherches Irstea
- Antoine MESSEAN, Ingénieur de recherches, Inra
- Adeline MICHEL, Ingénieure du service agronomie du Centre d'économie rurale de la Manche
- Marc MIQUEL, consultant
- Bertrand OMON, Chambre d'agriculture de l'Eure
- Thierry PAPILLON, enseignant au lycée agricole de Laval
- Philippe POINTEREAU, directeur du pôle agro-environnement à Solagro
- Philippe PRÉVOST, Chargé des coopérations numériques à Agreenium
- Bruno RAPIDEL, Cirad
- Jean-Marie SERONIE, consultant

Secrétaire de rédaction
Philippe PREVOST

Assistant éditorial
Jérôme BUSNEL

Conditions d'abonnement
Les numéros d'AE&S sont principalement diffusés en ligne. La diffusion papier n'est réalisée qu'en direction des adhérents de l'Afa ayant acquitté un supplément (voir conditions sur agronomie.asso.fr/adhesion)

Périodicité
Semestrielle, numéros paraissant en juin et décembre

Archivage
Tous les numéros sont accessibles à l'adresse agronomie.asso.fr/aes

Soutien à la revue

- En adhérant à l'Afa via le site Internet de l'association (http://www.agronomie.asso.fr/espace-adherent/devenir-adherent/). Les adhérents peuvent être invités pour la relecture d'articles.
- En informant votre entourage au sujet de la revue AE&S, en disséminant son URL auprès de vos collègues et étudiants.
- En contactant la bibliothèque de votre institution pour vous assurer que la revue AE&S y est connue.
- Si vous avez produit un texte intéressant traitant de l'agronomie, en le soumettant à la revue. En pensant aussi à la revue AE&S pour la publication d'un numéro spécial suite à une conférence agronomique dans laquelle vous êtes impliqué.

Instructions aux auteurs
Si vous êtes intéressé(e) par la soumission d'un manuscrit à la revue AE&S, les recommandations aux auteurs sont disponibles à l'adresse suivante : agronomie.asso.fr/aes-presentation

À propos de l'Afa
L'Afa a été créée pour faire en sorte que se constitue en France une véritable communauté scientifique et technique autour de cette discipline, par-delà la diversité des métiers et appartenances professionnelles des agronomes ou personnes s'intéressant à l'agronomie. Pour l'Afa, le terme agronomie désigne une discipline scientifique et technologique dont le champ est bien délimité, comme l'illustre cette définition courante : « Etude scientifique des relations entre les plantes cultivées, le milieu [envisagé sous ses aspects physiques, chimiques et biologiques] et les techniques agricoles ». Ainsi considérée, l'agronomie est l'une des disciplines concourant à l'étude des questions en rapport avec l'agriculture (dont l'ensemble correspond à l'agronomie au sens large). Plus qu'une société savante, l'Afa veut être avant tout un carrefour interprofessionnel, lieu d'échanges et de débats. Elle se donne deux finalités principales : (i) développer le recours aux concepts, méthodes et techniques de l'agronomie pour appréhender et résoudre les problèmes d'alimentation, d'environnement et de développement durable, aux différentes échelles où ils se posent, de la parcelle à la planète ; (ii) contribuer à ce que l'agronomie évolue en prenant en compte les nouveaux enjeux sociétaux, en intégrant les acquis scientifiques et technologiques, et en s'adaptant à l'évolution des métiers d'agronomes.

LISEZ ET FAITES LIRE AE&S !

Sommaire

Avant-Propos

P-7- Avant-propos

Antoine MESSÉAN Président de l'AFA et Philippe PREVOST Rédacteur en chef

P-9- Éditorial

Olivier RÉCHAUCHÈRE et les coordonnateurs du numéro

Premiere partie : etat des lieux de la filiere et perspectives d'evolution

P-13- Emergence, état actuel et enjeux pour la filière méthanisation en France : le point de vue de l'ADEME

Julien THUAL

P-17- Une forte dynamique de la méthanisation en Bretagne, boostée par le secteur agricole

Adeline HAUMONT, Armelle DAMIANO, Jeanne LENCAUCHEZ

P-21- Accompagnement de la filière de méthanisation en Nouvelle Aquitaine : Focus sur MéthaN-Action

Juliette CHENEL, Sarahlynn RIZARD

P-27- Les formes d'unités de méthanisation en France : typologies et scénarios d'avenir de la filière

Alexandre BERTHE, Mathilde FAUTRAS, Pascal GROUIEZ, Sabina ISSEHNANE

Deuxieme partie : effets du developpement de la methanisation sur les exploitations agricoles

P-45- L'agronomie au service de la méthanisation ou la méthanisation au service de l'agronomie ?

Grégory VRIGNAUD

P-55- Diversité de fonctionnement des méthaniseurs : quels impacts sur les exploitations ?

Etienne PAILLARD

P-63- La méthanisation, outil favorable à la transition agroécologique

Christian COUTURIER, Céline LABOUBEE, Sylvain DOUBLET

P-71- Optimiser les services de l'interculture avec les CIVE

S. MARSAC, H LAGRANGE, C. QUOD, M. HEREDIA, N. DELAYE, F. LABALETTE, V, M. BAZET, EA. SANNER

P-93- De l'évaluation technico-économique et environnementale des CIVE à la co-construction des axes de recherche Optimiser les services de l'interculture avec les CIVE

S. MARSAC, M. HEREDIA, N. DELAYE, F. LABALETTE, V. LECOMTE, M. BAZET

P-107- La méthanisation est-elle compatible avec l'agriculture de conservation ?

Interview de Frédéric THOMAS - Propos recueillis par Grégory VRIGNAUD

TROISIEME PARTIE : ENJEUX DE L'UTILISATION DES DIGESTATS COMME AMENDEMENT ET FERTILISANT

P-111- Que sait-on vraiment de l'impact des digestats de méthanisation sur la qualité biologique des sols agricoles ?

Sophie SADET-BOURGETEAU, Pierre-Alain MARON et Lionel RANJARD

P-115- Effets à court terme des digestats bruts de méthanisation sur la productivité et la qualité fourragère ainsi que sur le fonctionnement microbien sous prairies

LAFLOTTE Alexandre, PACAUD Stéphane, DAIGNEUX Benjamin, POIRRIER Fanny, GENESTIER Julie, RAVARD Benjamin, LE ROUX Yves, PIUTTI Séverine

P-129- Synthèse d'essai d'épandage de digestat liquide sur sol argilo-calcaire de 2010 à 2016

Grégory VRIGNAUD

QUATRIEME PARTIE : DEVELOPPEMENT DE LA METHANISATION, QUESTIONS DE POLITIQUES PUBLIQUES ET DE GOUVERNANCE

P-137- Projets agro-énergétiques de territoire dans l'Ouest français : le rôle des agriculteurs-moteurs

Geneviève PIERRE (première parution dans la revue Cybergeo journals.openedition.org/cybergeo/27205)

P-153- Déploiement de la méthanisation agricole en France : quel cadre de durabilité ?

Isabelle MARX

CINQUIEME PARTIE : RETOURS D'EXPERIENCE DE DIVERS ACTEURS SUR DES PROJETS DE METHANISATION

P-159- Sécalia méthanisation : Un projet d'énergie positive pour les exploitations de notre territoire de Côte d'Or

Pascal DEMAY

P-163- Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique : La biomasse au service de l'Environnement et de l'Agriculture

Laureline BES DE BERC

P-171- Mieux connaître les digestats pour mieux les valoriser

Adeline HAUMONT

P-175- Diversifier en produisant du biométhane : une innovation maîtrisée, inscrite dans le territoire

Denis LEFEVRE, Thomas GONTIER, François KOCKMANN

AVANT-PROPOS

Avant-propos

Antoine Messéan (Président de l'Afa) et Philippe Prévost (Rédacteur en chef)

Ce premier numéro de l'année 2020 s'inscrit dans le prolongement du débat agronomique de l'Association Française d'Agronomie (Afa) lors de son assemblée générale thématique 2019. Le débat avait abordé les questions suivantes : Quelle dynamique de développement et quelle diversité de fonctionnement des méthaniseurs en France ? Quels sont les impacts socioéconomiques de l'intégration d'un méthaniseur dans une entreprise agricole ? Quels sont les impacts agronomiques de telles installations, notamment sur les assolements et la fertilisation ?

En pleine expansion, la méthanisation semble pouvoir contribuer à relever les défis auxquels est confrontée l'agriculture : recycler des co-produits et des déchets urbains tout en permettant de réduire la dépendance aux fertilisants d'origine fossile. Outre une controverse sur la valorisation des digestats, la modification potentielle des assolements et des systèmes de production à l'échelle du territoire interroge sur le risque d'évolution d'une valorisation de déchets agricoles accompagnant la transition agro-écologique vers une industrie où l'agriculture ne serait plus que pourvoyeuse de matières premières.

Dans ce contexte, ce numéro fait le point sur l'état de développement de la filière et les données scientifiques disponibles sur les impacts agronomiques. Et plusieurs retours d'expérience permettent d'avoir différents points de vue sur les évolutions en cours. Nul doute que le sujet est loin d'être épuisé et le souhait de l'Afa est de poursuivre une veille active afin d'éclairer le débat et contribuer ainsi à identifier les conditions de gouvernance et les leviers techniques et organisationnels qui permettent d'exploiter pleinement le développement de la méthanisation pour accompagner la transition énergétique et agro-écologique, tout en prévenant les risques de dérive identifiés.

Au-delà de ce nouveau dossier de notre revue, cette année 2020, marquée par le développement de la pandémie Covid-19, amène de nombreux acteurs à réinterroger les logiques actuelles de développement économique et nombreux sont ceux qui soulignent le rôle primordial que jouent les systèmes agri-alimentaires dans l'émergence de systèmes plus résilients. Plus que jamais, l'Afa et les agronomes ont un rôle à jouer en dépassant les solutions toutes faites, en portant un diagnostic systémique ainsi qu'en partageant les expériences et en croisant les regards de ses membres.

Ce numéro est aussi l'occasion de vous informer des changements dans notre revue.

Olivier Réchauchère, après 10 années de bons et loyaux services comme rédacteur en chef, est remplacé par Philippe Prévost qui en était déjà l'une des chevilles ouvrières. Olivier reste membre du bureau éditorial qui intègre trois nouveaux membres : François Kockmann, qui apportera le regard du développement agricole, Jean-Robert Moronval, qui favorisera les liens aux agronomes formateurs, et Christine Rawski, du CIRAD, qui renforcera aussi le lien avec les Cahiers Agricultures, dont elle assure la rédaction en chef déléguée.

Et nous profitons également de cet anniversaire des 10 ans de la revue pour en changer le style, grâce à notre nouvel animateur Jérôme Busnel. Vous le découvrirez dans l'édition pdf, puis bientôt sur les pages du site internet.

Bonne lecture.

Remerciements :

Aux membres du comité de numéro : Grégory Vrignaud, Olivier Réchauchère, Adeline Michel, Yves François et Marc Benoît

ÉDITORIAL

Agronomie et méthanisation

Grégory Vrignaud, Olivier Réchauchère, Adeline Michel, Yves François, Marc Benoît

Coordonateurs du numéro

Cette livraison de la revue de l'AFA s'inscrit dans le prolongement du débat agronomique « Agronomie et Méthanisation » organisé par l'Association Française d'Agronomie (Afa) lors de son assemblée générale thématique du 21 mars 2019. Le débat avait donné une vision de la dynamique de développement de la méthanisation en France, puis traité des implications socio-économiques et agronomiques de la généralisation de cette pratique.

La méthanisation est en effet inscrite dans les objectifs de la programmation pluriannuelle de l'énergie, qui définit les priorités d'action des pouvoirs publics pour la gestion des formes d'énergie sur le territoire métropolitain. En avril 2020, le décret entérinant son adoption a fixé pour la méthanisation des objectifs de développement ambitieux. La perspective de forte croissance de cette activité nous a amenés à considérer différentes dimensions de la question, sans se limiter trop strictement aux seules dimensions agronomiques.

Une première partie donne différents éclairages sur l'état des lieux de la filière et ses perspectives d'évolution

En ouverture de ce numéro, Julien Thual, après avoir retracé la genèse de la méthanisation sur notre territoire dans les années 1970, dresse le panorama des enjeux, recensés par l'Ademe, que ce développement accéléré implique, en pointant notamment la question du financement des nouveaux projets.

Ce panorama est très concrètement illustré par deux témoignages donnant à voir les spécificités de ce développement dans deux régions françaises. Adeline Haumont et ses co-auteurs de l'association AILE (Association d'Initiatives Locales pour l'Energie et l'environnement) font le point pour la région Bretagne, où la méthanisation est très liée à la délicate question du traitement des effluents d'élevage. Juliette Chenel et Sarahlynn Rizard, de la structure METHAN-ACTION, dispositif d'accompagnement de la filière méthanisation en Nouvelle-Aquitaine, montrent pour leur part que les projets à venir s'orientent très majoritairement vers la production de biogaz pour injection dans les réseaux de gaz alors que le parc de méthaniseurs actuels est centré sur la cogénération électricité-chaleur.

Concluant cette première partie et considérant de nouveau un point de vue national, Alexandre Berthe et ses co-auteurs, sur la base d'entretiens menés auprès d'agriculteurs du Grand-Est et de la Nouvelle Aquitaine, analysent d'un point de vue économique les formes d'unités de méthanisation en France et s'interrogent sur les scénarios d'avenir de la filière : face à une dynamique de renforcement de formes industrielles d'unités de méthanisation, un autre modèle de développement de la filière reposant sur le critère de diversité et d'adaptation à chaque territoire n'est-il pas à rechercher ?

La deuxième partie du numéro est consacrée aux effets du développement de la méthanisation sur les exploitations agricoles.

A partir de son expérience de terrain en tant que gérant du bureau d'étude ACE méthanisation, et de données issues du programme Methalae, Grégory Vrignaud passe en revue différents

types d'innovations agronomiques dans lesquelles la méthanisation joue un rôle direct ou indirect, depuis l'échelle de la parcelle jusqu'au territoire.

En complément de ce regard agronomique, Etienne Paillard (Cerfrance), sur la base d'une typologie des formes de méthanisation élaborée dans le cadre du programme Méthalaé, et reposant notamment sur la structuration juridique et financière des projets, identifie les impacts socio-économiques de ces projets sur les exploitations qui le portent, et donne des pistes pour orienter les stratégies de ces dernières.

Combinant les dimensions agronomique et économique et s'inspirant de situations ou de réflexions issues du programme Méthalae, Christian Couturier et ses co-auteurs du bureau d'étude et de recherche SOLAGRO tracent les trajectoires de deux exploitations type, une céréalière et une en élevage, en montrant comment la méthanisation peut constituer un outil de leur transition agroécologique.

Sylvain Marsac, d'Arvalis, et ses co-auteurs examinent les implications agronomiques de l'introduction des CIVE dans les systèmes de culture, à partir d'expérimentations effectuées dans le cadre du programme Opticive et de simulation de scénarios permettant également d'estimer l'intérêt de ces systèmes du point de vue de l'économie des exploitations

Finalement, sous forme d'une interview, Frédéric Thomas, directeur de la revue TCS (Techniques culturales simplifiées devenue Techniques de conservation des sols) soutient l'idée que méthanisation et agriculture de conservation sont assez liées et répondent à des objectifs communs.

La troisième partie se penche sur la question controversée de l'utilisation des digestats comme amendement et fertilisant.

Sophie Sadet-Bourgeteau et ses co-auteurs de l'UMR Agroécologie de l'INRAE font le point des connaissances scientifiques au sujet de l'impact des digestats de méthanisation sur la qualité biologique des sols agricoles. En dépit de la multiplication de prises de position sur le sujet, leur conclusion est que l'on dispose de peu de données scientifiques pour objectiver ces impacts. Il est donc urgent de produire des connaissances sur ce sujet afin de mieux évaluer l'impact de telles pratiques. Ce sera possible dans le cadre du projet Methabiosol, porté notamment par Agrosup Dijon et la Chambre d'Agriculture du Maine et Loire, qui vient de recevoir un financement CASDAR pour les trois prochaines années.

Rapportant les résultats d'un essai de 3 ans mené dans plusieurs pays européens à propos des effets de différentes modalités de fertilisation sur la production de fourrage en prairies, Alexandre Laflotte de l'Université de Lorraine et ses co-auteurs se demandent si les digestats pourraient permettent à la fois de réduire l'usage des intrants de synthèse tout en améliorant le fonctionnement biologique des sols. Les résultats préliminaires de cet essai ne permettent pas de conclure de façon tranchée, ce qui suppose de poursuivre les essais sur une période plus longue.

Concernant la valeur fertilisante des digestats, Gregory Vrignaud apporte un témoignage issu de 8 années d'essais mené en microparcelles dans les conditions de la pratique agricole, avec un groupement d'agriculteurs et des partenaires locaux du Nord Est des Deux-Sèvres. Ces essais ont permis de déterminer la valeur fertilisante du digestat et d'affiner le conseil aux agriculteurs dans le contexte pédo-climatique local.

Ce champ de connaissance est ainsi en plein développement, et des résultats de projets futurs ou en cours pourront venir compléter ce numéro thématique dans les prochains mois ou années

La quatrième partie aborde des questions de politiques publiques et de gouvernance à mettre en place pour accompagner un développement de la méthanisation

Cette section du numéro ne comporte que trois textes originaux. Il est vrai que le contexte institutionnel autour de la méthanisation n'était peut-être pas assez stabilisé au moment du lancement de l'appel à contribution pour que cette thématique puisse susciter de nombreuses contributions.

Nous reprenons ici un texte de Geneviève Pierre, initialement paru dans la revue Cybergeo, qui souligne le rôle d'instances d'action publique de type Pôle d'excellence ou programme Leader pour appuyer des projets co-construits à l'échelle du territoire par une diversité d'acteurs, et notamment des agriculteurs « moteurs ».

Alexandre Berthe *et al.,* dans leur texte précédemment cité, abordent en conclusion cette question des politiques publiques en se demandant comment les concevoir de façon à soutenir la diversité au sein de l'écosystème des entreprises de la méthanisation, plutôt que d'inciter à l'unification des modèles d'unités de méthanisation.

Isabelle Marx, chargée de projet Agriculture-Alimentation au WWF France, présente le point de vue de cette ONG sur le cadre politique à mettre en place afin d'assurer un déploiement de la méthanisation agricole en France dans de bonnes conditions de durabilité.

Enfin Olivier Dauger, président de la Chambre régionale d'agriculture des Hauts de France, nous livre un point de vue d'agriculteur sur les conditions socio-politiques nécessaires au développement de la filière.

Finalement, la **cinquième partie** regroupe des retours d'expérience de divers acteurs sur des projets de méthanisation.

Pascal Demay, de la Coopérative Dijon Céréales, témoigne d'un projet d'introduction de CIVE dans les successions colza-blé-orge dans les zones du Chatillonnais au Nord de la Côte-d'Or. Cette innovation vise à la fois à sortir ces successions de l'impasse agronomique dans laquelle elles se trouvaient (du fait des difficultés de désherbage) et à développer la méthanisation. L'intégration de CIVE permet ainsi de répondre à plusieurs défis de transition agroécologique et énergétique.

L'association des agriculteurs méthaniseurs de France livre deux retours d'expérience. Laureline Bes de Berc témoigne des pratiques de mise en place de CIVE au sein du réseau des membres de l'AAMF, et, au-delà de la production d'énergie, souligne l'intérêt, du point de vue de ces agriculteurs, des CIVE pour rendre différents services environnementaux. Adeline Haumont rend compte d'une enquête auprès des membres de l'AAMF sur la valorisation des digestats de méthanisation.

Enfin, Denis Lefèvre et François Kockmann, à partir de l'interview du gérant de la société de méthanisation CIEL, l'agriculteur J.L. Moratin, et d'un conseiller de la chambre d'agriculture de Saône et Loire, rendent compte de l'expérience de la gestion d'une unité de méthanisation et de son impact dans le territoire.

Bonne lecture

TÉMOIGNAGE

Emergence, état actuel et enjeux pour la filière méthanisation en France : le point de vue de l'ADEME

*Julien THUAL**

**Service Mobilisation et Valorisation des Déchets - Direction Economie Circulaire et Déchets – ADEME – julien.thual@ademe.fr*

Introduction

La méthanisation est une filière considérée comme prometteuse par l'ADEME, tant sur les services environnementaux qu'elle peut apporter, la production d'une énergique renouvelable que sur la diversification des activités agricoles. Ce texte retrace la genèse de la méthanisation sur notre territoire dans les années 1970 puis décrit la filière actuelle et pointe les enjeux pour les années à venir. L'ADEME (Agence de la Transition Ecologique) est un organisme public qui accompagne les entreprises, collectivités locales, pouvoirs publics mais aussi les particuliers dans la transition Ecologique. Elle est notamment chargée d'accompagner les porteurs de projet de méthanisation dans leurs démarches, études de faisabilité, etc.

D'un modèle très vertueux à un besoin de modèles simplifiés et standardisés

Avec les premiers tarifs d'achat de l'électricité issue de la cogénération (combustion du biogaz pour produire l'électricité et valorisation concomitante de la chaleur produite) en 2001, puis 2006, quelques premières installations de méthanisation agricole ont vu le jour, mais c'est surtout à partir de 2011 qu'on a pu observer un véritable décollage de la filière. Ou du moins « redécollage » si on fait référence à la période consécutive au double-choc pétrolier des années 70 qui avait vu une flambée de projets de méthanisation, mais progressivement abandonnés dans un contexte de retombée du prix des énergies conventionnelles et du développement de l'électro-nucléaire.

Le modèle français initial encouragé dès le début des années 2000 était une méthanisation très élaborée, avec une codigestion des biodéchets et des coproduits des entreprises du territoire, l'association des acteurs locaux, publics et privés, la création d'ateliers de valorisation de la chaleur autour de la cogénération (production d'électricité et d'une chaleur co-produite à valoriser), et une limitation stricte du recours à la biomasse cultivée pour une maximisation des bénéfices sur tous les plans. Un modèle fort vertueux donc, … mais complexe aussi.

Ce dispositif a permis de faire émerger de très beaux projets, proches de leur territoire, mais difficiles à transposer dans un contexte d'objectifs de développement ambitieux en terme de nombre d'unités de méthanisation à mettre en service.

Depuis, la filière a tiré enseignement de ces premiers projets et mis en place les solutions qui étaient nécessaires face aux verrous rencontrés autour de la valorisation de chaleur, la gestion des inertes (matières non biodégradables comme les sables, les matières plastiques, etc.) en entrée de digesteur, et la nécessaire validation et maturité des technologies.

Dernièrement, la faisabilité d'injecter du biométhane dans le réseau de gaz naturel a été plus que démontrée. On peut même dire que ce pari a été gagné par la filière. Ce succès est dû aux premières installations, à leurs exploitants et partenaires, à la diffusion des bonnes pratiques ainsi qu'au fort dynamisme des opérateurs des réseaux gaziers.

Mais pour passer à la vitesse supérieure, étape qui est en cours, il y a un fort besoin de modèles plus simples pour répondre à un objectif de standardisation, de massification et de baisse des coûts.

800 installations en service, et de 200 à 400 projets par an à partir de 2020

Au 1er janvier 2020, la France compte environ 800 installations de méthanisation dont environ 600 installations agricoles ou centralisées. Ces deux derniers secteurs sont les plus dynamiques avec un rythme de mise en service depuis 2019 qui dépasse les 100 unités par an. Sur la même année, l'ADEME a contractualisé plus de 150 projets de méthanisation. En 2020, si l'on regarde le nombre de projets déposés auprès de l'ADEME et les projets enregistrés en « procédure d'identification ADEME », on peut estimer que la dynamique en cours est située entre 200 et 400 projets par an.

De la cogénération à l'injection

Avec l'encouragement national à l'injection du biométhane - chaque fois que possible car d'un meilleur rendement énergétique que la cogénération - les projets de cogénération sont moins nombreux désormais, de l'ordre de 50 projets par an, et plutôt réservés aux petites puissances ou aux zones rurales non desservies par le gaz. On observe que 75% des projets en cogénération ont une puissance installée comprise entre 100 et 300 kWe[1], et s'appuient sur des approvisionnements à base principale d'effluents d'élevage. Ils recourent assez peu à la biomasse cultivée. En revanche, 2 projets sur 3 se font maintenant en injection du biométhane. 75% de ces projets se situent dans la tranche de 50 à 200 Nm3h[2]. Les approvisionnements sont plus conséquents en mobilisant en moyenne annuelle 17 000 t de substrats par projet et une part plus importante de cultures de type « cultures intermédiaires à vocation énergétiques » (CIVE).

Les objectifs de la « programmation pluriannuelle de l'énergie » (PPE) pour la méthanisation

Les derniers objectifs fixés dans le cadre de la PPE sont rappelés et traduits en nombre d'installations dans le tableau suivant.

	Objectif PPE 2023	Objectif PPE 2028
Capacité installée en cogénération Equivalence en nombre d'unité de méthanisation	**270 MWe** 820 unités (moy. 330 kWe par unité)	**340 MWe (Hyp. Basse)** **410 MWe (Hyp. Haute)** 1050 à 1150 unités
Injection Equivalence en nombre d'unité de méthanisation	**6 TWh/an** 500 unités (moy.12 GWh/an par unité)	**24 Twh (hyp. Basse)** **32 Twh (hyp. Haute)** 2000 à 2700 unités

Pour l'électricité ces objectifs sont atteignables. Pour l'injection, les objectifs pourraient sûrement être atteints dans les conditions actuelles de développement de la filière, mais deux nouvelles contraintes sont à prendre en compte : une baisse et nouvelle composition du tarif biométhane à venir et la demande par la PPE de réduction des coûts de production.

1 Kilowatt électrique Le kWe correspond à la puissance produite sous forme électrique, ici à partir de l'énergie thermique de la combustion du biogaz

2 Nm3 : normo mètre cube, unité de mesure de quantité de gaz pour 1 m3 dans les conditions normales de température et de pression

CIVE, acceptabilité, cycle du carbone, biologie des sols…

Dans le développement de cette filière des questions restent à investiguer pour toujours mieux connaître et mieux orienter les projets. Ces thématiques ont été clairement identifiées aujourd'hui et font l'objet d'approfondissement dans le cadre de projets de recherche.

Les CIVE sont de plus en plus présentes sur les projets d'injection de biométhane (en moyenne 25%, mais variable de 0 à 100 % selon les projets, les régions agricoles, les exploitations...), mais la soutenabilité de cet approvisionnement, fort méthanogène, est conditionnée à une gestion agronomique et environnementale exemplaire. Les études en cours visent à mieux connaître les impacts des CIVE, leur intégration dans les systèmes de culture, à assurer leur réussite agronomique et formuler des recommandations de bonnes pratiques, en particulier sur la gestion parcimonieuse des ressources hydriques dans un contexte tendanciel d'accentuation des sécheresses estivales.

La mobilisation des biomasses agricoles en méthanisation interroge aussi sur les impacts et bénéfices du point de vue du stockage de carbone dans les sols. Des programmes passés comme *Méthalae* ont déjà apporté des éléments de réponse mais doivent être approfondis.

Le financement des projets, 1er verrou à lever

Un projet de méthanisation agricole est un très gros investissement à porter pour une exploitation agricole. En cogénération cela représente un investissement moyen de 2 millions d'euros, et 5,5 millions d'euros pour les projets d'injection.

A ce jour, et en l'état actuel des tarifs d'achat de l'énergie, le principal obstacle est le financement des projets et la mobilisation de fonds propres. Les organismes bancaires sont encore trop exigeants avec les porteurs de projets en demandant un niveau élevé de garanties pour accorder des prêts, et notamment un niveau de fonds propres élevé. Pourtant les projets sont de plus en plus robustes, les approvisionnements en substrats se consolident, et la filière se professionnalise, comme en témoigne la démarche qualité filière *Qualimétha*, lancée au début de cette année en France.

Parrallèlement, la rentabilité des projets s'améliore et ne nécessite plus autant d'aides publiques que par le passé. Surtout, avec la massification du nombre de projets, le soutien public au cas par cas n'apparaît plus approprié ni adapté.

Ainsi en attendant une baisse du niveau de fonds propres demandés par les organismes bancaires, pour accélérer le rythme actuel de développement, la filière devra compter sur la mobilisation collective des fonds propres semi-publics ou privés : petits collectifs, fonds de capitaux (SEM, citoyens, sociétés etc.) voire les fonds de garantie de prêts. Les fonds citoyens sont aussi grandement à encourager car ils participent à l'acceptation locale des projets et une redistribution de la richesse créée en direction des habitants du territoire.

TÉMOIGNAGE

Une forte dynamique de la méthanisation en Bretagne boostée par le secteur agricole

Adeline Haumont, Armelle Damiano*, Jeanne Lencauchez**

**AILE (Association d'Initiatives Locales pour l'Energie et l'environnement)*

Le développement de la méthanisation en Bretagne a commencé il y a plus de dix ans et connait un véritable essor ces dernières années, notamment dans le secteur agricole : la Région compte au 1er janvier 2020 plus d'une centaine d'installations de méthanisation.

Typologie des unités

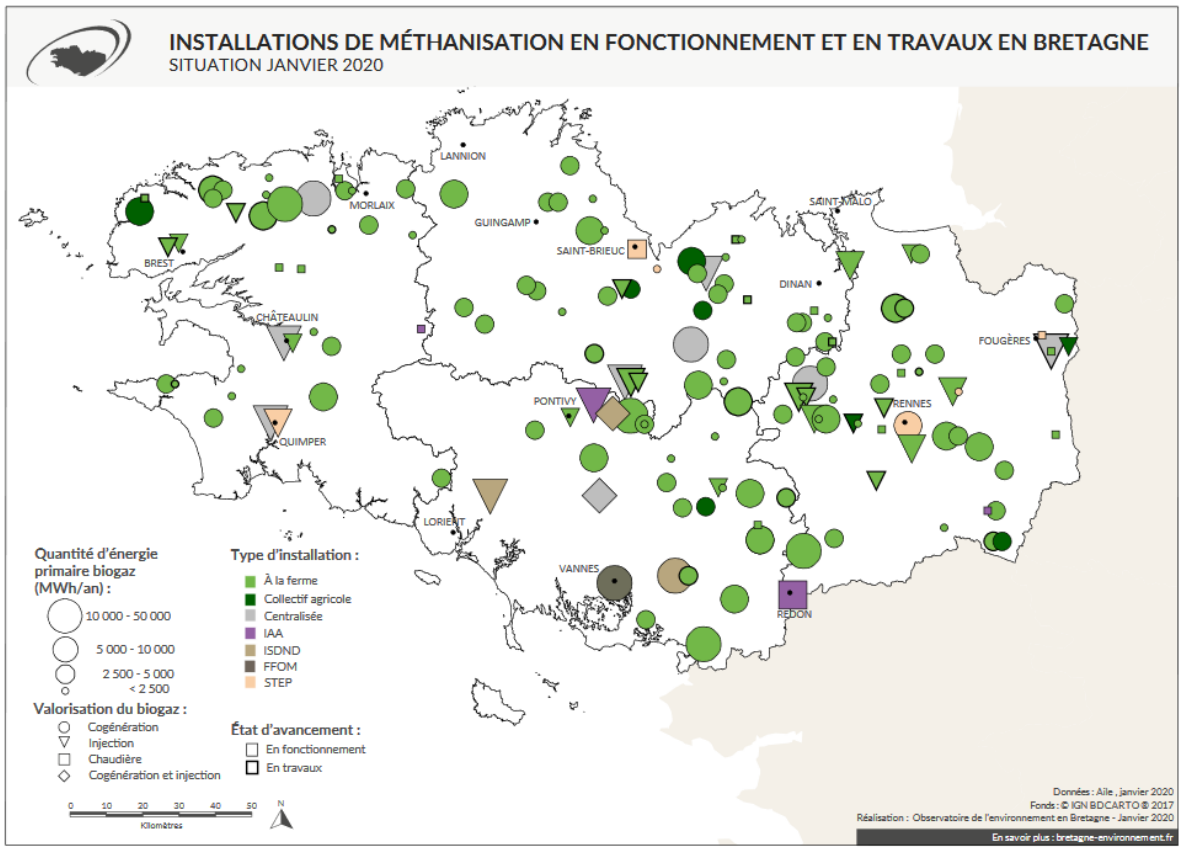


Figure 1 : Carte des installations de méthanisation en région Bretagne

Nombre de sites en fonctionnement en Bretagne au 1er janvier 2020		
A la ferme	101	unité de méthanisation avec un portage majoritairement agricole (+50% capital ; de 1 à 3-4 agris), OU valorisant plus de 50 % d'effluents d'élevage (masse), OU implantée sur une exploitation ou à proximité
Centralisé	8	unité de méthanisation avec participation des acteurs du territoire (agriculteurs, entreprises, collectivité…), OU valorisant pour partie des effluents d'élevage
Collectif agricole	7	unité de méthanisation portée par au minimum 3 structures agricoles qui sont actionnaires majoritaires de la société de méthanisation et implantée sur un site dédié
STEP	6	unité de méthanisation portée par une collectivité, pour le traitement des boues de step
IAA	4	unité de méthanisation avec un portage industriel majoritaire, OU sur site industriel (existant)
ISDND	3	installation de stockage de déchets non dangereux - gaz de décharge
FFOM	1	unité de méthanisation portée par une collectivité, pour le traitement des ordures ménagères résiduelles ou biodéchets
TOTAL	**130**	

Tableau 1 : Nombre de sites de méthanisation en fonctionnement en 2020 selon les types (Source des données : AILE, Plan Biogaz)

Si la méthanisation en Bretagne s'est principalement développée avec les unités à la ferme (projet individuel), les collectifs agricoles se développent de plus en plus. En général, comme les exploitants ont l'habitude de travailler ensemble en CUMA, la méthanisation apparaît alors comme un nouvel outil collectif de gestion de leurs effluents d'élevage. Par ailleurs l'attrait de l'injection du biométhane dans les réseaux poussent les acteurs à se regrouper afin d'atteindre un seuil de rentabilité qui est plus élevé qu'en cogénération.

Origine des substrats

La question de l'origine des matières méthanisées est cruciale dans un contexte où les cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE) se développent fortement et où la crainte de voir apparaitre le modèle allemand, basé sur les cultures énergétiques est prégnant[3]. Au total, ce sont plus de 1.4 millions de tonnes de matières organiques qui sont méthanisées en Bretagne. Dans une région dominée par l'élevage, les effluents d'élevage restent les principaux substrats. Ils représentent 78% en moyenne des substrats des collectifs agricoles et 70% des substrats des installations à la ferme (intégrée à l'exploitation agricole).

3 Le modèle allemand est basé principalement sur la digestion de maïs ensilage en culture principale. Le risque en zone d'élevage pourrait alors de mettre en concurrence l'alimentation des méthaniseurs à celle des bovins, faisant ainsi augmenter le prix des fourrages.

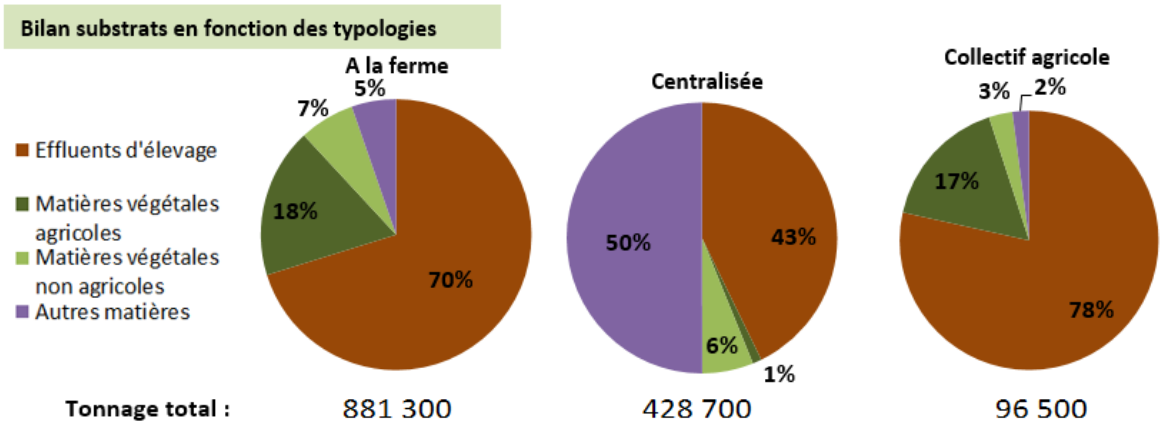


Figure 2 : Répartition des origines de substrat selon les types d'installation (Source des données : AILE, Plan Biogaz)

Structuration de la filière

Depuis 2007, l'ADEME et la Région Bretagne ont mis en place un dispositif d'animation et de soutien à la filière, dont l'animation est assurée par AILE, le Plan Biogaz. Ce dispositif vise à promouvoir les unités de méthanisation, intégrées dans leur territoire et en adéquation avec les enjeux environnementaux régionaux. Première Région agricole de France, la Région Bretagne doit relever le défi de la transition agricole et favoriser des systèmes de productions durables, vivables et compétitifs. Le développement de la méthanisation doit aujourd'hui s'inscrire dans ce cadre pour répondre à de multiples enjeux : qualité de l'eau par un usage raisonné et efficace du digestat, réduction des émissions de gaz à effet de serre du secteur agricole, sécurisation du réseau électrique et développement de la mobilité durable… Tout ceci en gardant la compétitivité des filières d'élevage.

Pour répondre à ces objectifs, la filière s'organise et se professionnalise. Un parcours de formation tutorée, visant les agriculteurs méthaniseurs existe depuis 2015 et 45 exploitants ont déjà pu se former. Ce programme, d'une durée de 6 jours, a été mis en place par les Chambres d'agriculture de Bretagne, l'AAMF et AILE. Il mêle 6 journées en présentiel (gestion administrative de l'unité, suivi biologique, valorisation du digestat, maintenance, sécurité et mise en route de l'unité), des séances à distance en classe virtuelle et 3 journées en immersion chez un tuteur méthaniseur. Les agriculteurs ainsi formés sont intégrés à un réseau de professionnels qui s'est également structuré pour échanger et partager les bonnes pratiques. Créée au départ sous la forme d'un GIEE, l'Association des Méthaniseurs Bretons (AAMB), branche régionale de l'Association des Méthaniseurs de France, regroupe aujourd'hui plus de 90 agri-méthaniseurs répartis sur les 4 départements Bretons.

L'association s'est donnée deux thématiques de travail prioritaires : les CIVE et le digestat, avec pour objectifs :

- Sur les CIVE et les résidus de culture : sécuriser l'approvisionnement par une meilleure maîtrise des itinéraires techniques, du stockage et de l'incorporation. Le groupe de travail a démarré par la réalisation d'une enquête pour connaitre les itinéraires techniques pratiqués actuellement, évaluer les coûts de revient. Les potentiels méthanogènes de plusieurs variétés et mélanges ont été réalisés.

- Sur le digestat : Réduire la consommation en engrais minéraux en optimisant la valorisation des digestats et en favorisant les échanges de biomasse notamment entre éleveurs et céréaliers comme par exemple paille contre digestat voire fourrage contre digestat. Les premiers travaux ont porté sur l'analyse de reliquats azotés en sortie d'hiver avec

plusieurs stratégies et niveaux de fertilisation. Les prochains travaux élargiront les thématiques au suivi des stocks de matière organique et aux techniques d'épandage permettant de limiter la volatilisation de l'ammoniac.

Perspectives et innovations technologiques

Les nouvelles perspectives de valorisations du biogaz comme le bioGNV[4] pour le transport, le biogaz porté (collecte de biogaz ou de biomethane dans plusieurs exploitations agricoles) ou la production d'électricité de pointe ouvrent des nouvelles voies dans la valorisation du biogaz et dans la collaboration entre acteurs du territoire. Plusieurs acteurs Bretons sont des pionniers dans le développement de ces nouvelles valorisations, à l'instar du pôle Liger développé par le territoire de Locminé qui combine chaufferie bois énergie, méthanisation en cogénération, injection de biométhane dans le réseau et station bioGNV pour véhicules légers et transporteurs.

Des challenges sociétaux à relever

Dans l'optique d'un développement de la méthanisation, les futurs projets devront s'inscrire pleinement dans une logique d'intégration et de dialogue territorial. Aujourd'hui de nombreux projets, de toutes typologies, se heurtent à l'hostilité des riverains et d'associations comme Eaux et Rivières de Bretagne, fortement opposée au développement de la méthanisation en Bretagne. Les porteurs de projets doivent en prendre conscience et s'engager dans une démarche de concertation. C'est aussi dans la recherche de projets exemplaires, qui pourront allier transition énergétique et agro-écologique que se trouvera sans doute la porte de sortie.

4 Biogaz utilisé comme carburant pour les transports routiers

TÉMOIGNAGE

Accompagnement de la filière de méthanisation en Nouvelle Aquitaine : focus sur MéthaN-Action

Juliette Chenel* et Sarahlynn Rizard*

*FRCUMA Nouvelle Aquitaine, contact : juliette.chenel@cuma.fr

Présentation de MéthaN-Action

METHAN-ACTION est le dispositif d'accompagnement de la filière méthanisation en Nouvelle-Aquitaine. Il est co-piloté par l'ADEME et le Conseil Régional Nouvelle-Aquitaine et co-animé par la Fédération Régionale des CUMA et la Chambre Régionale d'Agriculture. Il s'appuie sur les relais locaux présents auprès des porteurs de projet sur le terrain, notamment Chambres Départementales d'Agriculture et Fédérations de Proximité des CUMA, mais aussi ponctuellement sur des syndicats d'énergie ou des collectivités tant qu'ils soutiennent un porteur de projet notamment dans les phases d'émergence.
Le dispositif se décline en plusieurs axes :

- Guichet unique d'information relative aux demandes de financement et documents associés
- Accompagnement technique et organisationnel des porteurs de projet et exploitants
- Animation régionale et départementale des réseaux d'acteurs et de la filière
- Capitalisation des retours d'expérience et des suivis d'unités en fonctionnement

Plus concrètement, c'est un centre de ressources avec des outils structurants et sous diverses formes à disposition des porteurs de projet : des retours d'expérience, des avis techniques, des formations, circuits de visite, journées techniques, rencontres informelles, mais aussi un site internet, des newsletters, et des contacts directs avec les acteurs du dispositif.
Il s'adresse donc à tous les porteurs de projet et unités en fonctionnement, quels que soient leur maturité ou leur profil, ainsi qu'à tous les acteurs de la filière en recherche d'information sur le développement de la filière dans la région.

Figure 1 : Des porteurs de projets en visite d'installation

Etat des lieux en Nouvelle-Aquitaine

Au 23 octobre 2019, la région Nouvelle-Aquitaine compte 72 unités de méthanisation en fonctionnement, comprenant (cf. figure 2) les unités agricoles, centralisées, industrielles, stations d'épuration (STEP), et les unités historiques valorisant l'énergie par la chaleur dans le cadre du traitement de leurs effluents. 17 unités sont en construction dont 6 injecteront sur les réseaux

de gaz. Plus d'une centaine de projets sont plus ou moins avancés, et pour ceux dont la valorisation est définie, plus de 70 % privilégient l'injection à la cogénération (cf. figure 3).

- 72 unités de méthanisation en fonctionnement dont :
  - 46 unités agricoles ou territoriales
  - 18 industrielles dont 17 historiques (16 agro-industriels)
  - 7 STEP
  - 2 professionnels du déchet

  Et dont :
  - 42 sites en cogénération
  - 8 sites en injection
  - 22 sites en chaleur
- 17 unités de méthanisation en construction : 14 agricoles, 1 territoriale, 1 industrielle, 1 professionnel du déchet

Plus d'informations sur l'état des lieux de la filière (unités en fonctionnement, projections, énergies, positionnement etc.) sont disponibles auprès de l'AREC (Agence Régionale et d'Evaluation Environnement et Climat) qui est en charge du suivi du développement de cette filière.

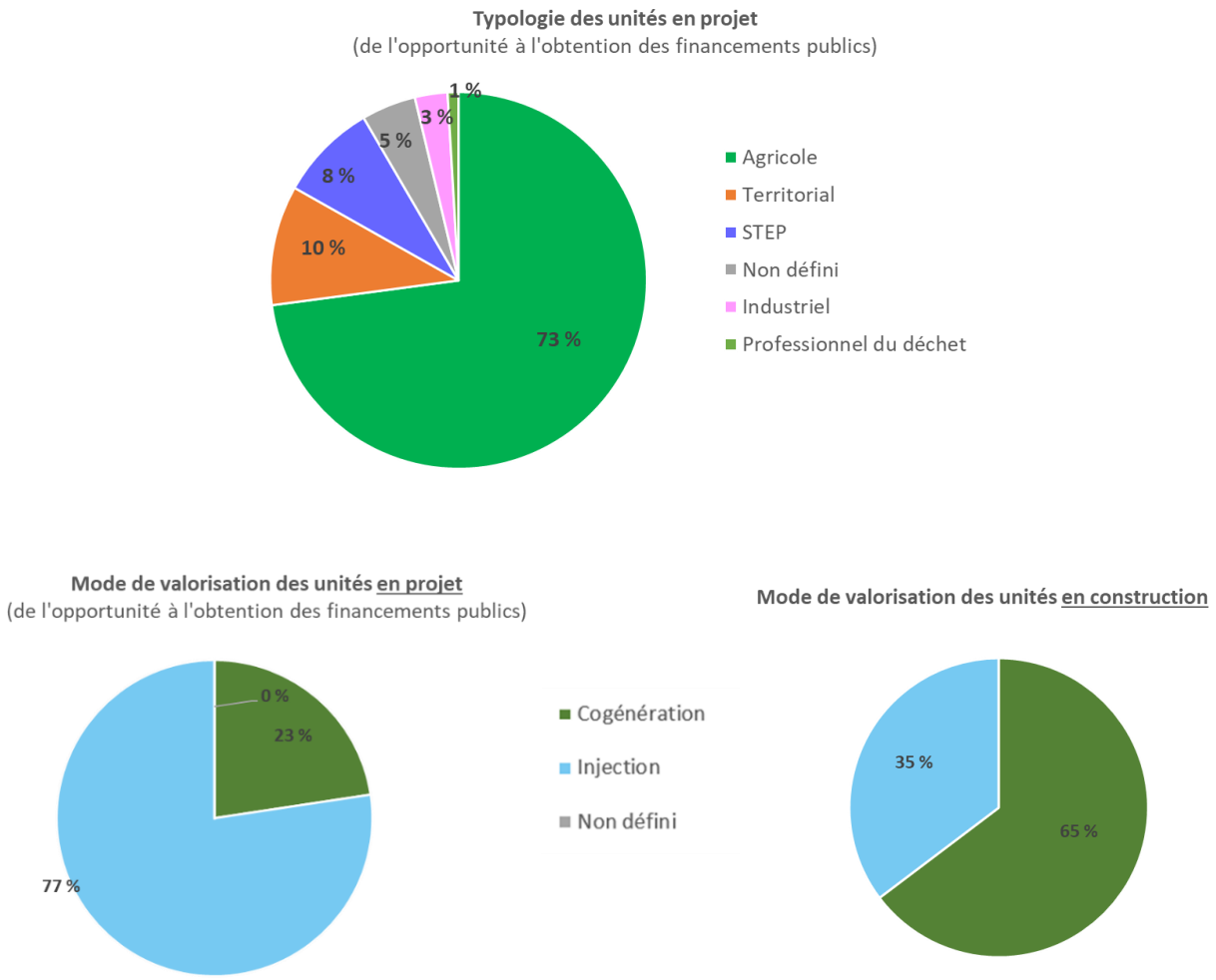


Figure 2 : Etat des lieux des projets (au 23 octobre 2019)

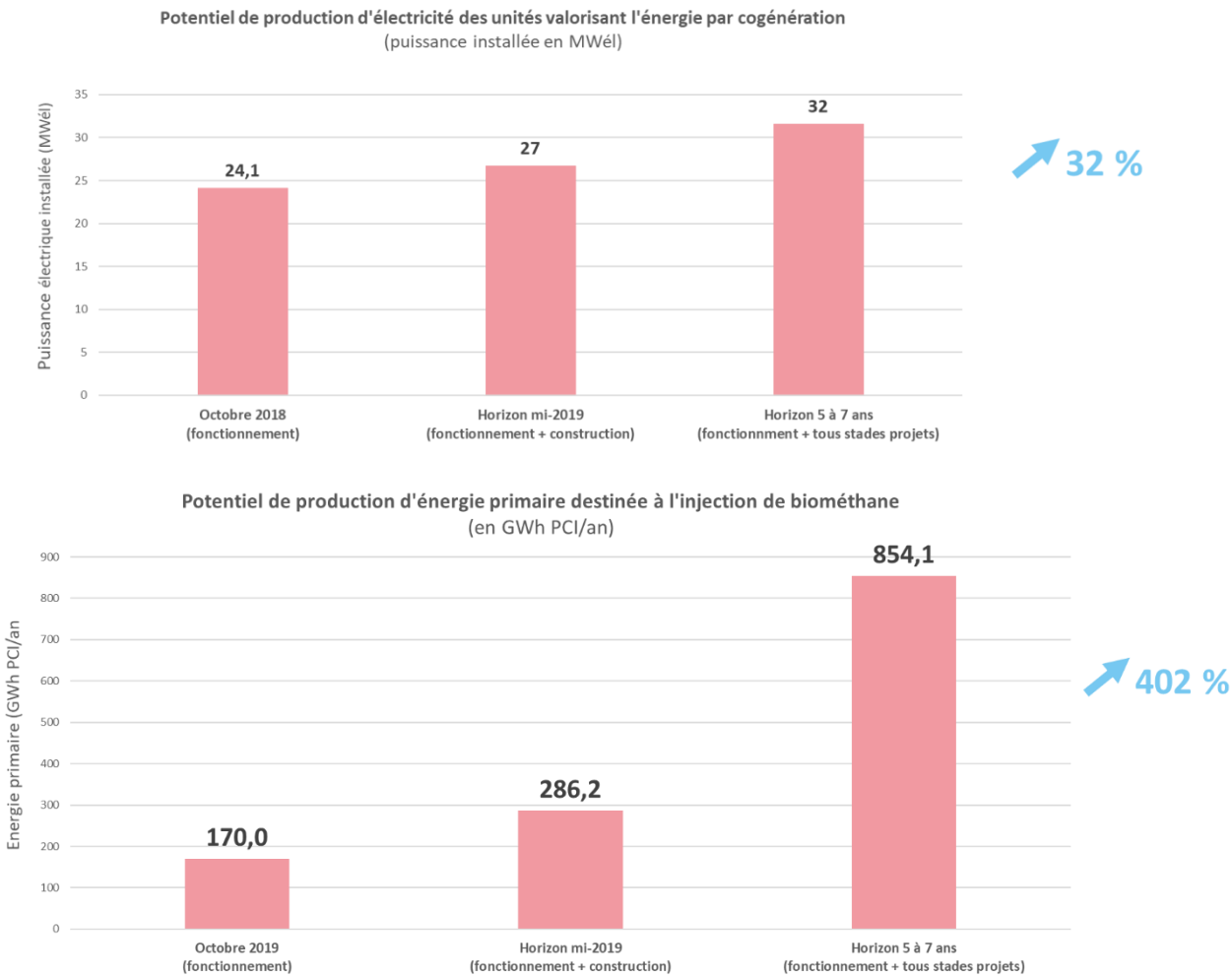
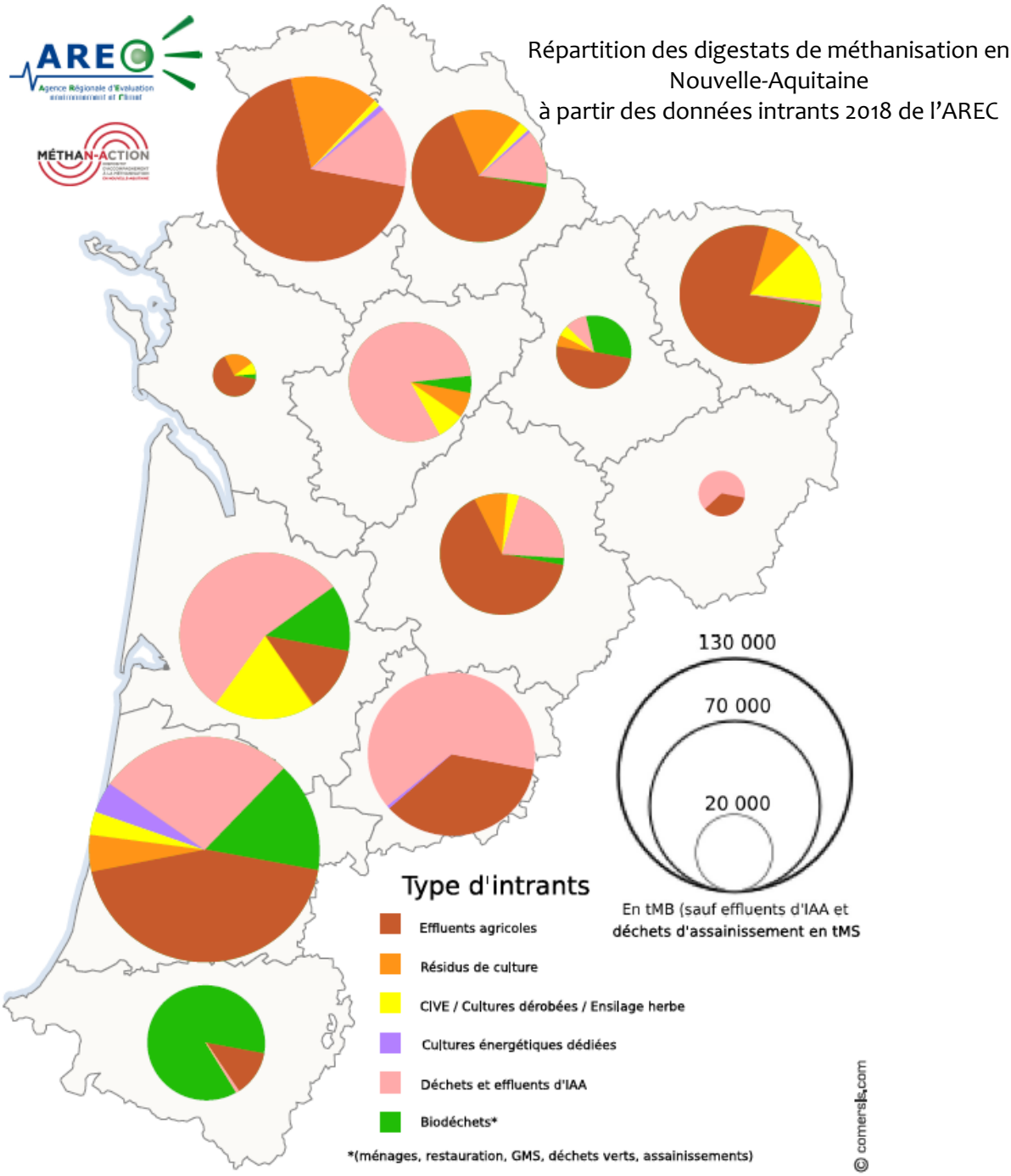
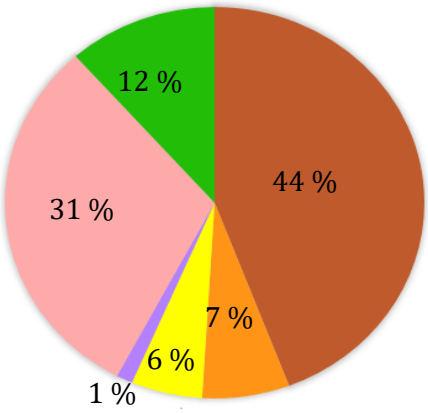


Figure 3 : Projections sur les modes de valorisation des projets (au 23 octobre 2019)

Pour aller plus loin, l'AREC produit tous les ans une note qui présente les caractéristiques de gisement, de production et de valorisation énergétique du parc régional de méthaniseurs en fonctionnement, mais aussi des projets avancés.





Répartition des digestats en Nouvelle-Aquitaine en fonction de la nature des intrants

Figure 4 : Zoom sur les digestats de méthanisation en Nouvelle-Aquitaine

Peu de données sur les digestats existent à ce jour. La carte de la figure 4 a été construite à partir des données d'intrants auxquelles un taux de 80% a été appliqué pour obtenir des quantités de digestat. Ainsi près de 550.000t de digestats ont été produits en 2018 en Nouvelle-Aquitaine pour 65 unités (dont 9 sites sans données) en fonctionnement fin 2018. Plusieurs études sont menées par les instituts de recherche afin d'en connaître plus sur les digestats car il n'existe pas un digestat mais plusieurs. En effet, le digestat varie selon les intrants qui composent la ration. Le projet Concept-Dig (ADEME, AAMF) a étudié cette diversité à partir d'enquêtes auprès de 74 méthaniseurs. L'étude a permis d'établir une typologie de digestats agricoles (taux de matière organique, rapport C/N, taux de matière sèche, etc.) en fonction des intrants mobilisés. Ce type d'études permettra à terme d'optimiser l'utilisation des digestats en fonction des besoins des cultures et du sol.

Les points clés et bonnes pratiques pour démarrer un projet de Méthanisation en Nouvelle-Aquitaine

Avant toute chose, lorsqu'on se lance dans un projet de méthanisation, il est indispensable de s'informer sur la méthanisation, d'échanger avec d'autres porteurs de projet, de visiter des unités de méthanisation, de participer à des formations, etc. Le porteur de projet doit se forger son propre avis, sa propre vision de la méthanisation. C'est ce qu'on appelle la phase d'étude d'opportunité. Cette première phase est primordiale et n'est pas à négliger. Le dispositif MéthaN-Action ainsi que les relais locaux présents sur le terrain (conseillers en chambre d'agriculture ou fédération départementale de Cuma) permettront d'accompagner au mieux les porteurs de projet durant cette première phase.

S'identifier auprès de MéthaN-Action, c'est également faire connaître son projet auprès des financeurs publics (Ademe et Région). Cette démarche permettra aux financeurs de suivre le projet bien en amont de la demande de subvention, ainsi l'instruction du dossier se fera plus rapidement. Plus globalement, il est conseillé aux porteurs de projet de se faire connaître auprès des services de l'état, des collectivités lors du développement du projet afin de faciliter les démarches administratives.

D'un point de vue technique, la réalisation d'une étude de faisabilité avant investissement est également fortement préconisée. L'objectif de l'étude de faisabilité est d'apporter au porteur de projet les éléments techniques, économiques et réglementaires lui permettant de déterminer la faisabilité d'une unité de méthanisation et d'investir sur le scénario optimal retenu. Cette étude peut-être en partie finançable par l'Ademe et la Région à condition qu'elle soit réalisée par un bureau d'étude neutre et indépendant de tout constructeur. Il est fortement conseillé de passer par cette étape avant tout blocage de tarif de rachat.

ARTICLE

Les formes d'unités de méthanisation en France : typologies et scénarios d'avenir de la filière

Alexandre Berthe[1], Mathilde Fautras[2], Pascal Grouiez[3], Sabina Issehnane[4]

[1] LiRIS, Univ. Rennes et LIED, Université de Paris. Maître de conférences en économie, place du Recteur Henri le Moal, 35000 Rennes, alexandre.berthe1@gmail.com

[2] Département de Géosciences, Université de Fribourg. Maître-assistante en géographie, Unité de géographie, Chemin du musée 4, 1700 Fribourg, Suisse, mfautras@gmail.com

[3] LADYSS, Université de Paris. Maître de conférences en économie, UFR GHES, case 7001, Place Paul Ricoeur, 75205 Paris Cedex 13, pascal.grouiez@gmail.com

[4] LIED, Université de Paris. Maîtresse de conférences en économie, bâtiment Lamarck B, 35 rue Hélène Brion, 75205 Paris Cedex 13, sabina.issehnane@univ-paris-diderot.fr

Résumé

Comptant aujourd'hui plus de 700 unités de méthanisation (UM), la filière de la méthanisation se structure en France depuis une dizaine d'années à la faveur du soutien des politiques publiques, en s'appuyant sur une diversité grandissante des modèles économiques de méthanisation. L'article propose une revue de littérature des classifications existantes d'UM en montrant qu'elles s'appuient principalement sur des critères techniques et juridiques. Pour aller au-delà, l'article s'appuie sur 53 entretiens semi-directifs menés auprès d'agriculteurs du Grand-Est, de l'Ile-de-France et de la Nouvelle Aquitaine et 40 entretiens conduits auprès d'acteurs institutionnels. Il présente de nouvelles classifications basées sur les stratégies et les motivations des acteurs, des connaissances plus subjectives et qualitatives, permettant de mieux appréhender l'évolution de la filière. L'article se termine alors sur une discussion sur le devenir des différents modèles d'UM dans le contexte de reconfiguration en cours de la filière.

Abstract

The multiple forms of biogas production units in France : typologies and future scenarios

With more than 700 biogas production units (BU), the biogas production sector has been structuring in France for the past ten years or so, thanks to the support of public policies, relying on a growing diversity of biogas production models. The article provides a literature review of existing BU classifications, showing that it is mainly based on technical and legal criteria. To go further, the article is based on 53 semi-directive interviews conducted with farmers in the Grand-Est, Ile-de-France and New Aquitaine regions and 40 interviews conducted with institutional stakeholders. It presents new classifications based on the strategies and motivations of the actors, more qualitative and subjective knowledge, allowing a better understanding of the evolution of the sector. The article then ends with a discussion on the future of the various BU models in the context of the current reconfiguration of the sector.

Mots-clés : Méthanisation agricole, transitions énergétiques, économie, France métropolitaine, modèles d'unité de méthanisation, stratégies d'agriculteurs

Introduction

La méthanisation constitue une nouvelle forme de production d'énergie renouvelable, par la formation de gaz à partir de la décomposition de la biomasse en milieu anaérobie. Le développement de cette technologie est récent en France et en Europe avec une croissance plus ou moins forte selon les pays à partir des années 2000. Cette filière s'est d'abord développée en Allemagne à partir d'unités qui mobilisaient principalement comme intrants des cultures dédiées. La situation française est différente puisqu'après avoir connu un certain retard dans son développement, la méthanisation est aujourd'hui portée par des acteurs très différents, et des façons de faire de la méthanisation très diverses coexistent.

Cela provient en partie du fait que, contrairement à d'autres énergies renouvelables aux développements plus anciens, la méthanisation a la particularité de s'ancrer dans trois grands domaines distincts : l'agriculture, la gestion des déchets et l'énergie. Cet ancrage se fait au regard d'une configuration spatiale spécifique, en relation avec un territoire entendu comme un espace physique mais aussi socialement construit à travers des relations économiques et politiques, et approprié par ses habitants et usagers (Lévy, 2003, p.908) (Figure 1). Chaque projet d'unité de méthanisation (UM) est donc en prise avec les acteurs de chacune de ces sphères : certains gèrent des ressources agricoles aux côtés d'autres qui réutilisent une partie des résidus de culture et/ou d'élevage dans le cadre d'activités économiques non-agricoles. La façon dont se mettent en place les projets et dont ils se perpétuent dépend de ces interactions, ainsi que des intérêts et stratégies des différents acteurs impliqués dans le territoire - économiques, politiques et administratifs (voir Bourdin, Nadou et Raulin, 2019). Dans le cadre de l'unité de méthanisation agricole (UMA)[5], son porteur vient de l'agriculture, ce qui peut avoir une influence sur les choix et les stratégies mises en place pour le développement de cette technologie. Dans la Figure 1, le poids et l'influence de la sphère agricole seront dans ce cas prédominants, la situation est différente si l'unité est portée par des acteurs du territoire étudié ou par un industriel.

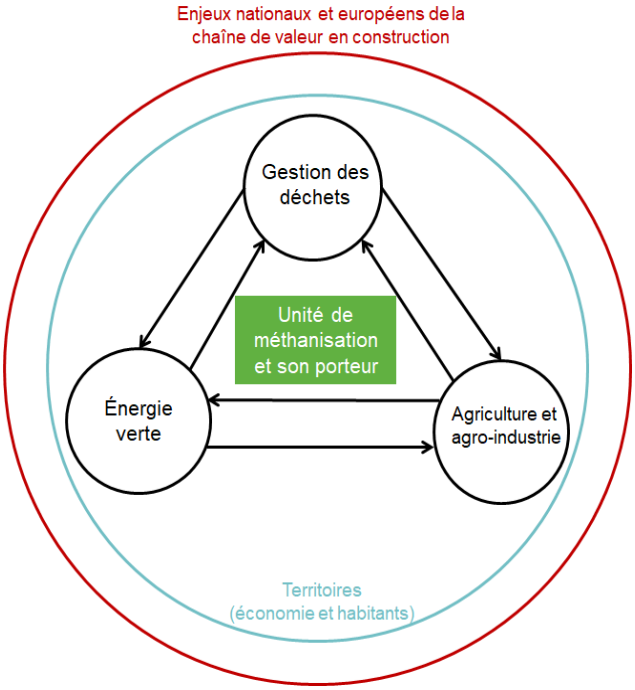


Figure 1. L'Unité de méthanisation ancrée dans des problématiques à multiples échelles

(Source : Auteurs)

5 Lorsque l'expression « méthanisation agricole » est employée, il faut l'entendre au sens de « méthanisation portée par des agriculteurs », indépendamment des substrats utilisés.

Chacune des sphères, agricoles, de gestion des déchets, et de l'énergie verte, ainsi que les territoires et le contexte national et européen influencent la mise en place des unités (lieu, dimensionnement, objectifs), la création de valeur, la prise de décision et les conditions et le niveau d'accaparement par différents acteurs de la valeur ajoutée créée.

Face à cette situation, diverses manières de faire de la méthanisation agricole peuvent se mettre en place. A partir de ce constat, l'article propose d'identifier les différentes typologies d'UMA possibles afin de pouvoir procéder à des regroupements pertinents pour identifier les dynamiques futures de la filière. Pour ce faire, nous procédons d'abord à un état des lieux sur la méthanisation en France et les typologies utilisées précédemment. Ensuite, en nous basant sur l'exploitation des résultats issus de 53 entretiens semi-directifs réalisés avec des agriculteurs-méthaniseurs et de 40 entretiens conduits auprès d'acteurs institutionnels en France, l'article se propose de discuter les éléments saillants pour bâtir de nouvelles typologies des UMA pertinentes pour aborder la dynamique de la méthanisation en France : l'une centrée sur les stratégies de positionnement des agriculteurs dans la filière, l'autre sur leurs stratégies de revenus. Ces nouvelles typologies se fondent sur une connaissance plus approfondie – principalement qualitative et subjective[6] – des unités de méthanisation, notamment sur les stratégies et les motivations des agriculteurs. Enfin, nous analysons à partir de ces nouvelles typologies deux tendances possibles d'évolution de la méthanisation. Nous discutons en particulier la question du maintien ou non d'une diversité d'unités de méthanisation sur les territoires, enjeu important puisque chaque type d'unité répond à des aspirations et à des conditions différentes comme explicité par la discussion autour de la Figure 1.

La méthanisation en France : un état des lieux

Le développement de la méthanisation en France a été marquée à son origine par la mise en place antérieure de cette technologie outre-Rhin. En Allemagne, dans les années 2000, les UM étaient relativement homogènes et utilisaient quasiment toutes de la culture dédiée (céréales) avec le risque de voir la production d'énergie se substituer à la production alimentaire. Les politiques publiques françaises ont pour cette raison incité le développement d'une méthanisation davantage centrée sur la valorisation des coproduits agricoles et notamment les effluents d'élevage (fumier et lisier), l'usage de ces derniers ouvrant à des tarifs de rachat du gaz et de l'électricité spécifiques. En partie du fait de cette orientation, la méthanisation a connu en France un développement relativement lent, mais qui s'est accéléré depuis le début des années 2010.

D'après les données du site SINOE[7] (ADEME), il existe 704 unités de méthanisation (UM) en France en 2020. Côté agricole, les premières UMA françaises se sont développées dans les filières d'élevage en ayant recours à plus de 80% aux effluents d'élevage (Berthe *et al.*, 2018). Or, aujourd'hui, aux côtés de ces pionniers en cogénération dans des UM à la ferme, se développent de plus en plus de projets collectifs portés par des agriculteurs et impliquant parfois d'autres actionnaires comme des coopératives agricoles. Parallèlement, l'implication croissante des céréaliers dans la filière, la diversité des motivations des agriculteurs ainsi que la réorganisation du travail entre l'UMA et l'exploitation soulèvent la question du modèle agricole que sous-tend la méthanisation en France.

De plus, les modifications récentes dans la filière tendent à exacerber encore la diversité, et même les contradictions entre les modèles de méthanisation. D'un côté, des dispositifs favorables au développement de l'injection sont portés par divers acteurs tels que GRDF (décret

6 Cette distinction correspond notamment à la différence entre des accessibles et analysables d'une façon « hard » ou « soft ». Voir notamment, Akerlof (2020).

7 Ce site Internet vise à aider les collectivités territoriales à optimiser leur politique de gestion des déchets, et recense notamment les UM en France.

n°0149 du 29 juin 2018 sur le droit à l'injection) et des organisations comme l'Association technique Energie Environnement (ATEE) ou l'association des agriculteurs méthaniseurs de France (AAMF) visant à professionnaliser et pérenniser la filière. D'autre part, il existe des UMA de taille plus importante (de 300 KWe à 3 GWe), portées le plus souvent par des céréaliers utilisant une diversité d'intrants (fumier et lisier, cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE), menue-paille, déchets du secteur agro-industriel, etc.). Enfin, si en France l'essentiel des UM sont agricoles, leur poids est d'ores et déjà plus faible qu'outre-Rhin avec environ 73% d'UMA[8].

Dès lors, face à une telle diversité, les différents organismes travaillant en lien avec la méthanisation et les chercheurs suivant le développement de cette filière ont cherché à bâtir des typologies pour appréhender la diversité des formes de méthanisation en France. Ces typologies visent à classer les UM afin de rendre compte de situations concrètes. Les typologies actuelles se sont basées sur des savoirs objectifs et quantifiables sur les unités, que ce soit d'un point de vue technologique ou juridique. Sur le plan technologique, les UM sont distinguées selon le type de valorisation du biogaz (cogénération, injection, BioGNV[9]). Sur le plan juridique, elles sont classées selon la nature de l'actionnariat (agricole ou centralisé) et, dans le cas de méthaniseurs agricoles, selon leur caractère individuel (associé à une exploitation agricole et aussi appelé "à la ferme") ou collectif (associé à plusieurs exploitations et/ou à d'autres actionnaires). La distinction entre l'actionnariat "agricole" et "centralisé" tient essentiellement à la nature des substrats et au type de porteurs de projet. Les UM centralisées regroupent des acteurs multiples (agricoles, industriels, collectivités territoriales, fonds d'investissement) et recourent à des substrats issus d'exploitations agricoles, d'industries agroalimentaires, urbaines et/ou industrielles. Tandis que les UMA, dites "à la ferme", sont portées par des agriculteurs et recourent pour l'essentiel à des substrats agricoles. Toutefois, notons qu'une UM dite "agricole en collectif" peut parfaitement être caractérisée par un actionnariat non agricole, toujours minoritaire dans ce cas. L'Agence de la transition écologique (ADEME) ajoute sur la dimension technologique un critère de puissance de l'UM avec un seuil à 500 kWe au-delà duquel l'UM est systématiquement qualifiée de "centralisée", et ce même si elle n'utilise *a priori* que des substrats agricoles (ADEME, 2017, p.90).

Ainsi, les définitions utilisées par l'ADEME pour le recensement des UM sur le site SINOE ne facilitent pas un raisonnement en termes d'acteur. En effet, les unités dites "à la ferme" ne comportent pas toutes les unités agricoles, mais essentiellement celles qui utilisent des effluents d'élevage et des déchets ou produits agricoles pour une taille maximale de 500 kWe (ou équivalent en injection). De plus, les unités centralisées regroupent au sein d'une même catégorie des projets portés majoritairement par des agriculteurs et des projets portés majoritairement par des industriels ou des acteurs publics. En conséquence, certains projets de très grande taille faisant intervenir plusieurs industriels tombent dans la catégorie des unités centralisées et non pas dans celle des industriels. Par ailleurs, la catégorie industrielle regroupe des projets aussi divers qu'une unité portée par un papetier, un industriel de l'agroalimentaire ou une coopérative agricole. Enfin, la catégorie STEP, qui s'intéresse à la valorisation des boues de stations d'épuration, ne recense que les projets sur site, et non pas l'ensemble des projets qui mobilisent ce type de déchets. Dans le cas contraire, et notamment pour les projets les plus gros incluant une diversité de substrats dont des boues, les UM entrent dans la catégorie des unités centralisées. Les données fournies par l'ADEME (carte SINOE, consultée le 22 janvier 2020) permettent toutefois de proposer un aperçu de la situation (voir tableau 1).

8 En nous basant sur les valeurs du tableau 1, et en faisant l'hypothèse forte que l'ensemble des unités centralisées et la catégorie des "autres" sont en réalité toutes des unités agricoles.

9 Le BioGNV est du biométhane comprimé à 200 bars afin d'être utilisé comme carburant (Gaz naturel véhicule ou GVN).

Tableau 1 : Synthèse des informations de la carte SINOE (ADEME, 2020) [10]

Type d'UM	Nombre d'UM enregistrées dans la base SINOE	Nombre d'UM avec puissance ou débit renseignés	Puissance en kilowatt électrique (kWe) pour la cogénération (nombre d'unités)	Débit en Nanomètre cube par heure (Nm3/h) pour l'injection (nombre d'unités)
Centralisée	64	58	45936 (47)	2545 (11)
Déchets ménagers	15	10	17458 (10)	0 (0)
A la ferme	442	402	73764 (371)	3989 (31)
Industrielle	102	8	2242 (8)	0 (0)
STEP	72	18	4752 (17)	80 (1)
TOTAL	695	496	144 152 (453)	6614 (43)

Source : auteurs (données : SINOE, 2020)

Aux côtés de ces classifications adoptées par diverses institutions et administrations de la filière, d'autres typologies ont été proposées dans le cadre de travaux de recherche ou d'expertises. Ces typologies distinguent de manière plus fine les UM selon les choix qui ont présidé à leur création. Le Guen et Damiano (2013) identifient notamment cinq types d'UM selon les gisements de matières premières : des UM centralisées « industrielles » (traitement sophistiqué des intrants) ; des UM valorisant uniquement les déchets de collectivités ; des UM centralisées agricoles, potentiellement portées avec des collectivités ; des UM à la ferme utilisant du lisier d'élevage hors-sol ; et des UM à la ferme utilisant du fumier. Couturier (2013) propose quant à lui une classification selon le type de portage (entreprise agricole unique, groupement d'entreprises agricoles, entreprise agricole associée à un industriel, société de services, producteur de déchets et d'effluents) et la nature des matières premières (très majoritairement agricole ; mélange de matières agricoles et de l'industrie agro-alimentaire (IAA), de restauration et de grandes et moyennes surfaces ; mélange de matières issues notamment d'industries agroalimentaires, de matières d'intérêt agronomique issues du traitement des eaux et de biodéchets). Plus récemment, les chercheurs du programme MéthaLAE ont produit une typologie socio-économique selon la relation existante entre l'UM et les exploitations agricoles (ADEME et Solagro, 2018). Ce classement se fonde sur quatre critères : le lien juridique entre les deux entités (sont-elles séparées ou forment-elles une seule structure ?) ; le capital de l'UM (place des agriculteurs parmi les investisseurs) ; le gisement (apport de matières par les agriculteurs) ; et enfin le travail (qui fait fonctionner l'unité et sur quel aspect : administratif, technique ou logistique).

Ces typologies intègrent des variables essentielles caractérisant les UM en amont du processus de méthanisation, en particulier concernant les actionnaires des structures et la nature des gisements, qui constituent deux points clés de la forme des UM et des revenus que la méthanisation peut générer. De plus, l'analyse du programme MéthaLAE intègre les liens existants entre UM et exploitations agricoles à la fois sur le plan juridique et sur le plan de l'exploitation de l'UM

10 Le total n'inclut pas la catégorie "autre" qui compte 9 cas. Le recensement des unités de méthanisation opéré par l'ADEME indique donc l'existence de 704 unités de méthanisation en France au 22 janvier 2020 dont 442 sont à la ferme (UMA "individuelles") et une partie non déterminée des centralisées sont des UMA collectives.

(ADEME et Solagro, 2018), ce qui présente l'avantage de déplacer la focale vers les agriculteurs et la manière dont ils articulent leurs stratégies.

Cependant, la typologie selon le portage ne rend pas suffisamment compte des différentes stratégies qui peuvent exister au sein d'une même catégorie de porteurs (par exemple d'un agriculteur à l'autre, ou d'un groupe d'agriculteurs à un autre selon que les membres sont plutôt éleveurs ou céréaliers). De même, les typologies existantes laissent de côté plusieurs dimensions qui nous semblent importantes pour comprendre les formes qu'ont prises les UM existantes et celles vers lesquelles s'orientent les projets en cours. En particulier, il convient de s'intéresser aux relations entretenues par les porteurs de projet avec les autres acteurs du territoire : en amont via la provenance des intrants ; en aval via la valorisation choisie pour le biométhane et le digestat ; et plus généralement au regard des contraintes posées par la spécificité du territoire pour chaque projet. Notre démarche est donc de saisir les stratégies des agriculteurs pour se positionner vis-à-vis des autres acteurs, et notamment sur le plan économique à travers leurs stratégies de revenus.

Typologie des modèles de méthanisation : le rôle des stratégies et des motivations

En prenant pour variable d'entrée les caractéristiques des actionnaires majoritaires au capital, nous avons donc analysé les choix concernant le fonctionnement de l'unité en intégrant les variables suivantes : (i) la taille du projet (ii) les choix de valorisation du méthane (gaz, électricité, chaleur), (iii) la nature et la provenance des intrants valorisés, (iv) les contraintes et risques des projets, notamment vis-à-vis de l'usage et de la qualité du digestat, mais aussi les choix spécifiquement liés à l'insertion des agriculteurs dans ces projets : (v) les choix de positionnement de l'agriculteur dans le projet (simple apporteur de substrat, porteur principal du projet, membre d'un projet collectif porté par des agriculteurs ou des non agriculteurs, etc.), et (vi) les raisons pour lesquelles les agriculteurs s'insèrent dans les projets. C'est ce que propose la présente section en élaborant une manière originale de caractériser les formes d'UM, à partir de la lecture des choix stratégiques des acteurs de la méthanisation - notamment les agriculteurs - en termes de positionnement dans la filière et de stratégies de revenu, à partir d'un corpus d'entretiens original.

<u>Méthodologie et territoires enquêtés</u>

En l'absence de données individuelles à l'échelle nationale (aucune enquête statistique n'existe sur la diversification des revenus des agriculteurs par la méthanisation), et en raison du souhait d'obtenir des éléments non quantifiables sur les stratégies et motivations des agriculteurs, la méthode de cette recherche a reposé sur des entretiens semi-directifs réalisés auprès d'une cinquantaine d'agriculteurs-méthaniseurs et de quarante acteurs institutionnels (dans les régions Grand Est, Île-de-France, Nouvelle-Aquitaine et en Mayenne). La Figure 2 reprend les lieux d'enquête et le nombre d'agriculteurs enquêtés par région.

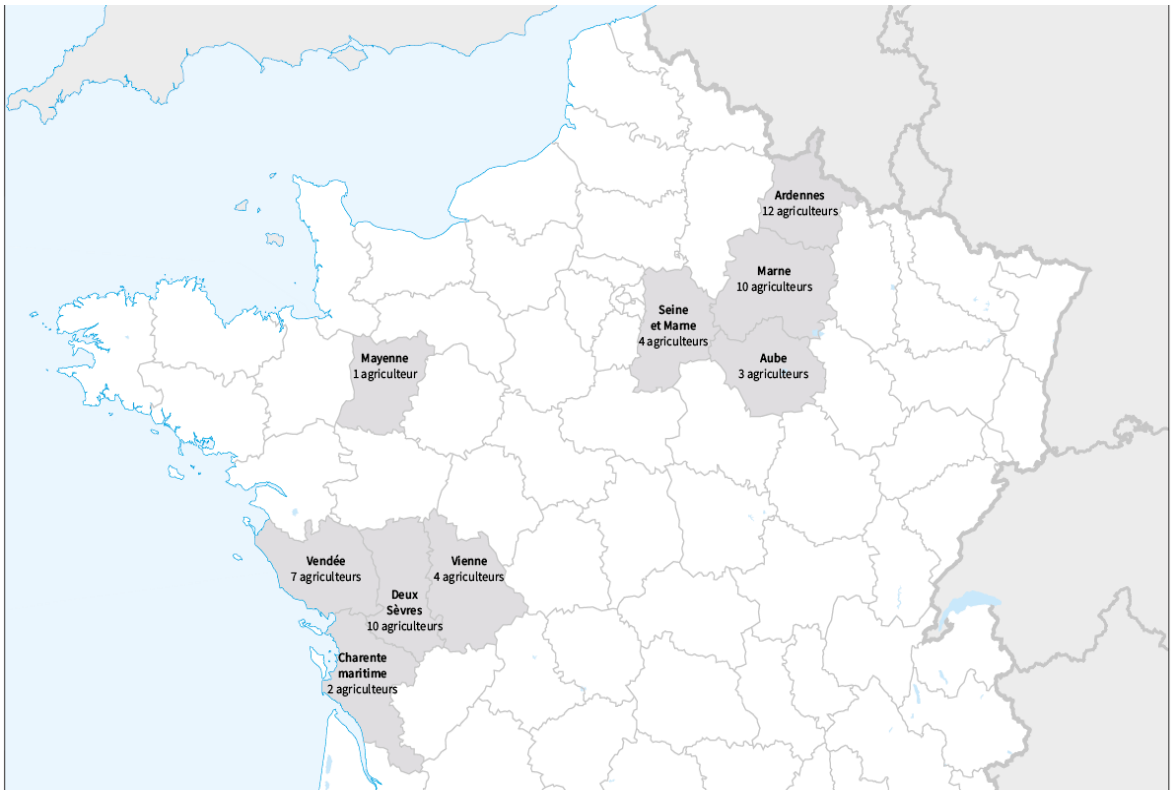


Figure 2 : Localisation des zones agricoles enquêtées

(Source : auteurs)

L'intérêt de cette méthode est de pouvoir identifier des éléments qualitatifs, et de ne pas se centrer uniquement sur des éléments mesurables, contrairement à ce qui est souvent fait en économie, même lorsque les éléments quantitatifs ne sont pas les plus centraux dans une problématique donnée (Akerlof, 2020).

Par ailleurs, l'article se centre sur la construction de typologies avec l'objectif final de pouvoir analyser l'avenir à long terme de la filière. En effet, ces typologies permettent de donner un substrat solide pour la méthode de prospective appliquée dans la troisième partie. Cette dernière consiste à élaborer des scénarios, à partir des évolutions de variables motrices afin d'ouvrir la réflexion sur la diversité des futurs que les changements à l'œuvre et les tendances repérables permettent d'imaginer (Poux, 2005). Ce type de prospective cherche à éviter de réduire les problèmes à un ensemble de thématiques traitées séparément pour privilégier, au contraire, l'étude des jeux d'acteurs et de leurs interactions. De plus, elle se focalise particulièrement sur le long terme afin de s'abstraire des phénomènes conjoncturels et d'envisager les dynamiques profondes et les transformations futures des systèmes étudiés (Jouvenel, 2004).

<u>Typologie des unités de méthanisation : les stratégies des agriculteurs au cœur de la problématique</u>

Pour souligner l'importance des choix stratégiques des acteurs de la méthanisation, et en particulier des agriculteurs en termes de positionnement dans la filière, nous proposons de présenter les stratégies en fonction d'une classification de l'ensemble des acteurs qui contrôlent ces UM, c'est-à-dire ceux qui ont apporté les ressources financières (capital social) à la société porteuse de l'UM. L'objectif est de pouvoir d'une part obtenir une typologie fondée sur des connaissances qualitatives et subjectives de la méthanisation agricole mais également de pouvoir situer les UMA vis-à-vis des autres formes d'unités de méthanisation. Ainsi, nous proposons les catégories suivantes :

- Les unités de méthanisation industrielle désignent les unités portées majoritairement (en termes de capital social de la société) par des industriels quel que soit le secteur d'activité (IAA, coopérative agricole, papeterie, assainissement). Elles regroupent donc la catégorie de l'ADEME dite "industrielle", "STEP", ainsi qu'une partie des UM centralisées et des "déchets ménagers".

- Les unités territoriales sont des unités majoritairement portées par des collectivités territoriales ou des structures publiques à l'échelle locale. Dans la catégorisation de l'ADEME il s'agit donc d'une partie des unités centralisées.

- Nous avons distingué deux catégories d'UMA, le critère principal étant toutefois toujours le même, à savoir que les agriculteurs doivent être majoritaires au capital social. Il s'agit, d'une part, des UMA dont le capital est détenu par une minorité de divers acteurs extérieurs au milieu agricole, et d'autre part, des UMA uniquement portées par des agriculteurs en individuel ou constituées autour d'un collectif d'agriculteurs.

- Enfin, nous avons introduit une catégorie spécifique pour les unités de type micro-méthanisation, en maintenant toujours le critère des caractéristiques des acteurs majoritaires au capital social (micro-méthanisation agricole et micro-méthanisation de particuliers). La micro-méthanisation doit être distinguée des UMA car : (i) son impact sur le territoire est extrêmement faible, (ii) elle ne nécessite pas de financements importants ce qui conduit à un actionnariat varié parfois agricole, parfois de particuliers. Ces deux éléments influencent la stratégie et les motivations des acteurs qui portent la micro-méthanisation, notamment parce que l'activité est en plus grande autarcie vis-à-vis des autres acteurs de la filière et nécessite moins de symbiose avec l'exploitation agricole dans le cas d'unités agricoles.

Le tableau 2 souligne que l'impact des caractéristiques de l'acteur majoritaire au capital social est loin d'être négligeable.

La taille. Les unités industrielles ont tendance à être plus grandes que celles portées par des agriculteurs. De même la présence d'une diversité d'acteurs au capital joue sur la taille, ce que le tableau 1 permettait déjà partiellement d'identifier.

La valorisation du biogaz. Bien que le choix entre cogénération et injection a longtemps été lié uniquement à des questions juridiques (i.e. le droit d'injection dans le réseau de gaz) et reste lié à des problématiques d'accès au réseau de gaz, le tableau met en évidence que l'alternative entre la production d'électricité ou l'injection constitue aussi un choix stratégique, qui dépend de la motivation principale des porteurs de projets (cf. Encadré 1). Pour les industriels, il s'agit avant tout d'assurer le meilleur rendement énergétique, dans une logique proche du modèle d'énergiculteur. Le choix se porte essentiellement sur l'injection, à l'exception des papetiers qui cherchent à valoriser la chaleur pour sécher le papier. De même, pour les agriculteurs ou les collectivités, la question relève d'un arbitrage entre production de gaz et éventuelle production jointe de chaleur qui pourrait être utilisée sur l'exploitation agricole.

Type d'UM/ Caractéristiques	Industrielle	Territoriale (projet de collectivités pouvant inclure des agriculteurs minoritaires)	Méthanisation agricole avec participation extérieures, dans laquelle les agriculteurs sont majoritaires au capital	Méthanisation d'agriculteurs uniquement en collectif ou individuel	Micro-métha. agricole	Micro-métha. individuelle
Caractéristique du porteur de projet	Industriel (Veolia, Fonroche) majoritaire au capital	Collectivité territoriale, société mixte.	Cas courant : UMA portée par un collectif d'agri. avec un industriel (Veolia, Sanders…) ou une coopérative dans une volonté de valorisation de leurs déchets (boues, issues de céréales, sous-produits animaux (SPAn), etc.)., et non dans une volonté d'investissement.	Eleveurs, céréaliers, collectif d'éleveurs, collectif de céréaliers ou collectif mixte	Le plus souvent éleveurs	Particulier
Taille	Très importante, généralement supérieure à 10 MWe	Très variée mais souvent > à 1 MWe.	Le plus souvent supérieur à 500 kWe	De 100 kWe à 3 MWe (selon porteur de projet - éleveur, céréalier, collectif - et type de valorisation)	<50 kWe	<50 kWe
Type de valorisation du méthane	Injection majoritairement et dans le réseau de transport	Injection ou cogénération en fonction de l'accès au réseau et de la taille du projet	Injection ou cogénération en fonction de l'accès au réseau, de la taille du projet et des spécificités des porteurs du projet.	Injection ou cogénération en fonction de l'accès au réseau ; taille du projet ; spécificités des porteurs.	Plutôt co-génération	Plutôt co-génération
Nature des intrants valorisés	Boues de stations d'épuration (Veolia, Fonroche, etc.)	Déchets verts, déchets de cantine.	Déchets agricoles (effluents, menue paille), d'agro-industriels (SPAn, épluchure…), de coopératives (issues de céréales), CIVE, culture dédiée.	Déchets agricoles (effluents, menue paille), d'agro-industriels (SPAn, épluchure…), de coopératives (issues de céréales), CIVE, culture dédiée.	Le plus souvent fumier ou lisier	Déchets ménagers.
Contraintes spécifiques et risques	Taille du réseau de transport limitée	Prise de décisions ; rejet par le voisinage et accès au réseau de gaz quand souhait de l'injection.	Prise de pouvoir des non-agricoles dans l'organisation du projet (perte de l'objectif initial de diversification) ; NIMBY ; accès au réseau de gaz quand souhait de l'injection.	Accès au financement ; définition de la taille du groupe ; risque de rejet du projet d'UM si trop proche de l'habitat.	Idem	N.D.
Contraintes liées au digestat	Plan d'épandage et qualité du digestat	Plan d'épandage et plus rarement qualité du digestat	Risque de qualité du digestat pour les déchets non agricoles (présence de plastique, de métaux lourds, etc.)	Risque concernant le retour au sol du carbone.	Retour au sol du carbone	Valorisation du digestat

Tableau 2 : diversité des formes d'unité de méthanisation en France et caractéristiques

Source : auteurs

La nature des intrants. Le fait de ne pas avoir choisi la même clé d'entrée que celle de l'ADEME - qui raisonne essentiellement en termes de substrat - nous a permis de mettre en évidence que toutes les unités, y compris agricoles, sont en capacité de mobiliser une très grande variété d'intrants. Même si la réglementation contraint les UMAs (au moins 60% d'effluents d'élevage ou de déchets agricoles pour bénéficier de tarifs de rachat préférentiels), la spécialisation dans un substrat est relativement rare. Les industriels peuvent mobiliser des substrats d'origine agricole, tout comme les agriculteurs peuvent utiliser des déchets de l'agroalimentaire, dans des proportions qui dépendent de leurs motivations à produire du biogaz. L'enjeu reste la question de l'usage des boues de station d'épuration et leur influence sur les sols, mais le débat est à relativiser puisqu'elles entrent déjà dans des plans d'épandage agricole à l'état brut.

Contraintes et risques. Pour les industriels, les contraintes portent essentiellement sur l'accès au réseau de transport ou de distribution du gaz (du fait de leur taille). Pour les agriculteurs, il s'agit surtout de l'accès au financement des projets. Le risque d'une prise de pouvoir des acteurs extérieurs est aussi non négligeable pour les agriculteurs car elle pourrait venir dénaturer les projets (voir section 3). Par ailleurs, le fait que certains agriculteurs aient d'ores et déjà choisi de se positionner dans la filière de la méthanisation en tant que simples apporteurs de matière rappelle que l'industrialisation de cette filière risque de conduire les agriculteurs à renoncer au statut de porteurs de projet et aux potentielles plus-values qui vont avec. Ceci est d'autant plus vrai que l'insertion de l'UM dans un projet agricole ou de territoire accentue les risques d'effet *NIMBY* (voir Bourdin et al. 2019), que les industriels pourraient gérer *via* des projets certes plus imposants mais aussi plus éloignés des habitations.

Contrainte du digestat. C'est sans aucun doute l'élément qui pourrait s'avérer salvateur pour le positionnement des agriculteurs dans cette filière. En effet, le digestat - et son statut de déchet - oblige son détenteur à chercher par lui-même les conditions de sa valorisation. L'épandage est actuellement l'un des principaux moyens d'y parvenir, l'autre étant l'incinération de ce déchet. Or, sur ce point l'agriculteur dispose d'un véritable pouvoir de négociation. Ses exigences de qualité peuvent lui permettre d'imposer certaines conditions d'exploitation d'une UM, notamment en termes de substrats utilisés. Toutefois, pour s'assurer que ce pouvoir est réel, il importe que la commercialisation du digestat ne soit pas possible pour n'importe quel type de digestat, mais uniquement pour ceux utilisant des substrats sans risque pour les sols. Le souhait de certains agriculteurs de demander la levée du statut de déchet pour le digestat pour mieux le valoriser pourrait s'avérer contre-productif.

Dans le cas spécifique des UMA, il est nécessaire de considérer le fait que l'agriculteur, en tant qu'acteur d'une unité, prend également position concernant la manière dont son exploitation agricole s'insère dans l'unité. Cette insertion s'appuie sur deux dimensions : le rôle de l'agriculteur dans l'unité (de simple apporteur de substrat à actionnaire unique du projet) et la manière dont il articule cette nouvelle activité avec celle d'origine dans la filière agricole. Le positionnement actuel des agriculteurs parmi l'éventail de stratégies possibles souligne le fait que nous sommes peut-être déjà au milieu du gué en ce qui concerne le glissement vers des modèles d'UM françaises non agricoles dans lesquels l'agriculteur est un simple fournisseur de substrats.

Enfin, la motivation des agriculteurs pour la mise en place des unités de méthanisation est aussi à prendre en compte pour comprendre la façon dont se construit la filière. On peut sur ce point décrire deux idéaux-types, qu'il faut comprendre comme des modèles caricaturaux entre lesquels les unités de méthanisation de type agricole se situent : le soutien de l'activité agricole, ou la volonté de création d'une activité d'énergiculteur. L'encadré 1 propose d'en donner les définitions.

Encadré 1 : Les motivations des agriculteurs, deux modèles possibles

Logique "Soutien à l'exploitation agricole" : La volonté de la mise en place de la méthanisation est de permettre le maintien de l'exploitation agricole, ou tout du moins de soutenir cette activité, face aux difficultés rencontrées dans la filière agricole. Bien que les financeurs - banques et institutions publiques pourvoyant des subventions à l'investissement - réfutent l'idée que la méthanisation puisse apporter une solution aux difficultés financières des agriculteurs, ces derniers sont nombreux à envisager cette nouvelle activité comme un moyen de stabiliser leurs revenus à long terme. Une part importante des UM enquêtées a été mise en place dans un contexte de forte fluctuation des prix des céréales, du lait et de la viande, et certains agriculteurs expriment clairement le fait que la méthanisation a été pensée comme une activité de diversification et une alternative aux difficultés rencontrées dans leurs filières agricoles.

Logique "Énergiculteur (business unit)" : La volonté première de la méthanisation est pour les agriculteurs de développer une nouvelle activité, sans lien avec la filière agricole d'origine. Dans cette configuration, les exploitations agricoles ont été réorganisées en amont du projet d'UMA, afin de pourvoir une partie des intrants et de dégager davantage de temps dédié au fonctionnement de la méthanisation. Les agriculteurs inscrits dans cette logique sont en général intégrés dans les associations et réseaux à l'image de l'AAMF ou du Club Biogaz. Cela ne signifie évidemment pas qu'ils quittent leur(s) filière(s) agricole(s) mais plutôt que les contours des entreprises qu'ils dirigent (agricoles ou de méthanisation) sont pensés avant tout dans une logique d'insertion dans la filière "méthanisation". Cette logique peut également être poursuivie par des acteurs *non agricoles porteurs de projets d'UM.*

Typologie des unités de méthanisation : la place des revenus

Un autre angle d'analyse de la méthanisation est possible en s'appuyant davantage sur une stratégie spécifique, celle liée à l'optimisation du revenu de la méthanisation. Nous proposons de mener cette analyse dans le cadre spécifique des UMA en nous intéressant aux objectifs de l'agriculteur et à ses choix d'organisation de la production de biogaz. À partir de nos enquêtes, nous avons évalué les revenus générés pour 25 UMA en France. Nous avons cherché à établir le montant du "revenu" généré par la méthanisation agricole. Pour ce faire, nous avons élaboré une méthodologie de calcul afin de pouvoir comparer au mieux les revenus entre UMA, ce que ne permettent pas les bilans comptables qui isolent rarement l'activité de méthanisation. Nous avons cherché à établir un montant se rapprochant d'un revenu au sens d'une ressource disponible pour un agent économique du fait de son activité (revenu du travail) ou de sa propriété (revenu du capital), mais également en tenant compte de ses revenus de transfert (subventions). Nous avons exclu tous produits et charges exceptionnels. Au sens comptable, on se rapproche donc de la notion de "résultat courant" de l'activité de méthanisation. Il ne s'agit toutefois pas d'un résultat courant à proprement parler puisqu'il ne prend en compte ni les produits financiers, ni les charges liées à la dotation aux amortissements. L'indicateur ainsi obtenu est qualifié de "revenu courant", calculé "avant impôt", et est donc dénommé Revenu Courant Avant Impôt (RCAI).

Afin de neutraliser l'effet taille de l'UM, qui mécaniquement conduit à de grandes variétés des RCAI entre les UM, nous avons rapporté ce RCAI à la puissance théorique de l'UM évaluée en kWe (en multipliant par 4 les puissances théoriques évaluées en Nm3 des unités en injection).

Nous obtenons ainsi un revenu dont l'indicateur est le rapport entre le résultat courant (avant impôt) et la puissance de l'UM exprimée en kWe (RCAI/kWe). Avec cette méthode, nous isolons quatre stratégies possibles en matière de revenus.

Il s'agit des modèles 1) Internalisation et symbiose ; 2) Petit collectif d'agriculteurs ; 3) Céréalier en injection ; 4) Externalisation partielle et technologie générique. Chacun de ces modèles reflète à la fois la trajectoire économique des UMA (très ou faiblement bénéficiaires, voire déficitaires en termes de revenu dégagé par l'activité) et le contexte institutionnel dans lequel cette trajectoire économique se dessine. Les modèles de stratégie de revenu proposés ici doivent être considérés comme des sortes d'idéaux-types à partir desquels il est possible de positionner les projets sur un continuum allant de l'éleveur disposant d'une UM "à la ferme" en cogénération au seul céréalier disposant d'une UM "à la ferme" en injection, en passant par des configurations diverses du collectif d'agriculteurs ou de collectifs impliquant agriculteurs et actionnaires non-agricoles.

1) Le modèle de type "internalisation et symbiose" rassemble des UM qui génèrent un RCAI/kWe compris entre 580 euros et 850 euros. Leur UM repose sur une logique de "système D" dans le sens où les agriculteurs éleveurs en GAEC, souvent seuls, cherchent à maîtriser au maximum le coût de la maintenance en l'internalisant. Privilégiant une "petite maintenance en totale autonomie", sans intervenant extérieur, ils utilisent peu de main d'œuvre salariée. Cela se répercute sur leur temps de travail personnel et les conduit souvent à pousser davantage leur spécialisation productive agricole - en abandonnant par exemple l'élevage laitier ou l'engraissement - lors de l'investissement dans le méthaniseur. Enfin, ils réduisent au maximum le coût de leurs substrats en privilégiant l'usage de leurs propres effluents d'élevage (ou ceux de leurs voisins sur la base d'un échange informel de type effluents contre digestat). Certains sont ainsi entièrement autosuffisants pour leurs intrants en effluents, ensilage d'herbe et de maïs, et le dimensionnement de l'UM a précisément été pensé pour garantir cette autonomie. Ce premier modèle repose majoritairement sur des unités en cogénération de première génération (investissement avant 2015), ayant pu bénéficier d'importantes subventions publiques. La cogénération est souvent un choix délibéré (la valorisation de la chaleur est le plus souvent intégrée dans l'équation ayant conduit l'agriculteur à investir dans la méthanisation), plus rarement subi (du fait de l'absence de réseau ou de l'ancienneté du projet qui a été pensé avant le décret permettant l'injection dans le réseau de gaz[11]).

2) Nous qualifions le deuxième modèle d'UM de type petit collectif d'agriculteurs. Le collectif est constitué d'un groupe d'agriculteurs céréaliers et d'éleveurs, ce qui peut parfois les conduire à repenser le fonctionnement de leurs exploitations comme un projet collectif en lui-même (création d'un groupement d'employeurs, travail collectif pour les moissons, mise en place d'une CUMA, etc.). Ces UMA de type petit collectif d'agriculteurs génèrent un RCAI/kWe compris entre 450 euros et 650 euros. Dans ce modèle, l'investissement est plus récent. Il est aussi plus lourd, notamment en lien avec la professionnalisation de la filière de la construction (du fait des coûts de terrassement et de la présence quasi systématique de bureaux d'études, d'assistants à maîtres d'ouvrage, etc.) alors que les subventions perçues sont plus faibles que dans le modèle précédemment présenté. En conséquence, la charge de la dette pèse davantage sur le RCAI. Dans le fonctionnement de l'UM, le travail rémunéré est plus présent que dans le modèle "internalisation et symbiose", notamment parce que le projet est plus collectif. Parfois, la rémunération prend la forme d'une gratification pour l'un ou plusieurs des associés, de l'ordre de quelques milliers d'euros par an et par personne, souvent en deçà de la rémunération salariale. Ce modèle peut être créateur d'emploi salarié lorsque la partie méthanisation n'est pas gérée par l'un des associés. Enfin, la part plus importante des substrats achetés (généralement auprès des coopératives et plus rarement d'agroindustriels) vient peser davantage dans les charges.

11 Décret n°2011-1594 du 21 novembre 2011 relatif aux conditions de vente du biométhane aux fournisseurs de gaz naturel.

Dans ce modèle, tout est facturé car l'UMA est presque toujours séparée juridiquement des entités agricoles, même lorsqu'il s'agit formellement d'un échange entre l'UMA et un agriculteur membre du collectif (pour l'achat des CIVEs, le coût d'épandage (i.e, forme de "vente" du digestat). Techniquement parlant, il peut s'agir d'UMA en injection ou en cogénération. Le choix de la cogénération tient parfois d'une contrainte technique (absence de réseau), mais aussi d'un choix délibéré lié à la volonté de valoriser la chaleur.

3) Nous qualifions le troisième modèle d'UM de type céréalier en injection. C'est un modèle basé sur la technique de l'injection, plutôt individuel ou fonctionnant sur la base d'un tout petit collectif porté par un céréalier détenant la majorité du capital et pouvant inclure des éleveurs. Dans ce modèle, l'UM est presque systématiquement séparée de l'exploitation agricole sur le plan juridique. Cela génère des coûts d'achat de substrats très importants mais qui, en réalité, viennent rémunérer l'exploitant céréalier lui-même. En effet, une part importante des intrants est constituée de CIVEs et plus rarement de cultures dédiées. Cette part des CIVEs et/ou des cultures dédiées tend à augmenter dans les exploitations associées à ce type d'UM. En conséquence, le RCAI/kWe dégagé est plus faible qu'il ne pourrait paraître et est situé entre 400 euros et 800 euros par an et par kWe. La forte variation du RCAI/kWe constatée au sein de cette catégorie d'UM s'explique par des choix très variés de facturation des coûts directs et indirects de la méthanisation (achat de CIVEs auprès des exploitations versus facturation de l'ensilage à l'UM sans facturation des CIVES à proprement parler, vente de digestat par l'UM versus facturation de l'épandage à l'UM, etc.). Par ailleurs, les UM complètent le plus souvent leurs besoins en intrants *via* des accords auprès de leurs coopératives (pour les issues de céréales très méthanogènes notamment) et des agroindustriels. De nouvelles stratégies d'approvisionnement semblent aujourd'hui émerger avec la mise en place, par certains agriculteurs, d'une filière de gestion des biodéchets du fait de leur forte préoccupation portant sur la qualité de ce type d'intrants (problématique de la qualité du digestat issu des biodéchets). Ce modèle est presque toujours créateur d'emploi salarié - souvent issu du monde industriel - ce qui augmente la masse salariale plus significativement que dans le modèle précédent car le travail, plus qualifié, y est mieux rémunéré. En contrepartie, les associés consacrent moins de temps à l'UM et se spécialisent dans la gestion administrative du projet.

4) Le dernier modèle observé peut être qualifié d'UM de type "externalisation partielle et technologie générique". Les UM sont constituées d'agriculteurs souvent seuls ou en tout petit collectif, éleveurs pour la plupart, ayant investi plus tardivement dans la méthanisation (après 2015). Le RCAI par kWe est compris entre - 511 euros et + 80 euros. Le coût de l'investissement est plus élevé que dans le modèle internalisation et symbiose (en raison d'un plus grand nombre d'acteurs et de métiers intervenant dans la construction des méthaniseurs, laquelle implique désormais des assistants à maîtres d'ouvrage, des maîtres d'œuvre, des cabinets de conseils, etc.). Parallèlement, l'arrivée de nouveaux "constructeurs" a réduit la fiabilité de la technologie : plusieurs cas de constructeurs ayant fait faillite ont été observés notamment dans l'ouest de la France ainsi que des casses du matériel du fait d'une inadaptation de la technique aux caractéristiques des substrats. D'autres agriculteurs ayant un RCAI faible témoignent de problèmes de surdimensionnement initial du moteur de l'UM par rapport au gisement disponible, attribué au bureau d'étude. En conséquence, les coûts de maintenance sont plus élevés. Dans le cas de petits collectifs, le choix d'employer de la main d'œuvre salariée permet certes de créer des emplois, mais génère des coûts supplémentaires parfois difficiles à supporter pour des tailles d'UM relativement modestes (autour de 200 kWe). Parallèlement, la baisse des subventions conduit à une augmentation de la charge de la dette. Enfin, la volonté d'une partie des agriculteurs appartenant à ce groupe d'optimiser le pouvoir méthanogène des substrats les conduits à inclure davantage d'intrants achetés auprès de leurs coopératives (issues de céréales) et d'agroindustriels. Globalement, ce dernier modèle combine les défauts des modèles céréaliers en injection et petit collectif d'agriculteurs (coût élevé des substrats, masse salariale élevée, investissement

lourd) sans les avantages du modèle internalisation et symbiose (faible dépendance aux intrants, faible coût de la maintenance).

Notons que ces 4 modèles restent représentatifs de notre échantillon d'enquêtés et non de la méthanisation agricole en France, ni de l'ensemble de la méthanisation française (agricole et non agricole). Notre enquête ne nous a notamment pas permis d'interroger des agriculteurs ayant investi dans des UM de type micro-méthanisation[12], ni de type mandataire (regroupant plusieurs dizaines d'agriculteurs déléguant l'ensemble de l'activité à un gérant extérieur et se contentant d'apporter des substrats). Enfin, comme nous l'avons déjà souligné, cette typologie n'inclut pas les agriculteurs qui se positionnent en tant que simples fournisseurs sans prendre part - de près ou de loin - à l'organisation productive de l'UM, que cette dernière soit agricole ou non-agricole. Cette typologie apporte cependant un éclairage nécessaire sur les causes de la diversité actuelle des UM, et pose une base solide pour penser l'avenir de la filière.

La méthanisation en France : quel avenir pour la filière ?

La filière de la méthanisation se distingue aujourd'hui par une diversité d'UM que l'on peut caractériser en fonction de leurs stratégies d'insertion dans la filière et des relations que chacun des autres acteurs entretient avec ceux qui restent aujourd'hui les acteurs clés de cette filière naissante, à savoir les agriculteurs. Pour penser l'avenir de la filière, il nous reste à saisir quels types d'unité de méthanisation pourraient se développer et conserver une position importante dans la filière.

<u>Professionnalisation et évolution des soutiens publics : un risque d'uniformisation ?</u>

Les tendances observées sont celles d'un recours grandissant au procédé de méthanisation par voie d'injection. Or, sur le plan économique, l'injection nécessite un investissement plus élevé que pour la cogénération (d'après nos enquêtes, en moyenne 4,8 millions d'euros pour l'injection contre 1,9 million pour la cogénération, l'écart s'expliquant à la fois par les différences de puissance et le coût de la station de la purification du gaz). Par conséquent, ces investissements sont plus lourds à supporter pour des éleveurs inscrits dans des filières en difficulté (Antoine *et al.*, 2015 ; Lambaré *et al.*, 2018 ; Perrot *et al.*, 2018). Au regard de la situation générale de ces filières, les producteurs céréaliers tendent à être considérés comme plus solvables par les financeurs pour faire aboutir un projet. Ensuite, sur le plan biologique, les matières végétales comme les céréales ont un pouvoir méthanogène plus important que les déjections animales (ADEME, 2019). Elles sont donc très intéressantes même si elles ne donnent pas droit à une prime spécifique pour le rachat de l'énergie, ce qui explique l'implication croissante de céréaliers dans la production de biogaz.

Par ailleurs, les UM en injection sont souvent de taille plus grande que celles en cogénération et nécessitent un tonnage plus important en substrats. À partir de 300 kWe, les installations situées sur une commune desservie par un réseau public de gaz naturel adéquat pour l'injection ne peuvent pas bénéficier d'un contrat d'obligation d'achat d'électricité sauf avis contraire du préfet de région[13]. Cette réglementation rend de fait obligatoire le procédé d'injection pour les grands projets qui pourraient pourtant avoir aussi leur sens en cogénération (par exemple, parce que la chaleur fait partie des produits-joints recherchés), et ce indépendamment de l'état du réseau de gaz.

Ce seuil, nécessitant environ 10 à 15 000 tonnes/an de substrats (selon leur nature et leur pouvoir méthanogène), rend difficile la mise en place de ce type de projets par des éleveurs. De plus,

12 Nous avons rencontré un seul cas d'UMA d'une puissance de 50 kWe.

13 Arrêté du 13 décembre 2016 sur les conditions d'achat pour l'électricité produite par les installations de méthanisation, article 4 (version du 12 septembre 2019).

même s'ils y arrivent, les éleveurs seuls ont davantage besoin de se constituer en collectif de plus grande taille pour atteindre le seuil critique et les conditions requises pour l'investissement, - du fait des fragilités énoncées précédemment - que ce n'est le cas pour les collectifs de céréaliers associant parfois un ou deux éleveurs. Or, la taille des collectifs d'agriculteurs semble influencer la vitesse de concrétisation des projets et leur réel aboutissement. D'après nos entretiens, les projets portés individuellement ou à 3-4 agriculteurs voient le jour plus facilement que ceux portés par de très grands collectifs (7-8 et parfois jusqu'à 20-30 agriculteurs) ou par des collectifs associant des collectivités territoriales.

En somme, en ce qui concerne la technologie par injection, deux des quatre modèles présentés dans la partie 2 constituent l'essentiel de l'échantillon observé. D'une part le petit collectif d'agriculteurs associant des céréaliers et des éleveurs, d'autre part le modèle céréalier en injection.

Dans la mesure où les UMA dont les céréaliers sont majoritaires, voire exclusifs au capital, et seraient potentiellement les mieux positionnés pour réaliser l'investissement nécessaire à l'injection, la dynamique observée à l'avenir pourrait être la suivante :

- Le soutien public actuel se traduit en partie dans les faits par un support à l'industrialisation légère des territoires ruraux et à leur développement économique. En l'absence de subventions publiques, il est fort probable que la méthanisation ne devienne accessible que pour un nombre limité de céréaliers, les plus solides financièrement et écartant définitivement les agriculteurs-éleveurs.
- La fluctuation des prix observée aujourd'hui dans le marché des biomasses et des biodéchets et la concurrence des "industriels-méthaniseurs" pourrait conduire, dans un premier temps, les agriculteurs-méthaniseurs français à renforcer l'usage de CIVEs.

Or, une vigilance paraît nécessaire, car accroître leur place dans l'approvisionnement contribuerait à accentuer les tensions entre les différentes missions attribuées à l'agriculture (alimentaire et énergétique). De plus, même si elles apparaissent comme une variable d'ajustement bienvenue face au risque de hausse des prix des substrats, les CIVEs impliquent une modification des rotations de cultures, ce qui se traduit par un impact sur l'ensemble de l'itinéraire technique, en particulier en ce qui concerne le labour (lorsqu'il est pratiqué) et les apports d'intrants. Cela pourrait directement modifier le rapport entre le carbone exporté par le procédé de méthanisation et celui ramené au sol par le digestat.

Quelle place pour les agriculteurs à terme dans la méthanisation ?

Face à cette évolution, les agriculteurs disposant de substrats à plus faible pouvoir méthanogène, notamment les éleveurs, pourraient devenir de simples fournisseurs auprès d'unités de méthanisation agricoles et/ou non agricoles. Paradoxalement, cela pourrait dans un premier temps contribuer au développement de la méthanisation non agricole, qui pourrait compléter ses besoins en substrats liés au traitement de divers déchets par ceux à plus faible pouvoir méthanogène issus de l'élevage, mais leur permettant de bénéficier d'économies d'échelle.

Ainsi, les acteurs de la méthanisation non-agricole (notamment les industriels) investissent déjà dans des projets de très grande envergure, valorisant jusqu'à 100 000 tonnes de déchets. Pour satisfaire un tel tonnage, certains projets qui sortiront de terre d'ici un à deux ans prévoient d'associer des déchets issus de l'industrie agroalimentaire (par exemple des broyats de maïs et autres issues de cultures) avec du lisier de porcs, de canards et de bovins. L'une des grandes forces de la méthanisation non agricole réside probablement dans sa capacité à lever les fonds nécessaires à de tels investissements. Si de véritables économies d'échelle et de gamme sont effectives dans la méthanisation - ce qui n'a pas encore été démontré - ces acteurs non agricoles seront les mieux positionnés à l'avenir dans la filière "méthanisation" car ils pourront non seulement financer des projets de très grande taille, mais en plus bénéficier des économies de gamme liées aux bénéfices d'assurer simultanément le traitement des déchets (souvent coûteux dans ces filières agroindustrielles et de traitement des eaux) et la production d'énergie

"verte". À cela, pourraient être associées les éventuelles réductions de "coûts de transaction" liées au choix d'internalisation de l'activité de traitement de déchets jusqu'alors sous-traitée.

En conséquence, le segment des producteurs de méthane est en plein changement et les agriculteurs pourraient rapidement faire face à une concurrence d'UM industrielles dans la filière. Dès lors, il ne serait plus possible d'étudier uniquement la méthanisation agricole dans son acception large comme fait ici, mais il faudrait regarder de la même manière le jeu de chacun des acteurs futurs possibles de la filière. Ce travail, qui est à faire, dépendra profondément des mutations de la méthanisation dans les toutes prochaines années.

Conclusion

Dans cet article, nous avons montré que la méthanisation en France ne se structurait pas autour d'une seule forme d'UM. Source d'énergie renouvelable, gaz ou électricité, prometteuse pour le mix énergétique français, la méthanisation ne peut donc pas être analysée comme un tout homogène. L'article met en évidence le fait que les typologies existantes dans la littérature scientifique des unités ne permettent pas d'analyser finement les décisions des acteurs de cette filière, ni d'entrer dans la description de sa dynamique, ni de proposer une prospective par scenario. Sur ce point, nous montrons qu'en nous centrant sur les stratégies des acteurs, et en particulier celles des agriculteurs, il est possible de comprendre comment ceux-ci pourraient s'adapter au changement du cadrage politique et à l'arrivée de nouveaux intervenants.

Pour ce faire, l'article s'est appuyé sur l'analyse des stratégies des porteurs des unités en fonction des différentes structurations possibles. Par ailleurs, nous nous sommes spécifiquement appuyés sur l'analyse des stratégies des agriculteurs afin de déterminer s'ils mettent en place l'unité principalement pour soutenir l'activité de l'exploitation agricole ou pour d'autres motivations. Ainsi, concernant les UMA nous avons analysé la comptabilité de 25 UMA et avons dégagé quatre stratégies de revenu possibles : 1) Internalisation et symbiose ; 2) Petit collectif d'agriculteurs ; 3) Céréalier en injection ; 4) Externalisation partielle et technologie générique. Ces deux typologies (l'une fondée sur les motivations des acteurs de la méthanisation, l'autre plus spécifiquement sur le revenu qu'en dégagent les agriculteurs) soulignent que la dynamique de la filière semble aller vers le renforcement de la méthanisation agricole portée par les céréaliers et par l'émergence de nouveaux acteurs portant une méthanisation de type industriel. Dès lors, il faudra savoir si ce modèle de développement de la filière répond aux multiples enjeux que l'on identifie par une lecture multiscalaire de la problématique de la méthanisation (voir figure 1) en matière de maintien de l'agriculture, de gestions des déchets, de verdissement du mix énergétique et de développement territorial.

D'un point de vue des politiques publiques, face à la diversité des types d'UM et à leurs avantages et inconvénients potentiels différents, se pose la question des unités à soutenir, notamment parmi les unités agricoles (entre celle de faible puissance portée par un éleveur et celle de grande puissance portée par un céréalier) et face à elles, les UM industrielles de très grande puissance portées par des géants de la gestion des déchets et de l'agro-industrie. Un autre modèle possible de développement de la filière pourrait être étudié, celui s'appuyant sur le maintien d'une diversité d'unités de méthanisation, les plus adaptées à chaque territoire et à ses problématiques. Deux questions de politiques publiques restent alors complètement ouvertes : comment maintenir des modèles de méthanisation moins compétitifs d'un point de vue financier dans le contexte d'une diminution des aides au développement de la filière ? Comment une politique publique, plutôt que d'inciter à l'unification des modèles d'unités, en soutenant certaines formes, peut-elle au contraire être un terreau pour la diversité au sein de l'écosystème des entreprises de la méthanisation ?

Remerciements :
Les auteurs souhaitent remercier le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation à travers le projet Métha'Revenus retenu dans le cadre de l'appel à projet de recherche « Le revenu des agriculteurs : mesures, déterminants et instruments d'accompagnement » lancé en 2018, et l'APESA pour leurs soutiens financiers. Les travaux réalisés dans le cadre du projet Métha'Revenus ont fait l'objet d'un rapport de recherche[14]. Les auteurs remercient également Louis Dupuy, Martino Nieddu et l'ensemble des membres du projet BIOCA, Léa Molinié, Mickaël Hugonnet et Alice L'Hostis pour leurs précieux conseils.

Références

ADEME, 2020. Base de données SINOE, accessible en ligne, Consultée le 22 janvier 2020.
ADEME, 2019. *Réaliser une unité de méthanisation à la ferme. Projets de moins de 500 kWé ou de 125 Nm3/h*. Rapport de l'ADEME, 40 p.
ADEME, 2018. *Agriculture et énergies renouvelables : contributions et opportunités pour les exploitations agricoles*. Rapport final de mission, 205 p.
ADEME, 2017. *Méthanisation : Feuille de Route Stratégique*, 40 p.
ADEME et Solagro, 2018. *La méthanisation, levier de l'agroécologie*. Synthèse des résultats du programme MéthaLAE, 14 p.
Akerlof, G. A. (2020). Sins of Omission and the Practice of Economics. *Journal of Economic Literature*, *58*(2), 405–418.
Antoine E., Roussillon M.-Al., Legendre V. et Rieu M., 2015. Les contrats de commercialisation des animaux en France. Une réponse à la variabilité du prix du porc ? *Économie rurale* 345, pp.53-72.
Béline F, Peu P., Dabert P., Trémier A., Le Guen G. et Damiano A., 2013. La méthanisation en milieu rural et ses perspectives de développement en France. *Sciences, Eaux & Territoires* vol.3, n°12, pp.6-13.
Berthe A., Grouiez P. et Dupuy L., 2018. Les 'upgradings stratégiques' des firmes subordonnées dans les CGV : le cas des éleveurs investissant dans des unités de méthanisation. *Revue d'Économie Industrielle* n°163, pp.187-227.
Bourdin S., Fabien N. et Raulin F., 2019. Les collectivités locales comme acteurs intermédiaires de la territorialisation de la transition énergétique : l'exemple de la méthanisation. *Géographie, économie, société* n°4 (Vol. 21), pp. 273-293.
Couturier C., 2013. Méthanisation agricole : quelle rentabilité selon les projets ? *Sciences Eaux & Territoires* 12/3, pp.72-77.
Daniel-Gromke J., Rensberg N., Denysenko V., Stinner W., Schmalfuß T., Scheftelowitz M., Nelles M., et Liebetrau J., 2018. Current Developments in Production and Utilization of Biogas and Biomethane in Germany. *Review Chemie Ingenieur Technik*, 90, No. 1–2, pp. 17-35.
FNR, 2017. *Bioenergy in Germany: Facts and Figures*, 27 p.
Jouvenel H., 2004. *Invitation à la prospective - An Invitation to Foresight*, Édition futuribles.
Lamarche T., Grouiez P., Nieddu M., Chanteau J.-P., Labrousse A., Michel S. et Vercueil J., 2020. Saisir les processus méso : une approche régulationniste. *Revue économie appliquée*, à paraître.
Lambaré P., Dervillé M. et You G., 2018. Quelles conditions d'accès au marché des éleveurs après les quotas laitiers ? *Économie rurale* 2/364, pp.55-71.
Le Guen G. et Damiano A., 2013. Le développement de la méthanisation dans l'Ouest de la France", *Sciences Eaux & Territoires* 12/3, pp.30-33.
Lévy J., 2003. *Territoire*, in Lévy J. et Lussault M., Dictionnaire de la géographie et de l'espace des sociétés, Paris, Belin, pp.907-910.
OFATE, 2018. Le biogaz en Allemagne État des lieux : août 2018, 5 p.
Perrot C., Chatellier V., Gouin, D.-M., Richard M. et You G., 2018. Le secteur laitier français est-il compétitif face à la concurrence européenne et mondiale ? *Économie rurale* 2/364, pp.109-127.
Poux X., 2005. *Fonctions, construction et évaluation des scénarios prospectifs*, dans Mermet L., (dir), Étudier des écologies futures.

14 Le rapport est disponible sur le site du ministère au lien suivant : https://agriculture.gouv.fr/recherche-metharevenus-identification-et-analyse-des-effets-structurels-de-linvestissement-dans-une

TÉMOIGNAGE

L'agronomie au service de la méthanisation ou la méthanisation au service de l'agronomie ?

*Grégory Vrignaud**

**ACE méthanisation*

Au fur et à mesure du développement de la filière méthanisation, les débats autour de cette technologie divisent aussi bien les acteurs du monde agricole que les citoyens qui peuvent avoir une unité de méthanisation sur leur territoire. Le mérite de ces débats est de mettre sur la table des sujets qui sont urgents à aborder, avec ou sans méthanisation pour pérenniser notre agriculture : matière organique des sols, émission de gaz à effet de serre et d'ammoniac dans l'atmosphère, culture énergétique, pesticides…

Malheureusement, les débats autour de la méthanisation ne sont pas toujours constructifs, pour deux raisons principales :

- D'une part, la méthanisation comme d'autres outils agricoles s'inscrit dans une approche globale de l'agriculture. Les analyses et les jugements doivent donc prendre en compte cette approche globale multicritères, comme par exemple l'impact sur la qualité de l'eau, de l'air, du sol, de l'usage de l'énergie mais également de la productivité de l'agriculture ou de l'intégration dans son territoire. Il parait dont hasardeux d'avoir un avis définitif et ferme sur un procédé qui impacte de différente manière la conduite des systèmes de culture.

- D'autre part, les arguments sont parfois superficiels, beaucoup de textes et avis circulant notamment sur internet, jouant sur la peur. A l'image de nombreux débats de notre société, l'outil internet permet en outre l'accès à de l'information rapide mais pas toujours pertinente. De plus, les propos négatifs sont plus facilement relayés par la presse ou sur la toile par un titre racoleur. Mais il est aussi vrai que sous le terme de « méthanisation », il existe une diversité très forte des unités : à la ferme ou collective, agricole ou industrielle… Il est donc difficile de se faire un avis argumenté et identique pour tous les projets de méthanisation.

En cette année 2020, où les projets de méthanisation « dans les tuyaux » permettraient d'atteindre les objectifs de la PPE en termes de production de gaz renouvelable[15], faut-il se réjouir de l'atteinte de cet objectif ou au contraire tirer la sonnette d'alarme et considérer que tout projet de méthanisation ne va qu'intensifier notre agriculture, appauvrir les sols, polluer nos rivières ou encore exacerber la concurrence avec les éleveurs ou la filière alimentaire ?

Dans le même temps, l'agriculture biologique ou l'agriculture de conservation se développent, mais ces systèmes répondent-ils favorablement à TOUS les critères de la durabilité des systèmes agricoles ? Dans quelles conditions la méthanisation peut être un outil pour aller plus loin dans des systèmes performants ? Quels équilibres faut-il trouver entre la gestion du carbone et de la photosynthèse et l'objectif nourricier de l'agriculture, le bon fonctionnement du sol et la production d'énergie, sachant que les prospectives à horizon 2050[16] font état de la biomasse agricole comme ressource principale pour la production d'énergie renouvelable sous forme de méthane ?

Dans ce témoignage, je passe en revue six voies d'amélioration des systèmes agricoles dans lesquels la méthanisation joue un rôle direct ou indirect. Les exemples décrits ont été recensés sur différents territoires où je suis intervenu à travers des journées de formation et visites de site de méthanisation, et sur des données issues du programme Methalae[17].

1 - Optimiser la fertilisation avec le digestat issu des effluents digérés

15 PPE : programmation pluriannuelle de l'énergie qui vise à réduire les GES, réduire la consommation d'énergie finale, augmenter la part de énergies renouvelables et réduire la part du nucléaire.

16 Vision énergie climat 2030/2050 : quel mode de vie pour demain ? – ADEME 2014 et mise à jour 2019

17 MéthaLAE est un programme CASDAR de recherche appliquée coordonné par Solagro. L'objectif de ce programme est de montrer dans quelles conditions la méthanisation peut être un facilitateur du passage vers l'agroécologie.

L'utilisation de l'azote issu des effluents d'élevage entre sa production par les animaux et la valorisation par les plantes est très variable et dépend de nombreux facteurs : composition des rejets par les animaux, durée de stockage des effluents, compostage ou aération des tas, matériel d'épandage, conditions météo après épandage. Dans le cadre du programme Methalae, un bilan global azote, incluant les apports d'azote organique et d'azote minéral a été réalisé sur 46 exploitations agricoles réparties sur l'ensemble du territoire pour caractériser leurs pratiques.

Lors de la réalisation de ces bilans, on observe que moins de 50 % de l'azote apporté (sous forme de produits résiduels organiques et d'engrais minéral) est valorisé en production végétale (Résultats des 46 bilans azotés réalisés durant le programme Methalae). Une des difficultés de la valorisation des effluents d'élevage est la dépendance aux conditions météorologiques (température et humidité) pour obtenir une bonne minéralisation de ces effluents. Pour la fertilisation du maïs par exemple, les pratiques observées associent 25 à 35 T de fumier à 40 à 80 UN/ha d'engrais minéral pour sécuriser la minéralisation du fumier (l'apport d'azote minéral étant censé d'une part accélérer la décomposition des matières organiques du fumier et d'autre part apporter une source d'azote minéral tout de suite disponible). Pourtant selon le calcul de fertilisation réalisé avec les plans de fumure, il serait possible de se passer de l'engrais minéral. Mais l'éleveur doit sécuriser son rendement et la qualité de ce maïs-fourrage. L'impact négatif de ces pratiques excédentaires en azote est d'avoir un arrière-effet de minéralisation en septembre/octobre après la récolte de maïs où peu de plantes sont présentes pour capter cet azote minéralisé : le risque de lessivage est donc important (figure 1).

La digestion des effluents permet d'améliorer de deux façons l'efficacité de l'azote contenu dans ces effluents bruts :

- D'une part grâce au process de la méthanisation qui permet de minéraliser une partie de l'azote organique, le rendant plus efficace sur la culture ;
- D'autre part via les évolutions des pratiques d'épandage : matériel d'épandage, stockage supplémentaire, période d'épandage plus proche de besoins.

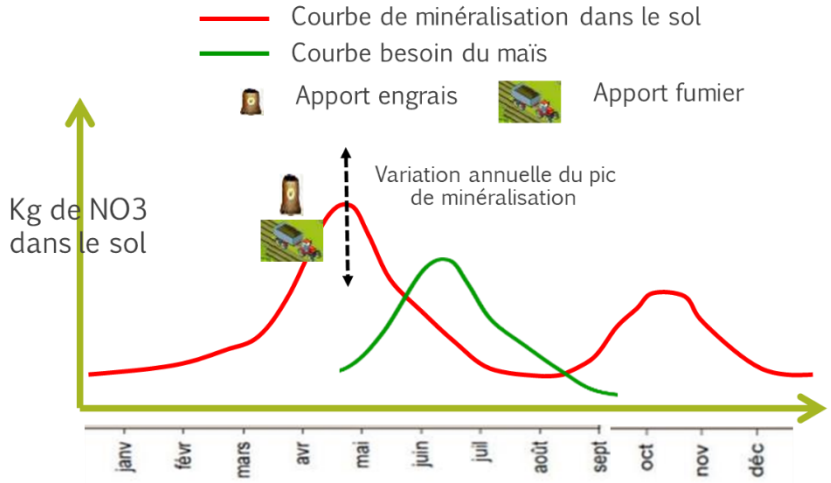


Figure 1 : Evolution de la quantité de nitrate dans le sol et comparaison au besoin de la culture du maïs – Schéma ACE méthanisation d'après J-C Simon INRAE

L'effluent après méthanisation a subi à la fois une transformation physique de la matière notamment par broyage, agitation, homogénéisation, et une transformation biologique qui minéralise une partie de l'azote organique, et modifie le type de molécules organiques présentes dans ce digestat.

Du fait de cette transformation, le digestat est donc plus rapidement intégré au cycle de l'azote du sol et ainsi assimilé plus rapidement par la plante en étant moins sujet aux conditions climatiques. Cette meilleure efficacité d'azote est d'ailleurs prise en compte par le coefficient d'efficacité d'azote repris dans le GREN[18] : de 10 à 30 % pour les fumiers, il passe à 50 à 90 % sur un digestat selon les périodes d'épandage *(Annexe de l'arrêté préfectoral n°545 établissant le référentiel régional de mise œuvre de l'équilibre de la fertilisation azotée pour la région des Pays de Loire)*. Si l'on reprend l'exemple de la fertilisation du maïs, à la place d'un épandage de 30 T

18 GREN : Groupe Régional d'Expertise Nitrates

de fumier + 60 UN d'azote minéral/ha, on observe ainsi des pratiques alternatives consistant à épandre de 25 à 30 T/ha de digestat sans complément d'engrais minéral (Pratiques agricoles sur les fermes du territoire Sud Maine et Loire (49) adhérentes aux unités de Vihiers).

Sur les exploitations agricoles, l'enjeu d'une meilleure efficacité de l'azote organique dépend également de problèmes liés au stockage des effluents. Avec l'évolution des effectifs animaux sur une exploitation ou encore le durcissement de la règlementation, le respect des normes de stockage n'est plus assuré dans de nombreuses situations. Et parfois les volumes de fosse existants ne sont pas suffisants pour attendre les périodes optimales d'épandage ce qui diminue encore l'efficacité de l'azote. Toujours en lien avec le stockage, il faut rappeler qu'un effluent stocké ne reste pas inerte : il chauffe, respire et perd des éléments. L'étude ADEME 2015 *Emission d'ammoniac et GES des fumiers de bovins*[19], a montré qu'un fumier stocké 6 semaines à l'air libre perd 36 % de l'azote initial présenté dans le tas.

La méthanisation peut avoir un impact favorable sur ces deux points. D'une part, lors de l'investissement dans un méthaniseur, le porteur de projet doit mettre en place les capacités de stockage adaptées aussi bien en termes de volume (stockage de 8 à 10 mois en général) que de couverture de fosse. D'autre part, l'objectif de la méthanisation est de valoriser des effluents frais (donc d'éviter les pertes d'azote au stockage).

Ainsi, concernant la valorisation de l'azote des effluents, la méthanisation est en mesure d'optimiser les unités d'azote produites par le cheptel avec pour conséquences favorables notamment de limiter les pertes par ruissellement et l'usage des engrais minéraux. Ces objectifs sont atteints si les bonnes pratiques d'épandages sont mises en œuvre notamment pour limiter la volatilisation lors de l'épandage. Il est ainsi possible d'améliorer le bilan azote d'une exploitation de 20 à 30 %.

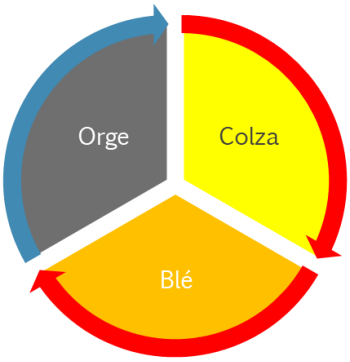
2 - Intégrer des CIVE d'hiver en zone intermédiaire où la succession colza-blé-orge n'est plus durable

En zone intermédiaire[20] céréalière où les potentiels de rendement sont limités par la réserve utile des sols et les conditions météorologiques, la rotation principale est basée sur trois cultures d'hiver : colza/blé/orge. Aujourd'hui cette rotation est dans l'impasse : économique, technique, agronomique… Les différents organismes économiques de ces zones tentent bien de proposer quelques cultures nouvelles (soja, lin oléagineux, pois chiche…), mais cela reste à la marge et la fluctuation des marchés peut vite modifier l'intérêt de ces cultures. D'autres partenaires préconisent le retour de l'élevage qui est effectivement le pivot d'une cohérence agronomique des systèmes agricoles. Mais combien de céréaliers vont souhaiter se lancer dans l'élevage, tout en sachant qu'il faut diminuer notre consommation de viande ?

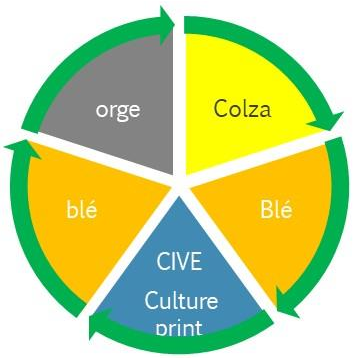
Aussi différents groupes d'agriculteurs voire de coopératives intègrent dorénavant une culture de fauche à destination d'un méthaniseur notamment pour allonger cette rotation et faciliter la gestion du désherbage. Cette culture est implantée en interculture (CIVE = culture intermédiaire à vocation énergétique) pour laisser la possibilité de faire une culture alimentaire : 3 cultures sont donc valorisées sur 2 campagnes. Ainsi d'une rotation de 3 ans colza/blé/orge, on passe à une rotation de 4 ans : colza/blé/CIVE/culture printemps/blé (Figure 2).

19 https://www.ademe.fr/cortea-emissions-dammoniac-gaz-a-effet-serre-fumiers-bovins

20 La zone intermédiaire correspond à une bande diagonale sur le territoire hexagonal située sur le pourtour du bassin Parisien et allant de la Lorraine aux Charentes



Rotation de 3 ans…



… qui passe à 5 ans avec l'intégration de la CIVE

Figure 2 : illustration des évolutions de rotations avec l'intégration des CIVEs

Certes la culture de printemps ne dégage pas une production importante mais il faut considérer cette CIVE/culture de printemps comme un levier agronomique, intéressant à plusieurs titres pour la rotation :

- Plutôt que d'intégrer une jachère non productive comme certains ont commencé à le faire pour sortir de l'impasse en désherbage, ce système maintient un minimum de production alimentaire tout en produisant de l'énergie renouvelable ;
- Les autres cultures de la rotation vont bénéficier de cette coupure : moins d'herbicides, effet azote notamment grâce à des CIVE associées à une légumineuse, …
- Couverture des sols plus longue cohérente avec la mise en place de travail simplifié voire semis-direct pour contribuer au stockage du carbone dans les sols.

Les premières fermes qui ont rallongé leur rotation et qui intègrent les CIVE à raison de 20 à 25 % de leur assolement diminuent l'IFT (Indice de fréquence de traitement de pesticides) global de l'exploitation de 20 à 30 % (témoignage Agrifyls Journée WWF-GRDF).

D'un point de vue économique, ces fermes ont ainsi une partie de leur revenu sécurisé pour différentes raisons :

- Le prix d'achat de la CIVE est lié au prix du contrat gaz vendu par l'unité de méthanisation donc stable sur 15 ans ;
- Le rendement de la CIVE d'hiver est peu fluctuant dans ce type de sol donc cela apporte une nouvelle sécurité sur la marge brute ;
- L'intégration de la CIVE dans la rotation permet une diminution des charges opérationnelles des autres cultures après plusieurs années.

Cette sécurisation d'une partie du revenu peut permettre aux exploitations agricoles de prendre certains risques vis-à-vis de nouvelles cultures.

De plus dans ces zones intermédiaires, souvent caractérisées par des sols argilo-calcaires, il est encore possible d'aller plus loin en termes d'autonomie azotée avec l'intégration d'une luzerne. C'est le cas de plusieurs fermes de la plaine de Thouars (79) adhérentes à l'unité Tiper Méthanisation.

Une rotation colza / blé / CIVE_luzerne / CIVE_luzerne / blé / orge (figure 3) est alors mise en place. La luzerne est donc un couvert permanent dans laquelle une CIVE est sursemée en septembre, deux années de suite. Le mélange est récolté en avril/mai et la luzerne qui repousse peut-être valorisée en une ou deux coupes selon les années, à destination des éleveurs.

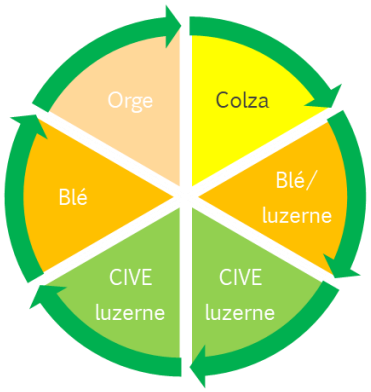


Figure 3 : Rotation de 6 ans avec intégration de luzerne/CIVE

Après deux ou trois années d'exploitation, la luzerne est détruite et permet d'avoir un blé de luzerne performant Et durant ces deux années le système s'est enrichi en azote et carbone.

Cette pratique permet d'allier agronomie, économie et autonomie d'azote et relation durable avec les éleveurs qui peuvent avoir à disposition un couvert riche en azote. Cette approche a déjà été présentée dans le concept LOME (légumineuse-Oléagineux Méthanisation) par Eugène Triboi ancien directeur de Recherche à INRAE et Anne-Marie Blondel-Triboi ancienne chargée de recherche à INRAE dans un article intitulé « LOME » pour l'homme ou l'agriculture de demain (Triboi, 2008).

La CIVE est donc un outil performant si elle est cultivée avec peu d'intrants, dans une logique de rotation cohérente.

3 - Améliorer son bilan énergie et GES

Concernant les GES et l'énergie, l'agriculture est à la fois à l'origine d'un certain nombre de problèmes (émission de CO_2 et CH_4, consommation d'énergie pour les engrais minéraux, déforestations induites par les importations de soja pour l'alimentation animale …) mais peut également apporter des solutions : séquestration du CO_2 dans les sols, production d'énergie renouvelable…

Concernant la filière animale, pour estimer les effets de la méthanisation sur les émissions de GES, nous allons nous focaliser uniquement sur la gestion des effluents.

Aujourd'hui ces effluents sont épandus au champ après une période plus ou moins longue de stockage. Pour certains techniciens et agronomes, les méthaniser est une aberration du point de vue du bilan carbone car la méthanisation consommerait la totalité du carbone facilement dégradable. Avant d'aborder la qualité agronomique des digestats, arrêtons-nous sur le bilan carbone des effluents entre la sortie de la stabulation et le retour au champ. Pour ceux qui réalisent régulièrement de l'épandage de fumier, Il est courant d'observer une évolution de la couleur et de l'odeur entre un fumier frais et un fumier de 6, 10 voire 15 semaines (figure 4), mais également de sa qualité d'épandage, sa densité, voire du besoin de puissance du tracteur pour faire fonctionner l'épandeur à fumier. Que se passe-t-il durant cette période de stockage ?

Fumier frais

Fumier 3 mois

Fumier 5 mois

Figure 4 (Crédit photo – ACE méthanisation)

Au cours de ces semaines, le fumier et dans une moindre mesure le lisier, ont évolué avec les caractéristiques suivantes :

- Perte de carbone
- Perte d'azote
- Perte d'autres éléments par lessivage et lixiviation du tas.

Ces pertes sont souvent oubliées lorsqu'on compare effluent et digestat, pourtant elles sont réelles comme l'a montré l'étude ADEME 2015 citée précédemment. Cette étude a comparé un tas de fumier de vache laitière selon 3 modalités de stockage (figure 5) : stocké sur plate-forme (rouge), stocké **bâché** sur plate-forme (orange) et stocké **tassé bâché** sur plateforme (bleu).

Après 6 semaines de stockage, en comparaison au tas frais (bande verte 100%), les tas ont perdu entre 30 et 35 % de leur masse initiale. Cette perte s'explique par des pertes d'eau mais également de carbone. C'est ce que montre le 2ème graphique ci-contre : perte de 25 à 53 % de carbone. Certes la solution de bâcher limite les pertes mais cette pratique n'est pas aisée à mettre en œuvre.

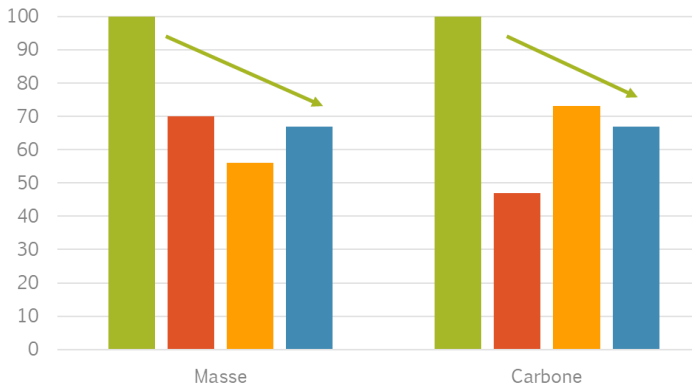


Figure 5 : Evolution de masse et carbone selon 3 modalités de stockage d'un même fumier de vache laitière (base 100%)

On comprend bien que le carbone perdu est autant de CO_2 renvoyé à l'atmosphère et donc pourvoyeur de GES. De plus, contrairement aux idées reçues, si l'on considère l'ensemble des GES, c'est le tas bâché et tassé qui entraine le plus d'émissions. En effet en tassant le tas, l'oxygène est chassé et cette pratique contribue ainsi à mettre le tas en condition anaérobie et donc « en mode » méthanisation. Le tas au lieu d'émettre du CO_2, produit donc du méthane, un effet GES encore plus néfaste. Ainsi dans cette même étude de l'ADEME 2015, il a été mesuré qu'un tas de fumier bâché et tassé produit 136 kg eq CO_2/T de fumier contre seulement 24 kg en fumier laissé au bout de champ sans bâche.

En collectant les fumiers/lisiers frais, c'est donc une quantité importante de GES qui n'est pas émise dans l'atmosphère et qui, dans le même temps, produisent une énergie renouvelable : un gain double pour l'élevage. Cette observation est d'ailleurs la même avec la pratique du compostage de fumier qui permet d'avoir certes un produit fini homogène, stable, inodore, compacte mais qui durant son processus de compostage a perdu beaucoup d'énergie (40 à 60 % du carbone initial selon les biomasses) et d'azote.

La comparaison des filières de traitement (épandage direct, compostage, méthanisation) des effluents sur ces critères d'énergie et de GES est primordiale pour avoir un avis plus éclairé.

Les exploitations qui intègrent ainsi d'une manière raisonnée la méthanisation dans leur système d'élevage peuvent améliorer sensiblement leur bilan GES et énergie. Généralement, ces exploitations optimisent également la fertilisation azotée sur cultures et prairie voire mettent en place un atelier de séchage de fourrage grâce à l'utilisation de la chaleur de leur moteur de cogénération.

Les 46 enquêtes de ferme réalisées dans le cadre de Methalae ont montré :

- Une baisse de 50 % sur la consommation d'énergie finale (énergie primaire consommée – énergie primaire renouvelable produite par la ferme)
- Que 6 exploitations sur 46 sont devenues fermes à énergie positive
- Une baisse de 20 % des émissions nettes de GES sur les 46 fermes.

On comprend donc bien les bénéfices de la méthanisation sur les émissions de GES et le bilan énergie d'une ferme, mais encore faut-il que le digestat puisse entretenir la fertilité du sol aussi bien que le font les apports auxquels il vient se substituer.

4 - Maintenir voire augmenter la restitution de carbone au sol

Le digestat de méthanisation, pour un certain nombre de personnes, est néfaste au bon fonctionnement du sol et empêche le retour de carbone efficace pour celui-ci. A l'heure actuelle, il existe effectivement peu d'études scientifiques sur l'effet des digestats sur le sol. Faut-il pour autant considérer que tous les usages de digestats sont nocifs pour le sol ? Certaines pratiques que l'on rencontre aujourd'hui sur des sites où sont présentes des unités de méthanisation peuvent effectivement être néfastes : pratiques de fertilisation non adaptées, épandage de digestat issu de déchets comportant des résidus de plastiques ou des métaux lourds,

tassement des sols lors des épandages, rotation courte incluant des CIVE avec exportation importante de biomasse. Dans ces situations, la méthanisation est-elle à l'origine de toutes les incohérences ? Un certain nombre de pratiques non durables étaient-elles déjà là avant la mise en place de l'unité de méthanisation ?

Les retours terrains pour les premières installations qui ont entre 5 et 10 ans ne présentent pas d'effets négatifs sur des sites où est préservée, voire développée, une cohérence agronomique du système. Il faut évidemment rester attentif car les évolutions dans le sol de la matière organique et des cycles du carbone et de l'azote sont lentes.

Retour au sol des digestats : de la matière organique restituée encore efficace pour le sol

Sur la qualité du digestat, on peut reprendre les analyses d'ISMO[21] qui ont été réalisées en 2016 sur deux digestats, l'un liquide et l'autre solide après presse à vis sur un site de méthanisation collective et agricole avec 70% d'effluents d'élevage (site Tiper Méthanisation (79)). Ces deux digestats sont comparés à un fumier et à un compost de fumier.

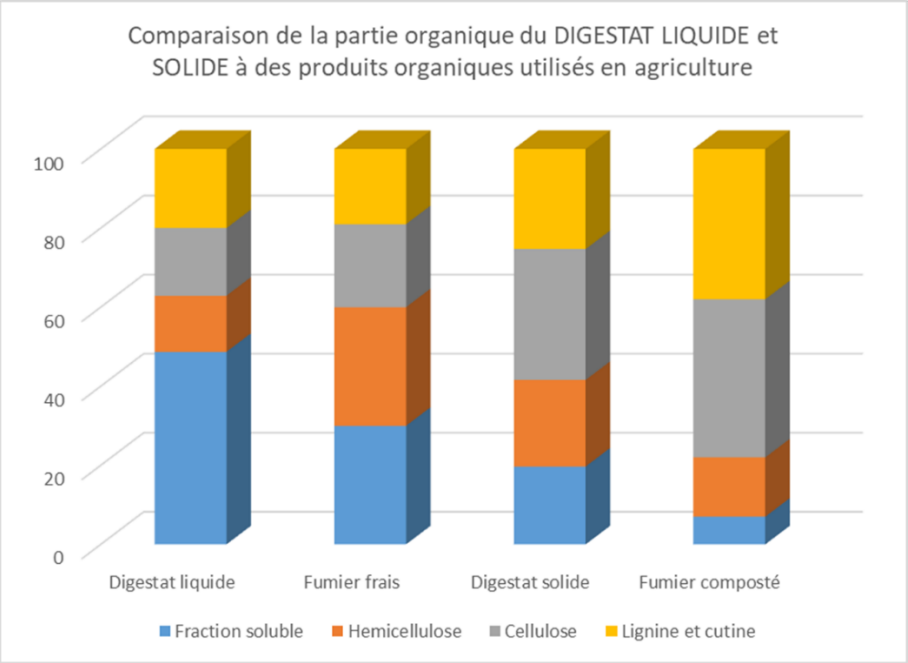


Figure 6 : Analyse ISMO 2016- Référence moyenne du laboratoire SADEF pour les fumiers frais et composté et analyse des digestats prélevés sur le site de Tiper méthanisation

On observe ainsi (figure 6) dans le digestat liquide et solide les différentes fractions de matières organiques : les éléments solubles sont plus présents dans la phase liquide et éléments plus stables comme la fraction lignine et la cellulose plus présents dans la partie solide. Comparativement au compost, les digestats ont proportionnément plus de matières solubles qui vont retourner dans le sol. Le fumier se classe entre les deux. Cette analyse n'est évidemment pas suffisante pour caractériser tous les digestats, mais elle a le mérite de montrer que la digestion transforme qu'une partie de la matière organique. Il reste après digestion une proportion relativement importante de matière organique « active », qui va être utilisée par les microorganismes du sol. Il suffit d'ailleurs d'observer le digestat solide à la sortie de la presse à vis (après digesteur) qui continue de chauffer avec une colonisation de champignons, preuve que cette matière organique n'est pas si stable que ce que l'on dit.

Introduction de CIVE dans la rotation : Une production de carbone supérieure à la CIPAN ?!

Lorsqu'une CIVE (culture intermédiaire à vocation énergétique) remplace une CIPAN dans une rotation, la quantité de carbone restituée au sol après méthanisation de la CIVE est-t-elle pour autant inférieure à la situa-

21 Indice de stabilité de la Matière Organique

tion initiale où l'on détruit et incorpore directement la CIPAN ? Comme pour l'exemple précédent fumier/digestat avec les pertes de carbone des fumiers au champ, il faut comparer avec la pratique des couverts végétaux actuels. Dans la majorité des systèmes, la CIPAN se compose d'avoine, phacélie, moutarde, légumineuse, tournesol qui ont pour objectif de produire de la biomasse avant l'hiver et d'être plutôt gélif pour faciliter la destruction de ce couvert sans utiliser de glyphosate. Dans ces conditions, ces couverts dépassent rarement les 4 à 5 T de MS/ha. Pour les CIVE d'hiver, le choix des couverts ne répond pas au même objectif ; le couvert doit permettre un développement avant l'hiver mais pourra continuer son développement jusqu'en avril/mail pour atteindre les 8 à 12 T de MS/ha. Certes la partie aérienne est exportée (avec les éléments minéraux qu'il faudra compenser avec le digestat), mais il ne faut pas oublier les effets du développement racinaire d'un couvert qui est maintenu en place 3 à 4 mois de plus qu'une CIPAN. Durant cette période, le couvert végétal CIVE continue pleinement à capter du carbone qui restera en partie au sol grâce aux chaumes et à la partie racinaire. Il ne faut pas oublier que la biomasse de ce carbone racinaire (racine et rhizodéposition) est beaucoup plus importante que celle des résidus aériens : environ 2,4 fois plus important (Rasse *et al.*, 2005). Ainsi en laissant un couvert se développer plus longtemps permettant une augmentation de la partie foliaire de 2 ou 3 T de MS, on augmentera également le rendement du carbone racinaire selon ce ratio moyen de 2,4. Une CIVE d'hiver bien intégrée dans la rotation (3 à 4 ans) peut donc être un compromis qui permet de laisser une couverture du sol en place longtemps, avec une destruction sans glyphosate et permettant une limitation du travail du sol. Cette même CIVE avec un mélange à base de légumineuse pourra également contribuer à une restitution d'azote pour la culture suivante. Une production de carbone à la fois pour le sol, à vocation énergétique et alimentaire, est donc possible.

Booster la production des couverts végétaux d'été

Les digestats de méthanisation peuvent également être utiles pour faciliter le développement de couverts d'interculture d'été. En effet, les conditions météos estivales sont rarement propices pour réussir ces couverts végétaux d'été, et si parfois l'orage passe au bon moment, il s'avère qu'il manque souvent un peu d'azote rapidement assimilable après la récolte pour booster le couvert.

De nombreuses exploitations avec méthanisation sont également en agriculture de conservation. Pour augmenter la production du couvert végétal restitué au sol notamment entre 2 céréales à paille, du digestat liquide est épandu au moment du semis du couvert végétal pour apporter une disponibilité d'azote sur les premiers cm de sol, azote rarement disponible après la récolte d'une céréale à paille.

Un apport de 40 à 60 uN efficace permet au couvert de se développer plus rapidement et de bénéficier des températures estivales pour augmenter la captation du carbone avant les gelées. Cette pratique varie selon les départements et la déclinaison locale de la directive nitrate. Apportés en faible quantité, les reliquats entrée hiver ne sont pas plus importants avec un couvert développé ayant reçu des digestats par rapport à un couvert peu développé sans digestats (figure 8). Mais au final le couvert peut restituer au sol 2 à 3 T de MS de plus pour 50 unités efficaces apportées (essai 2011 et 2019-ACE méthanisation, figure 7 et 8).

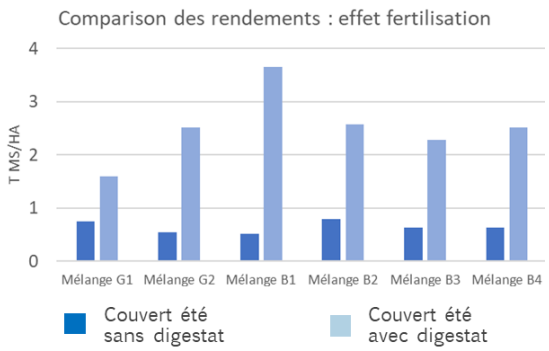


Figure 7 : Résultats interculture été 2011

Plaine deThouars (79)

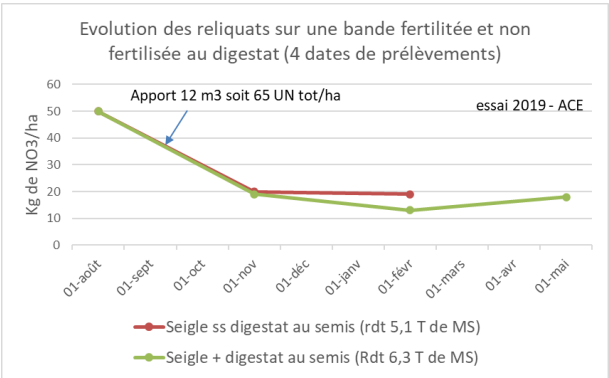


Figure 8 : Evolution des réliquats sous couvert d'interculture de seigle (horizon 0-30 cm)

5 - Améliorer l'autonomie en azote dans les systèmes d'agriculture biologique

La filière agriculture biologique est en plein développement et de nouvelles surfaces continuent à se convertir. Un certain nombre d'exploitations céréalières n'ont pas la possibilité d'intégrer l'élevage sur leur structure et l'ajout de légumineuses dans la rotation n'est pas toujours suffisant pour viser l'autonomie d'azote. Ces fermes cherchent donc des matières organiques dont le prix ne fait qu'augmenter et dont la provenance n'est pas toujours tracée ou locale.

Aussi des fermes bio se regroupent pour transformer une partie de leurs couverts végétaux et/ou résidus de culture comme les menues pailles en digestat rapidement assimilable par les plantes. Des rotations cohérentes de 8 à 10 ans sont mises en place avec l'intégration de CIVE, voire de luzerne. La récolte des menues pailles a également un double intérêt de produire de la biomasse tout en limitant les repousses d'adventices.

Ce système permet ainsi de viser une autonomie de fertilisation grâce à une meilleure efficience de l'azote recyclé (disponibilité des apports plus proche des besoins des plantes) et en limitant les pertes du système en place (lixiviation notamment, Tsachidou, 2019). La quantité et le prix de ce fertilisant sont ainsi garantis. Ce digestat permet d'une part de favoriser un rendement minimum (voir figure 9, essai 2020 sur céréale bio) mais également des apports tardifs en fin de cycle sur blé meunier pour garantir une teneur en protéine et donc avoir des céréales de qualité pour la filière bio.

Essai 2020 – ACEM_CA 79

Figure 9 : Placette : gauche bouchon fiente (90 UN effi)/milieu témoin/droite digestat liquide (90 UN effi)

6 -Développer la complémentarité des fermes et de leur production sur un territoire entre plaine et bocage

Ces différents exemples pris indépendamment peuvent également se combiner sur une même exploitation agricole voire sur plusieurs dans un même territoire. S'il n'est pas possible pour toutes les exploitations agricoles d'avoir de l'élevage, d'être autonome en paille et d'intégrer des légumineuses fourragères, pourquoi ne pas chercher cette complémentarité sur un territoire dans un rayon de 20 à 30 km ? Dans le cadre d'unités

collectives de méthanisation, des groupes se mettent en place. Ils réfléchissent à la possibilité de renforcer les intérêts d'échanges existants avant la méthanisation.

L'exemple des échanges pailles/fumiers n'est pas nouveau. Mais le transport notamment du fumier est souvent une limite à ces échanges. Dans le cadre d'unités collectives de méthanisation, celles-ci sont équipées pour transporter ces volumes de fumiers et prennent en charge les coûts de transport. Cette organisation permet à l'éleveur de ne pas contraindre le céréalier lors des périodes de curage notamment. Les trois parties s'y retrouvent : céréalier, éleveur, méthaniseur. Cette organisation est mise en place sur le site collectif Nord Mayenne, sur la commune de Charchigné, où la paille excédentaire de certaines fermes est redistribuée à d'autres éleveurs du groupe. La notion de collectif d'agriculteurs sur ce territoire a tout son sens.

Sur une zone argilo-calcaire, les rotations sont courtes, il est question d'intégrer des CIVEs d'hiver. Après la récolte en avril/mai, que faut-il implanter : un tournesol, un sorgho grain ? Ces cultures sont risquées vis-à-vis de la sécheresse. Aussi, après différents échanges avec les éleveurs voisins situés à moins de 15 km, l'opportunité d'implanter des mélanges fourragers a été étudiée : moha/trèfle, sorgho fourrager, voire luzerne implantée sur 2 ans avec sursemis de CIVE. Ainsi, ces couverts représentent une disponibilité de fourrages pour les éleveurs, et pour les céréaliers c'est une opportunité de valoriser sans trop de frais une seconde culture. De plus, même si ce couvert est faiblement valorisé, il aura toujours un intérêt pour une restitution au sol.

Conclusion : A chacun de réfléchir pour améliorer nos systèmes de culture et les rendre plus résilients : avec ou sans méthanisation nous devons tous aller dans le même sens.

A travers ce tour de France des initiatives intégrant la méthanisation dans les systèmes agricoles, le but était de mettre en avant des pratiques où la place de la méthanisation semble cohérente pour construire des systèmes économiquement viables, agronomiquement performants et environnementalement durables. Chacun d'entre nous, agriculteurs, techniciens, scientifiques doit contribuer à améliorer notre agriculture pour s'adapter aux changements climatiques.

Bibliographie

ADEME/GRDF/GRT – janvier 2018 – Un mix de gaz 100 % renouvelable en 2050

Bella Tsachidou, Marie Scheuren, Jérôme Gennen, Vincent Debbaut, Benoît Toussaint, Christophe Hissler, Isabelle George, Philippe Delfosse, Biogas residues in substitution for chemical fertilizers: A comparative study on a grassland in the Walloon Region, Science of The Total Environment, Volume 666, 2019

DRAAF-DREAL des Pays de la Loire - Annexe de l'arrêté préfectoral n° 545 2016/ 2016 établissant le référentiel régional de mise en œuvre de l'équilibre de la fertilisation azotée pour la région Pays de la Loire

Chambre d'agriculture de Loire Atlantique/INRA UMR SAS/IRSTEA Rennes/Institut de l'élevage – décembre 2015 - Emissions d'Ammoniac et de Gaz à Effet de Serre des Fumiers Bovins

MéthaLAE : la méthanisation, levier de la transition agroécologique - https://solagro.org/travaux-et-productions/references/methalae-comment-la-methanisation-peut-etre-un-levier-pour-lagroecologie

Ministère de la transition écologique et solidaire – 23 janvier 2019 - Stratégie Française pour l'énergie et le climat – PPE – 2019 2023 / 2024-2028

Rasse D.P., Rumpel C. et Dignac M.-F., 2005 - Is soil carbon mostly root carbon ? Mechanisms for a specific stabilisation. Plant and Soil, 269, pp. 341-356

SAS ABBT_ Vrignaud et al - Campagne essai CIVE été 2011

Triboi, E., Triboi-Blondel, A.M., 2008 – « LOME» pour L'HOMME ! Ou L'agriculture de demain !

TÉMOIGNAGE

Diversité de fonctionnement des méthaniseurs : quels impacts sur les exploitations ?

*Etienne PAILLARD**

**Cerfrance Mayenne - Sarthe*

Introduction

Le développement des unités de méthanisation agricole se traduit par l'existence d'une diversité de fonctionnement. Les enquêtes, réalisées auprès de 40 exploitations22 dans le cadre du programme Méthalaé23 ont permis de mieux cerner les types d'unités de méthanisation et leur niveau d'impact sur les exploitations. Les impacts ou résultats observés (financiers, économiques, techniques, organisationnels) sont différents selon les types, et sont de nature à mettre en évidence qu'ils peuvent répondre à des stratégies d'exploitations agricoles différentes. Ils seront à consolider avec de nouveaux suivis et de nouvelles mesures de ces impacts.

Les types recensés

La participation d'une exploitation agricole dans une unité de méthanisation peut être envisagée sous de nombreuses formes (apports de gisements, de capitaux, de main d'œuvre). Les impacts et le partage de la valeur ajoutée se différencient selon le niveau et le type d'engagement (contrats, statut juridique). Leur analyse ne peut donc se faire sans une différenciation par type d'unités dans lesquelles sont engagées les exploitations agricoles sous peine de ne pas disposer d'éléments de comparaison possibles.

Au-delà de la technologie (co-génération[24] - biogaz[25] - gaz porté[26]), quatre critères de différenciation sont ainsi répertoriés (cf. tableau n°1) :

- la structuration juridique
- le niveau d'investissement et la capitalisation
- la gestion des matières entrantes et des gisements
- la gestion du site en termes de conduite et de fonctionnement dont la gestion de la logistique.

La combinaisons des critères (structuration juridique, niveau d'investissement et capitalisation, gestion des matières entrantes et des gisements, gestion du site en termes de conduite et de fonctionnement dont la gestion de la logistique) fait ressortir 5 types d'unités de méthanisation pour les exploitations enquêtées ;

Seule la typologie T24 est sous représentée dans l'échantillon des exploitations.

22 Les exploitations sont réparties sur l'ensemble du territoire national et étaient engagées dans l'exploitation d'unité de méthanisation avec deux années de fonctionnement.

23 Le programme Méthalaé est une action portée par un groupe d'experts dans le cadre d'un programme Casdar et dont l'objectif consistait à observer comment la méthanisation a fait évoluer les exploitations et leurs systèmes.

24 La cogénération est la production simultanée d'électricité et de chaleur à partir du Biogaz produit par le méthaniseur. L'énergie thermique est récupérée sur les gaz d'échappement et les circuits de refroidissement des moteurs. L'énergie mécanique est transformée en électricité grâce à un alternateur.

25 Le biogaz produit par les unités contient du méthane qui après épuration a des qualités similaires à celles du gaz naturel. Une fois la qualité attestée, il est injecté dans le réseau de gaz naturel après compression à la pression du réseau.

26 Le biogaz produit est comprimé ou liquéfié pour être transporté vers un site d'injection pouvant être situé à plusieurs dizaines de kilomètres du site de production.

	T1	T21	T22	T23	T24
	Unité de méthanisation intégrée dans l'exploitation *(au sein de la même entité juridique)*	**Unité de méthanisation intégrée dans l'exploitation** *(avec nouvelle structure juridique)*	**Unité de méthanisation indépendante** *Portée par un collectif d'exploitations*	**Unité de méthanisation indépendante** *Portée par un collectif d'exploitations associées avec d'autres acteurs*	**Unité de méthanisation indépendante** *Portée par d'autres acteurs*
Lien juridique de l'UM avec l'exploitation agricole	Au sein de la même structure juridique que l'exploitation agricole	Création d'une nouvelle structure juridique dédiée à la méthanisation	Création d'une nouvelle structure juridique dédiée à la méthanisation	Création d'une ou de deux structures juridiques - Holding agriculteurs - Dédiée à la méthanisation	Pas d'implication juridique ou faible implication dans structure dédiée
Lien de l'UM avec les capitaux détenus par les agriculteurs	Investisseur unique	Investisseur unique	Investisseurs très majoritaires	Investisseur majoritaire ou minoritaire	Investisseur minoritaire ou non
Lien de l'UM avec la part de gisement apportés par les agriculteurs	Apporteur très majoritaire et repreneur	Apporteur très majoritaire et repreneur	Apporteur très majoritaire et repreneur	Apporteur majoritaire et repreneur	Apporteur Repreneur
Lien de l'UM avec le niveau d'implication des agriculteurs dans l'exploitation du site	Exploitation par l'agriculteur	Exploitation par l'agriculteur	Exploitation par un groupe du collectif	Exploitation déléguée à un tiers	Exploitation déléguée à un tiers

Tableau 1 : critères de différenciation des 5 types d'unités de méthanisation (UM) recensés

La différenciation entre le T1 et T21 est d'ordre juridique.

La différenciation entre les T21 –T22 –T23 et T24 est liée au niveau d'engagement des agriculteurs (capitalistique – gisement – exploitation) qui peut se traduire par une baisse d'engagement et un lien de plus en plus détaché avec le ou les dirigeants des exploitations agricoles.

De multiples combinaisons de critères sont possibles (cf. tableau 2).

Typologies d'unité

Des variables au sein des typologies

	T 1-21	T 22	T 23	T 24
Structuration juridique et typologie des actionnaires	Agri	Agri Exploitation		Holding agri Exploitant Financier
Structuration financière et implication des actionnaires	100 %	90 à 60 %		< 50 %
Part des effluents agricoles	80 à 100 %	70 à 80 %		70 %
Exploitation de l'unité	Agri	Agri + salariés ou déléguée		Déléguée

Tableau 2 : caractérisation des 5 types d'unités de méthanisation par leur critère de différenciation.

(T1 et T21 étant regroupés au vu de leur différenciation sur le seul critère juridique)

Les impacts de l'engagement sur les exploitations agricoles

Les impacts socio-économiques sur les exploitations agricoles engagées se différencient par leur nature, quatre ont été recensées et analysées dans le cadre de notre enquête :

1. la rentabilité et la valeur ajoutée
2. les engagements contractuels
3. la transmissibilité des exploitations
4. la gestion de la main d'œuvre.

<u>La rentabilité et la valeur ajoutée pour l'exploitation agricole et les agriculteurs</u>

L'engagement d'une exploitation dans une unité de méthanisation peut répondre à une stratégie de diversification de revenus et / ou de prise en charge de coûts historiquement supportés par l'exploitation.

Cela se traduit par une rentabilité directe et indirecte à travers :

- la valorisation des effluents et des matières
- les économies d'intrants
- la prise en charge des coûts logistiques et de stockage par l'unité de méthanisation
- la rémunération du travail en cas d'exploitation du site de méthanisation
- la rémunération des capitaux et la distribution de dividendes.

Ces sources de revenus ou d'économie de charges sont autant d'opportunités pour les exploitations agricoles. Leur niveau d'engagement déterminera le potentiel de valeur ajoutée à percevoir.

Tableau 3 : structuration de la valeur ajoutée créée par l'unité de méthanisation et diversité des formes de retour de cette valeur ajoutée vers les exploitations agricoles

Les engagements contractuels (pour la phase d'exploitation)

L'engagement d'une exploitation dans une unité de méthanisation se traduit par deux types d'engagement :

- des contrats qui lient l'exploitation ou l'unité à un tiers pour une mission
- des statuts ou un pacte d'associés qui lient l'exploitation ou l'agriculteur à une société de production ou à une holding pour un engagement financier et la gouvernance.

Les contrats et statuts traduisent les niveaux d'engagements des exploitations et des dirigeants.

Les articles concernant les cas de non-respect contractuels réciproques sont aussi des éléments de mesure.

Les contrats concernent les entrées de matières (types de matières - quantité - qualité - indemnités – durée), et les sorties en termes de production d'énergie (contrat d'achat d'électricité ou de gaz : engagement de la production). Ils ont pour objectif de sécuriser l'unité mais engagent les signataires. Cela se traduit par des contreparties en cas de non-respect des engagements.

Les statuts et le pacte d'associés ont pour objectif de sécuriser le financement et la gouvernance de l'unité de production. Ils incluent des précisions quant à la gestion des prises de décisions, de valorisation et de transferts de capitaux, la gestion de l'unité et les enjeux de partage de valeur ajoutée.

La transmissibilité de l'exploitation agricole

L'engagement d'une exploitation dans une unité de méthanisation a et aura un impact sur le fonctionnement de l'exploitation agricole (plus ou moins prononcé suivant son niveau d'engagement) et de fait, sur sa transmissibilité.

Le lieu d'implantation du site, la structuration juridique, les relations contractuelles, le niveau d'investissement, la rentabilité directe et indirecte, la nature des actionnaires sont autant de points qui impacteront la transmission de l'outil (reprise et valorisation).

La main d'œuvre et l'emploi

Impact quantitatif

L'engagement d'une exploitation dans une unité de méthanisation a et aura un impact sur la main d'œuvre de l'exploitation agricole pour la main d'œuvre associés (dans le cas d'une société agricole) ou la main d'œuvre

salariée. L'impact dépendra de l'engagement de la main d'œuvre des exploitations agricoles dans le fonctionnement de l'unité de méthanisation mais aussi de la prise en charge par l'unité des travaux liés à la gestion des effluents (enlèvement - transports - épandage). Le bilan du poste main d'œuvre pourra être considéré positif ou négatif en fonction du temps passé et/ou gagné par rapport à la situation antérieure (il n'est pas évoqué ici la valorisation économique de ce travail).

Impact qualitatif

Dès lors que l'engagement de l'exploitation est constaté, il est aussi important de prendre en compte une évolution des missions à accomplir. L'exploitation partielle ou totale d'un site par des agriculteurs se traduit par le développement de nouvelles compétences qui nécessitent de l'apprentissage ou de la formation.

Le niveau d'impact

L'analyse et l'évaluation des impacts de l'engagement d'une exploitation dans un projet de méthanisation peuvent être envisagées dès lors que ces impacts et les types d'unité sont identifiés.

De même, la comparaison des résultats économiques ou autres impacts ne peut se faire sans cette différenciation. Le nombre d'exploitations engagées par type permettra à l'avenir d'apporter de la fiabilité aux tendances observées.

L'analyse, réalisée auprès de 40 exploitations dans le cadre du programme Méthalaé, nous a permis d'identifier des tendances (voir ci-dessous) qui devront être consolidées avec de nouveaux suivis et de nouvelles exploitations.

Les résultats par type d'unité peuvent être analysés selon leurs impacts (ceux-ci peuvent être positif, neutre, ou nécessiter de la vigilance).

A noter que chaque impact peut ensuite être analysé en fonction de son niveau ou du poids (celui-ci peut être important, significatif ou faible).

Il s'agit d'une double analyse qui met en évidence le type impact puis son poids (cf. tableaux 4 et 5).

Analyse des impacts

Niveau d'impact	OO Important	O Significatif	= Faible
Type d'impact	Positif	Neutre	Vigilance

Tableau 4 : caractérisation des impacts selon leur niveau d'impact et selon leur caractère positif ou négatif

SYNTHÈSE : analyse des impacts par typologie

	T 1 T 21	T 22	T 23	T 24
Impact valorisation des effluents	O	O	O	O
Impact gestion des coûts logistiques	=	OO	O	O
Impact quantité et nature travail	OO	OO	O	O
Impact financier, Investissement et risque	O	O	=	=
Impact enjeux transmissibilité d'exploitation	O	O	=	=
Impact revenu direct issu de l'unité	OO	O	=	=

Tableau 5 : catégories d'impact et description de leur effet sur les exploitations agricoles selon les différents types d'unités de méthanisation auxquels elles sont rattachées

Valorisation des effluents (impact positif et significatif)

« La valorisation des effluents » se traduit principalement par des gains de fertilisation et une valorisation des CIVE. La gestion des digestats paraît mieux optimisée que la gestion des effluents d'élevage et les évolutions de pratiques favorisent cette tendance. Quels que soient les types d'unités et donc de contractualisation des agriculteurs, les impacts sont positifs et significatifs.

Gestion des coûts de logistique (impact variant de faible et neutre à positif et important)

La gestion des coûts de logistique est un élément de différenciation entre les unités. C'est aussi un sujet de divergence de traitement entre les unités collectives composées d'agriculteurs et celles composées d'autres actionnaires souhaitant donner priorité à la performance économique de l'unité au détriment de la prise en charge des coûts liés aux matières agricoles.

L'impact est d'autant plus positif pour les exploitations agricoles que la stratégie de l'unité est au service des exploitations agricoles. Les écarts de bénéfices pour les exploitations se creusent en fonction de la prise en charge des coûts d'enlèvement, de transports et d'épandage, voire d'indemnisation de stockage pour les digestats (attention, cela se fait bien au détriment des revenus directs issus et proportionnellement aux capitaux engagés).

Pour les exploitations engagées individuellement, l'impact est neutre et faible.

Quantité et nature du travail (impact variant de « vigilance » et important à neutre et significatif)

L'impact en termes de quantité de travail est très lié au niveau d'implication des agriculteurs dans la gestion de l'unité et de la logistique.

Pour les agriculteurs engagés individuellement, la méthanisation est une nouvelle activité. Elle génère de 0,5 à 1 UTH selon la taille, avec un niveau d'astreinte qui peut être important suivant le système et un niveau de technicité à acquérir qui ne favorise pas la transmission de ces missions aux salariés en place.

Pour les groupes d'agriculteurs qui s'engagent, l'impact est lié à leur volonté de s'investir à quatre niveaux :

- la maîtrise de la gestion de l'outil
- la gestion des matières et gisements
- la logistique
- la maintenance du site, et ce en contrepartie de gains de temps sur la logistique pour chacune des exploitations.

Pour les agriculteurs uniquement engagés via le contrat gisements, l'impact est neutre mais dépend de la prise en charge de la logistique.

Investissement et gestion du risque (impact variant de « vigilance » et important à neutre et significatif)

Sans tenir compte de la rentabilité, le niveau d'investissement et l'endettement qui s'y rattache sont des facteurs de risques (au même titre que pour les autres activités agricoles). L'historique de l'endettement et le niveau de l'endettement de l'exploitation agricole qui s'engage sont les deux autres éléments à prendre en compte.

La capacité de l'exploitation à faire face aux aléas peut se trouver dégradée par ce nouvel investissement. Le niveau de risque peut être très partagé suivant le nombre d'exploitations engagées à titre collectif et ce, surtout selon les formes sociétaires (SAS -SARL) et les niveaux de garantie pris par les banques.

Transmissibilité des exploitations (impact variant de « vigilance » et significatif à neutre et significatif)

L'impact sur la transmissibilité de l'exploitation est très lié à son niveau d'engagement financier, à la taille de l'unité et à la contractualisation (sécurisation matières - durée restante du contrat d'électricité ou gaz qui s'y rattache).

La rentabilité directe et indirecte reste un critère essentiel pour un ou des investisseurs repreneurs.

En ce début d'année 2021, il est possible de disposer de références économiques et des points de repères selon les typologies d'unités.

Pour une exploitation individuelle, le montant de l'investissement pourrait devenir un facteur limitant. Les repreneurs potentiels devront disposer d'une surface financière suffisante pour obtenir le financement nécessaire, ce qui limite les candidats potentiels à cette reprise.

Ce critère de la transmissibilité est à modérer selon le type d'exploitation engagée (sociétaire ou non) et le montant des capitaux à reprendre sur l'exploitation historique.

A contrario, la diversité des activités, l'intégration de l'activité de méthanisation dans le fonctionnement de l'exploitation, la sécurisation de la gestion des effluents, le potentiel de revenus directs et indirects sont autant d'atouts favorisant la transmission quels que soient les types d'unités.

Revenu direct de d'unité (impact variant de « vigilance » et faible à positif et important)

Les revenus directs restitués à l'exploitation agricole engagée sont liés :

- à la performance de l'unité (prix de revient des matières, capacité de production de l'unité au plus proche du contrat électricité ou injection, et à la maîtrise des coûts de production de l'unité)
- à son niveau d'engagement (quantité de matières apportées, montant de capitaux investis, main d'œuvre mis à disposition)
- à la contractualisation qui s'y rattache (niveau et conditions d'engagements des exploitations agricoles).

Pour les agriculteurs engagés à titre individuel, le revenu direct correspond au revenu de l'unité qui est lié à la performance de l'unité de méthanisation (maîtrise du prix de revient du GAZ produit et des coûts de fonctionnement).

Pour les agriculteurs engagés à titre collectif, autonomes et impliqués dans la gestion des unités, le niveau de revenu direct correspond aux dividendes versés.

Le niveau de dividende est lié à la performance de l'unité qui peut être impactée par la priorité donnée à l'utilisation de matières agricoles moins méthanogènes, et au niveau de prise en charge des coûts historiquement supportés par les exploitations agricoles (logistiques).

Pour les agriculteurs engagés avec d'autres actionnaires (dont la priorité est d'assurer la rentabilité de l'outil avec un niveau d'exigence sur le coût de revient des matières méthanogènes), le revenu dépendra de la rémunération des matières agricoles apportées et / ou du montant de prise en charge des coûts de transports ou d'épandage.

Conclusion : Stratégie d'exploitation agricole et typologie d'unité

Chaque exploitation agricole disposant de gisements ou de matières peut et doit analyser ses propres atouts, contraintes ainsi que son environnement afin de vérifier si la méthanisation peut être une opportunité de développement, de diversification ou un facteur de pérennité.

Les atouts et contraintes de l'exploitation à prendre en compte sont de cinq ordres :

1. la capacité à apporter des matières et / ou des effluents d'élevage (potentiel méthanogène de l'exploitation)
2. la capacité à être autonome ou la volonté de se regrouper avec d'autres agriculteurs ou actionnaires complémentaires pour porter un projet
3. la capacité à faire face à l'investissement
4. la situation environnementale existante (surface d'épandage de digestats et capacité de stockage)
5. la stratégie de développement des activités agricoles de l'exploitation.

Les éléments à prendre en compte concernant l'environnement de l'entreprise :

1. la possibilité d'injecter ou de produire de l'électricité
2. la volonté et la possibilité de se regrouper avec d'autres agriculteurs ou actionnaires dans le cadre d'un projet collectif
3. la possibilité de construire une unité de méthanisation dans des conditions d'acceptabilité par le voisinage.

Chacun des types d'unités de méthanisation présente ses atouts et peut répondre favorablement aux attentes des exploitations agricoles. Par contre, il est essentiel de les identifier et de le mesurer préalablement les impacts de l'engagement.

Au vu du nombre d'unités en fonctionnement en ce début d'année 2021, il sera possible dans les mois et années à venir de mesurer les impacts (financiers, techniques et humains) de l'engagement des agriculteurs en fonction des typologies d'unités, et ainsi de consolider ou amender les orientations évoquées.

TÉMOIGNAGE

La méthanisation, outil favorable à la transition agroécologique

Christian Couturier, Céline Laboubée*, Sylvain Doublet**

**SOLAGRO*

Dans quelle mesure la méthanisation peut-elle contribuer à accompagner les mutations de l'agriculture confrontée à des enjeux environnementaux et sociétaux inédits, au premier rang desquels le changement climatique et l'évolution des systèmes alimentaires ?

Le programme Méthalae[27] – « la méthanisation, levier de la transition agroécologique » a permis d'apporter de nombreux éclairages sur les impacts de cette technique sur les agrosystèmes, des points de vue agricole, agronomique, environnemental, social. Il a aussi contribué à éclairer la faisabilité les scénarios prospectifs de transition tels que AFTERRES2050[28].

Le Rapport Spécial du GIEC sur l'utilisation des terres le montre clairement : la modification des régimes alimentaires et la modification des systèmes de production peuvent jouer tous deux un rôle majeur dans la diminution des émissions de gaz à effet de serre, et dans des ordres de grandeur comparables. Entre les scénarios extrêmes qui poussent les curseurs très loin soit d'un côté (forte réduction de la demande en produits animaux), soit de l'autre (forte intensification des systèmes de production), il est probablement plus réaliste et soutenable de rechercher des scénarios de compromis. Diminuer les effectifs bovins, stocker du carbone dans les sols agricoles, substituer des bioénergies aux fossiles, réduire la consommation d'intrants et améliorer le revenu des agriculteurs : la méthanisation peut apporter sa part de réponse.

Cet article illustre le rôle que pourrait jouer la méthanisation dans cette perspective, à partir de deux exemples d'exploitations agricoles inspirées de situations existantes, et projetées dans un futur où l'on imagine une évolution des systèmes de production, avec recours à la méthanisation. Le premier exemple est une exploitation en grandes cultures dans la Somme, la seconde est une exploitation en élevage bovin allaitant dans la Brenne. L'exercice de fiction consiste à imaginer la place que pourrait prendre la méthanisation dans l'accompagnement des évolutions des systèmes de production. Ces exploitations sont tirées de la brochure de présentation du scénario de prospective AFTERRES2050, elles sont bâties à partir de « cas types » proposés par les organisations agricoles[29], et des ateliers de concertation réalisés dans le cadre d'exercices de régionalisation du scénario AFTERRES en régions Centre et Picardie en 2014-2016. Le présent article détaille ces cas types et les actualise en tirant parti des résultats du programme METHALAE.

La méthanisation en grandes cultures pour une production agricole durable sans élevage

Guillaume Rocquecourt cultive 170 ha de grandes cultures en terres fertiles dans la Somme. Les rotations sont typiques de la région : une rotation courte (colza, blé, orge), et une rotation plus longue (pomme de terre, blé, betterave, blé, orge, colza, blé).

Le système (Tableau 1) produit 1300 tonnes de matières sèches dont deux-tiers directement pour l'alimentation humaine et un tiers pour l'alimentation du bétail ou des usages industriels. Il consomme 31 tonnes d'azote

27 Solagro (coordination), AILE, TRAME, Chambre d'Agriculture des Pays de Loire, CERFRANCE 53-72, EPL du Périgord, Méthaneo, . Financements : Ministère de l'agriculture (convention CAS DAR AAP IP 2014 n°5439), Agence de l'Eau Adour Garonne, ADEME. Synthèse, monographies et fiches thématiques disponibles sur https://solagro.org/travaux-et-productions/references/methalae-comment-la-methanisation-peut-etre-un-levier-pour-lagroecologie

28 Le scénario Afterres2050 – version 2016. Couturier C., Charru M., Doublet S. et Pointereau P.. Décembre 2016.

29 Fiches INOSYS de l'IDELE pour les élevages, « Références fermes types » de l'Observatoire des grandes cultures de la Chambre d'agriculture des Hauts de France

minéral et ne bénéficie d'aucun apport d'azote organique ou symbiotique ; l'IFT (Indice de Fréquence de Traitement) est de 9,7, le surplus d'azote est de 20 kg N / ha, et les émissions de gaz à effet de serre s'élèvent à 512 teqCO_2 (3 teqCO_2 / ha)[30].

Le nouveau système mis en place repose sur une rotation longue, où la pomme de terre est remplacée par des lentilles[31], avec dans un premier temps le passage en techniques culturales simplifiées et la pratique systématique des couverts intermédiaires. Une modification majeure est ensuite apportée à cette rotation avec l'adoption du semis direct sous couvert vivant. Le semis direct sous couvert vivant consiste à implanter un couvert herbacé qui va rester en place plusieurs années, dans lequel sont semées les cultures annuelles. Le couvert – une légumineuse de type trèfle ou éventuellement luzerne selon les contextes - est moins sensible aux aléas climatiques que les cultures intermédiaires annuelles, il assure encore plus efficacement les fonctions de maintien de porosité du sol, de portance, de contrôle des adventices.

La rotation typique voit donc se succéder l'implantation d'une culture de trèfle, puis le semis direct d'un colza sous ce couvert, puis d'un blé, et à nouveau d'un blé. Ensuite le couvert est supprimé pour faire place à des pois ou des lentilles, suivis d'un couvert intermédiaire. Une culture de betterave vient clore cette rotation sur 5 ans.

Une partie des couverts – 260 tonnes de matières sèche par an en moyenne – est récoltée et envoyée en méthanisation, ainsi que 100 tonnes de paille, soit 40 % de la production de pailles de céréales. Le méthaniseur est une installation collective d'une capacité de 150 m^3/h de biométhane, regroupant une dizaine d'agriculteurs, ce qui représente un territoire de l'ordre de 2 000 ha sur lequel le digestat fait l'objet d'un plan d'épandage collectif. L'unité de méthanisation traite également les issues de céréales de la coopérative locale, ainsi que des sous-produits des industries agroalimentaires non valorisés en alimentation animale. Les bandes enherbées floristiques et mellifères qui maillent le parcellaire sont également récoltées après floraison, et méthanisées, afin de recycler les nutriments qu'elles ont fixés et d'améliorer cette fonction de fixation des nutriments[32].

L'exploitation de Guillaume Roquecourt contribue à la production de biométhane à hauteur de 87 tonnes par an, l'équivalent de 100 000 litres de gasoil, soit 10 fois plus que sa consommation de fioul agricole. Son digestat apporte 8,4 tonnes d'azote par an (soit 50 kg N / ha en moyenne), en deux ou trois passages, ce qui permet de maintenir des rendements en blé tendre de 73 quintaux par hectare, au même niveau qu'avec le système conventionnel. L'apport d'azote minéral passe de 182 kg N / ha à 73 grâce aux apports symbiotiques (lentilles, couvert de légumineuse) et au digestat.

La production récoltée est un peu supérieure, en incluant les cultures intermédiaires à valorisation énergétique (CIVE). La consommation de ressources (azote, énergie) et les impacts (émissions de GES, surplus d'azote) sont significativement réduits, entre un et deux tiers selon les indicateurs (Tableau 2). L'exploitation économise beaucoup plus de GES qu'elle n'en émet (644 tCO_2 éq. contre 322) ; et elle produit beaucoup plus d'énergie (1150 MWh) qu'elle n'en consomme (360 MWh d'énergie directe (carburant) et indirecte (engrais et autres intrants)).

30 Les calculs sont réalisés à l'aide de l'outil ACCT (AgriClimateChangeTool) : voir https://agriadapt.eu/mitigation-farming-sector/

31 Les pommes de terre ont été remplacées par des lentilles pour plusieurs raisons :

1) car le système est passé en TCS et les pommes de terre ne sont pas compatible avec cette technique
2) les lentilles ont été choisies pour coller à l'assiette afterre 2050 (plus de légumineuse dans l'assiette) et également pour augmenter la fixation de l'azote atmosphérique dans la rotation

32 Sur la nécessité de récolter les bandes enherbées, voir https://www.herbea.org/fr/fiches/405/Bande-enherbée

	Actuel		Futur	
	ha	tonnes	ha	tonnes
Céréales	85	573	64	401
Oléagineux	28	86	32	98
Betterave	28	526	32	600
Pomme de terre	28	128	0	0
Protéagineux	0	0	32	120
Légumineuses fourragères récoltées (couvert)	0	0	(129)	259 tMS
Emprise des infrastructures agroécologiques	0	-	8	-
TOTAL	**170**	**1312**	**170**	**1477**

Tableau 1 : Assolement et production de l'exploitation de Guillaume Rocquecourt. Situation actuelle et nouveau système proposé

Le stock de carbone du sol augmente : les simulations réalisées à l'aide de l'outil SIMEOS montrent que cet effet est dû essentiellement au développement des couverts annuels ou pérennes. Le fait de méthaniser, ou non, les couverts et les pailles ne modifie pas le stock de carbone du sol.

		Actuel	Futur	Différence (%)
Production récoltée	Tonnes de matière sèche	1 312	1 477	+7
Consommation N minéral	tonnes N	31	13	- 58
Production N symbiotique	tonnes N	0	9	Nd
Surplus N	tonnes N	3,4	1,8	- 45
Émissions NH3	tonnes N	3,3	2,1	- 36
IFT	Nbre	9,7	2,9	- 70
Part de légumineuses	% surfaces assolement	0	33	Nd
Infrastructures agroécologiques	% SAU	0	4,9	Nd
Consommation d'énergie	MWh	779	360	- 54
Production d'énergie	MWh	0	1 150	Nd
Solde énergie Consommation - Production	MWh	779	-790	Nd
Émissions de gaz à effet de serre	tonnes équivalent CO_2	512	322	- 41
GES évités par substitution	tonnes équivalent CO_2	0	644	Nd
Solde GES émissions - substitution	tonnes équivalent CO_2	512	-278	Nd

Tableau 2 : Niveau et variation des principaux indicateurs agronomiques et écologiques de l'exploitation de Guillaume Rocquecourt

La valorisation économique des couverts est rendue possible par la méthanisation, dans une région où l'élevage a disparu depuis de nombreuses décennies et où personne n'envisage une réinstallation massive des ruminants.

Le biogaz généré par les seuls couverts permet d'éviter l'émission de 400 tCO_2 par an par effet de substitution à une énergie fossile (combustion directe de gaz naturel)[33]. Dans le même temps, le stockage additionnel par les couverts représente environ 100 tCO_2 par an, soit un effet global de 500 tCO_2 évités ou stockés. Que les couverts soient laissés en place, ou qu'ils soient méthanisés puis restitués sous forme de digestat, les simulations réalisées à l'aide de l'outil SIMEOS montrent que le stockage de carbone est similaire dans le cas [34]. Le choix de laisser les couverts au champ au lieu de les méthaniser ferait donc perdre 80% de l'effet global potentiel[35].

L'apport du digestat joue un rôle clé dans le maintien de hauts niveaux de rendement. Ce rôle découle à la fois du fait que la moitié de l'azote organique est minéralisée via la méthanisation, et que l'apport d'azote est pilotable en fonction des besoins des cultures, à la différence des engrais verts obtenus par simple broyage des couverts sur place. La contrainte principale est la possibilité de faire passer les épandeurs dans les champs au moment voulu.

Cet exemple permet d'illustrer la discussion sur l'intérêt et la possibilité de choisir la méthanisation comme forme de valorisation des légumineuses fourragères et des cultures intermédiaires, plutôt que le retour de l'élevage en régions de grandes cultures. Le système polyculture-élevage présente des atouts multiples sur les plans à la fois socio-économiques, agronomiques et écologiques. Ces fonctions sont liées en grande partie à la présence de prairies, qui apportent de nombreux services écosystémiques, et de cultures fourragères, qui contribuent à la diversité de l'assolement.

Pour autant, il est très peu probable de voir la polyculture-élevage remplacer les systèmes de grande culture de manière significative, dans un contexte qui plus est de diminution des cheptels bovins à l'échelle nationale. Dans le cadre des travaux de prospective menés par SOLAGRO, la comparaison de plusieurs scénarios de redéploiement des élevages bovins, incluant un scénario de redistribution du grand ouest vers les régions céréalières, montre que cela conduirait probablement à réduire les cheptels bovins dans les zones de montagne, qui ont le plus de handicaps naturels. Les surfaces de grandes cultures qui seraient converties en cultures fourragères ou prairies pour l'alimentation des ruminants en régions de plaine seraient perdues, car elles ne pourraient pas être compensées par une augmentation des surfaces céréalières récupérées sur les prairies de montagne. Les régions de montagne disposant de moins d'options d'évolution que les régions de grandes cultures, la réduction des cheptels se traduirait par un recul de l'agriculture et une évolution à terme vers la forêt.

Il est donc nécessaire d'imaginer des systèmes de grande culture qui présentent des intérêts proches de ceux offerts par les systèmes polyculture-élevage, mais sans ruminants.

Dans ce contexte, le développement de la méthanisation paraît pertinent. Elle est capable de jouer, grâce au digestat qui peut être comparé à un « fumier végétal », un rôle agronomique proche de celui des ruminants, par la capacité à valoriser des cultures fourragères et à restituer les minéraux et le carbone stable. Dans cet exemple, la restauration de la biodiversité est obtenue par une augmentation des surfaces d'IAE (infrastructures agroécologiques) qui représenteraient 5% de la SAU. Les bandes fleuries et enherbées seraient conduites

33 S'y ajoutent 100 t avec les autres matières méthanisées et 144 t avec une toiture photovoltaïque soit un total de 644 t.

34 Ce que confirme Thomsen I.K., Jøreng E.O., Møller H.B. et al., Carbon dynamics and retention in soil after anaerobic digestion of dairy cattle feed and faeces, 2013 , Soil Biology & Biochemistry 58 (2013) 82e87

35 L'impact sur le fonctionnement biologique des sols fait l'objet de travaux de recherche (programme en cours MethaBioSol). Les retours d'expérience empiriques de terrain des installations ayant plus de 10 ans ainsi que les travaux existants ne montrent pas d'impact globalement négatif : voir Christian Mougin, Nathalie Cheviron, Victor Moinard, Sabine Houot. Quels impacts des digestats sur la vie du sol ?. Séminaire scientifique " méthanisation et digestats : enjeux et impacts du digestat sur les sols ", May 2019, Paris, France. hal-02791333t

extensivement en valorisant la production végétale par méthanisation avec restitution de l'azote sur les surfaces cultivées.

Accompagner la mutation des systèmes d'élevage bovins

Avec ses 70 charolaises sur 125 hectares de cultures et de prairies, le GAEC d'Aurélie et Nicolas Robin est typique des élevages bovin viande de l'Indre. Les prairies permanentes représentent un tiers de la SAU (41 ha) et les terres arables les deux-tiers. Les cultures fourragères (41 ha) représentent la moitié des terres arables, le reste est dédié aux céréales (14 ha) et oléagineux (22 ha), avec une rotation blé orge colza, en partie autoconsommée par le troupeau. La pousse d'herbe estivale est suffisante pour permettre le pâturage en été et en automne. Le stock constitué au printemps permet de passer l'hiver généralement sans difficulté. La ferme est autonome en céréales et en paille, mais achète des concentrés sous forme de tourteaux de soja et de colza. Dans l'Indre, contrairement aux tendances régionale et nationale, les effectifs du troupeau bovin viande se maintiennent depuis 20 ans.

Mais le maintien du système actuel est directement menacé par le changement climatique, par les incertitudes sur l'évolution de la demande en viande bovine française et aussi par la difficulté à transmettre ce type de production compte tenu de la démographie agricole et de la faible attractivité de l'élevage bovin pour les nouveaux arrivants en agriculture.

En France, la production de viande bovine est passée de 1,6 millions de tonnes équivalent carcasse au début des années 2000 à 1,4 millions en 2018. La consommation stagne depuis 1985, voire diminue. Même si plusieurs facteurs interviennent, la diminution de la demande intérieure, qui ne semble pas près de s'enrayer, contribue à celle de la production. L'évolution vers un régime plus végétal et plus biologique tel que recommandé par le nouveau PNNS4 va se traduire nécessairement par une diminution de la consommation de viande bovine et de produits laitiers. Selon la première version de la Stratégie Nationale Bas Carbone publiée en 2016, le cheptel laitier diminuerait de 6% entre 2010 et 2035, et le cheptel allaitant de 11%[36]. La version actuelle (2020) prévoit une baisse à l'horizon 2050 de 25% du cheptel laitier et de 32% du cheptel autre que laitier. De même les surfaces de prairies naturelles sont en régression constante, la France a perdu 3 millions d'hectares de surface toujours en herbe depuis les années 1960[37] pour atteindre 9,5 Mha en 2018 (AGRESTE). L'apparente stabilisation récente, voire la légère augmentation constatée par la statistique agricole annuelle pour 2018, sont peut-être dues à une évolution des méthodes de comptage, sur fond de politique d'encadrement des retournements de prairies. Bref, « l'élevage bovin s'enfonce dans la crise »[38], mais le constat est récurrent et s'inscrit dans une tendance de long terme.

L'élevage bovin subira également les impacts du changement climatique, et les risques de pénurie d'herbe en été vont s'accentuer. Le programme CLIMOUREL[39] montre que dans la plupart des situations, la gestion des ressources fourragères sera plus complexe, et qu'un stock fourrager important est une condition majeure de l'autonomie. La réduction du chargement peut être une solution, et l'extensification présente des limites.

Dans des territoires comme l'Indre, celui de notre exemple, la sortie au pâturage débutera plus tôt, la production d'herbe au printemps dans une vingtaine d'années sera plus importante qu'aujourd'hui et sans doute concentrée sur une période plus courte. En été, la croissance de la biomasse est totalement interrompue, le troupeau doit être mis à l'abri pour cause de canicule, et il est alimenté par de l'herbe de conservation. En automne a lieu une seconde sortie à la pâture, jusqu'à l'hiver.

36 Des scénarios prospectifs au service de l'élaboration d'une stratégie nationale : l'exemple du volet agricole des scénarios Énergie-Climat-Air, Centre d'Etudes et de Prospective n°89, Mai 2016. http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/analyse891605.pdf

37 Evolution des prairies et cultures fourragères et de leurs modalités culturales et d'utilisation en France au cours des cinquante dernières années, C. Huygues, Fourrages (2009) 200, 407-428

38 L'élevage bovin s'enfonce dans la crise, IDELE, 1er Juin 2016. http://idele.fr/services/publication/idelesolr/recommends/lelevage-bovin-senfonce-dans-la-crise.html

39 Voir http://climfourel.agropolis.fr/

Les variations de production – au cours de l'année et d'une année sur l'autre- sont plus élevées qu'actuellement, l'adaptation des ressources fourragères au troupeau, et réciproquement, est plus complexe. On cherche à « suivre la pousse de l'herbe », et à adapter le troupeau par la taille ou en pilotant les périodes de lactation. Mais ces différentes stratégies ont leurs limites et ne sont pas suffisantes pour assurer l'adéquation entre les besoins des animaux et la disponibilité fourragère. Il faudra également augmenter les stocks fourragers pour alimenter le troupeau non seulement en hiver, mais de plus en plus souvent en été, que l'on qualifie parfois désormais de « second hiver » du point de vue de la stratégie fourragère.

Enfin, il est important de préserver les prairies naturelles existantes pour en conserver la biodiversité spécifique à ces espaces. L'argument du stockage du carbone, systématiquement invoqué pour justifier le maintien de l'élevage bovin est discutable, car la conversion des prairies en forêt, en cas d'abandon de l'élevage, augmenterait le stockage de carbone dans la biomasse aérienne. La perte de prairies naturelles s'effectue en effet moins au profit des terres cultivées qu'à celui des landes et friches ou de la forêt.

Diminution du cheptel, nécessité de constituer des stocks, préservation des prairies naturelles : la résilience des élevages bovins peut passer par des systèmes plus herbagers, avec un chargement par hectare de surface fourragère plus faible.

Cette évolution autorise de nouvelles stratégies : par exemple la conversion des surfaces fourragères annuelles en cultures alimentaires, ou encore la valorisation des stocks périmés par méthanisation.

Dans un schéma de ce type, le cheptel est réduit et dimensionné pour ajuster ses besoins fourragers à la production des prairies naturelles les plus mauvaises années climatiques. Les surfaces dédiées aux cultures fourragères annuelles sont réduites au profit des céréales et protéagineux, et l'herbe de conservation provient autant que possible des prairies de fauche, enrichies en légumineuses si nécessaire.

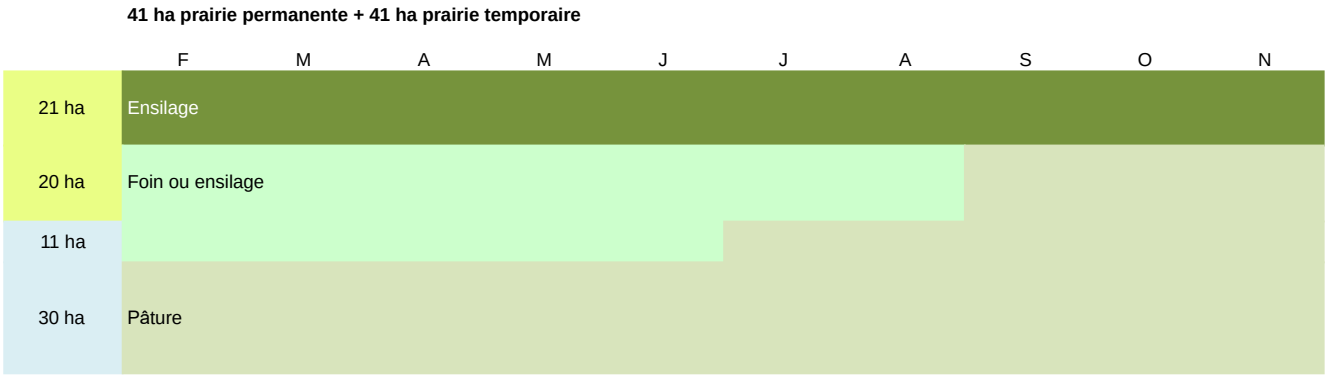
Dans le cas d'Aurélie et Nicolas Robin, dans le nouveau système, le troupeau a été divisé par 2. Les prairies permanentes, 41 ha sur les 125 de la SAU, sont intégralement conservées. Sur les terres labourables, la surface en cultures fourragères, prairies comprises, est divisée par deux, les surfaces de céréales et d'oléoprotéagineux passent de 43 à 64 ha. La rotation sur les terres labourables voit une succession de 3 années de luzerne, puis une orge, une culture de lin oléagineux, un blé tendre, à nouveau une orge. Des couverts intermédiaires sont implantés entre chaque culture annuelle.

L'approvisionnement fourrager du troupeau est assuré en totalité par les 42 ha de prairies permanentes. Le temps de pâturage augmente, la consommation de concentrés diminue, l'exploitation est en mesure de se passer totalement d'achats de tourteaux. La résilience face aux aléas climatiques est nettement augmentée, car le rapport entre la disponibilité totale de ressources fourragères et les besoins du troupeau est plus élevé. Les ressources fourragères sont également plus diversifiées grâce à la présence des cultures intermédiaires (Tableau et schéma ci-après).

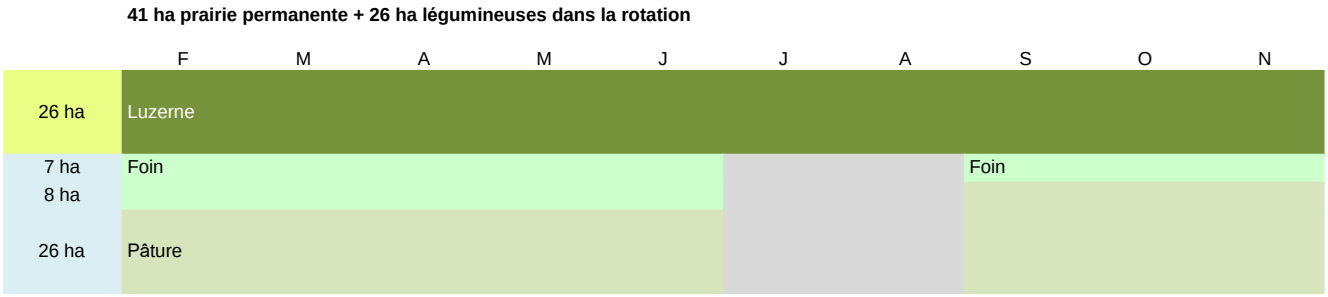
	Actuel		Futur	
	ha	tonnes	ha	tonnes
Céréales	33	140	48 (blé, orge)	146
Oléagineux	10	22	10 (lin)	25
Protéagineux	0		26 (pois)	65
Prairie temporaire et cultures fourragères	41	246		
Sous-total surface arable	*84*		*84*	
Prairie permanente	41	205	41	205
TOTAL	**125**	**614**	**125**	**513**

Tableau 3 : Assolement et production du GAEC d'Aurélie et Nicolas Robin. Situation actuelle et nouveau système proposé

Système initial : *41 ha de prairie permanente, avec fauches sur une partie au printemps ; 41 ha de prairies temporaires, en partie pâturées en automne.*



Nouveau système : *41 ha de prairie permanente, avec fauches sur une partie au printemps ; 26 ha de légumineuses.*



Rotation type sur les 84 ha de terres arables

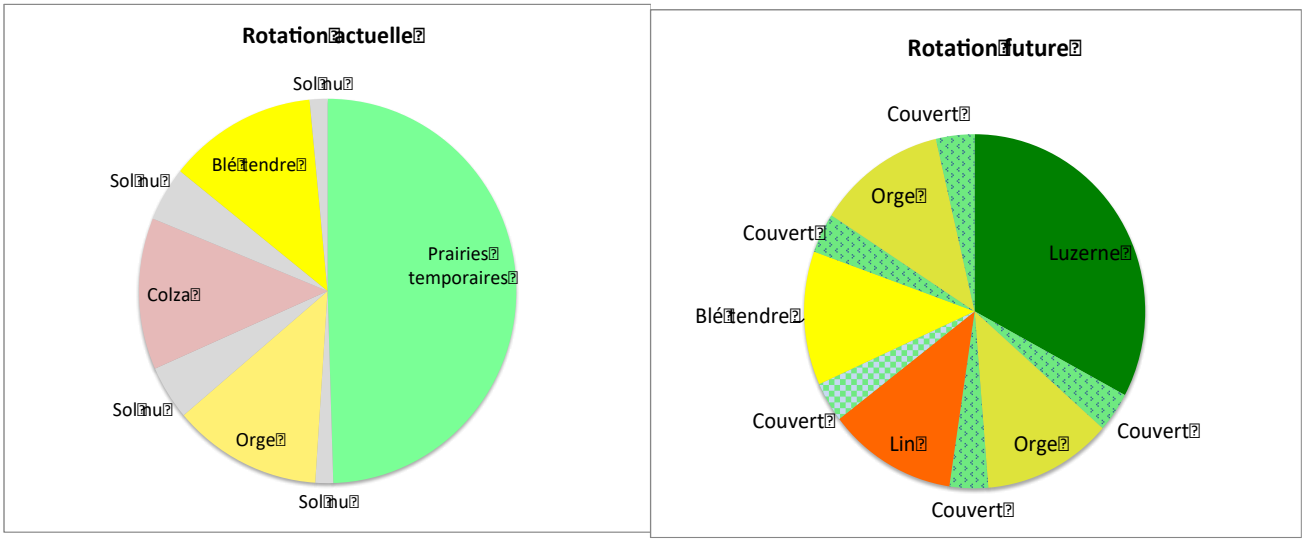


Figure 1 : Caractéristiques du système de production initial et du nouveau système

Le fait de disposer de stocks importants permet de s'affranchir des aléas de production, mais leur durée de conservation est limitée. Or ces stocks périmés peuvent parfaitement être utilisés en méthanisation, puisque les digesteurs ne souffrent pas de problème d'appétence. Le même raisonnement s'applique aux cultures intermédiaires : celles-ci, en système d'élevage bovin, contribuent à sécuriser le bilan fourrager. Le stock est constitué dans ce cas à la fois d'herbe (foin ou ensilage) provenant des prairies de fauche, de cultures intermédiaires, ainsi que de cultures fourragères annuelles. Il peut être utilisé aussi bien pour alimenter le troupeau, que pour alimenter le méthaniseur. En période de prix bas pour le lait ou la viande, l'agriculteur peut décider

de réduire les productions animales en attendant par exemple le retour de prix plus rémunérateurs. La production d'énergie lui offre un revenu complémentaire qui lui permet de passer plus facilement les périodes difficiles.

L'approvisionnement du méthaniseur est ici constitué du fumier, d'une partie de la paille de céréales, de l'herbe produite sur les 20 ha de prairies artificielles ou temporaires, et des cultures intermédiaires. Les cultures intermédiaires sont envoyées vers le méthaniseur ou vers l'alimentation du bétail en fonction des situations (Tableau 3).

	Production	Alimentation du troupeau	Méthaniseur
Fumier	40 tMS	-	40
Cultures intermédiaires	200 tMS	En cas de nécessité	Le solde éventuel non consommé
Herbe sur prairie naturelle, pâturée ou fauchée	205 t MS	205	Le solde éventuel non consommé
Herbe récoltée sur prairie artificielle ou temporaire	120 t MS	20 tMS	100 tMS
Résidus de culture	205 t MS	En situation de pénurie	80 t MS
TOTAL		225	220

Tableau 4 : Répartition de destination des cultures vers l'alimentation ou le méthaniseur

Les émissions de gaz à effet de serre passent de 514 à 244 tCO_2eq par an, ce qui est dû essentiellement à la diminution du cheptel. La production de méthane est de 7 m^3 par heure, ce qui est bien trop faible pour pouvoir disposer d'une unité de méthanisation à la ferme, d'autant que les besoins d'énergie directe sur l'exploitation sont faibles. Aurélie et Nicolas Robin sont donc associés dans un projet collectif territorial, avec une vingtaine d'autres agriculteurs. Le biométhane est injecté dans le réseau de gaz naturel et vendu à une compagnie publique de transports municipaux. La méthanisation couvre 16 fois les besoins énergétiques directs (carburants) et indirects (intrants) de l'exploitation, et les émissions évitées de CO_2 fossile par substitution énergétique sont supérieures aux émissions, ce qui rend cette exploitation agricole « à énergie positive » et « climatiquement neutre », même sans prendre en compte le stockage éventuel de carbone des prairies.

La fourniture d'azote symbiotique est suffisante pour se passer d'achat d'azote, organique ou minéral. Les émissions d'ammoniac sont réduites du fait principalement de la réduction du cheptel, mais aussi par l'amélioration des pratiques de fertilisation et d'épandage. Les changements dans la rotation permettent de réduire l'utilisation des produits phytosanitaires et de respecter le cahier des charges de l'Agriculture Biologique.

		Actuel	Futur	Différence (%)
Production récoltée	Tonnes de matière sèche	614	420	-32%
Consommation N minéral	tonnes N	6	0	-100%
Production N symbiotique	tonnes N	0,8	4,3	438%
Surplus N	tonnes N	1,2	1,4	17%
Émissions NH3	tonnes N	2,2	0,8	-64%
IFT	Nombre	2,4	0	-100%
Part de légumineuses	% surfaces assolement	16%	38%	138%
Consommation d'énergie	MWh	340	110	-68%
Production d'énergie	MWh	0	1710	-
Solde énergie Consommation - Production	MWh	-340	1600	-571%
Émissions de gaz à effet de serre	tonnes équivalent CO_2	514	244	-53%
GES évités par substitution	tonnes équivalent CO_2	0	345	-
Solde GES émissions - substitution	tonnes équivalent CO_2	-514	101	-120%

Tableau 5 : Comparaison des impacts des deux systèmes de production

Le méthaniseur est soumis aux aléas d'approvisionnement, comme le cheptel, particulièrement en cas de sécheresse prolongée. La stratégie de résilience repose ici sur la capacité à stocker des ressources sur la longue durée, ce que permet la méthanisation qui supporte une perte de l'appétence des fourrages due à un stockage prolongé. Faute de quoi le risque serait de donner la priorité au méthaniseur, pour des raisons économiques, au détriment de l'élevage.

Conclusion

Nous avons voulu à travers deux exemples, inspirés de situations réelles et projetés dans le futur, illustrer le rôle que pourrait jouer la méthanisation pour accompagner ces transformations, en s'inspirant de situations ou de réflexions issues du programme Méthalae. Il existe bien d'autres voies d'évolution de l'agriculture vers des systèmes plus durables et résilients, qui soient plus en adéquation avec les demandes sociétales, les enjeux socio-économiques et les défis environnementaux d'aujourd'hui. L'exploration de ces nouvelles voies a déjà commencé, on dispose désormais de nombreux exemples d'exploitations agricoles ayant intégré la méthanisation au cœur de l'agrosystème et qui cherchent à en tirer les meilleurs profits économiques et agronomiques.

Le programme Méthalae enseigne également que la pleine appropriation de la méthanisation demande du temps de mise au point, d'essais et de réglages. Les systèmes décrits ici ne sont que des photographies à un instant donné, il faudrait pouvoir décrire les trajectoires qui y ont abouti. Autre enseignement de Méthalae, il est difficile d'améliorer tous les paramètres en même temps. Certains indicateurs peuvent se dégrader quand bien même ils soient améliorés en majorité. La méthanisation est bien une technique au service d'un projet – un projet agricole, environnemental, social – et n'induit pas une orientation spécifique. Il revient aux acteurs concernés de l'utiliser aux fins qu'ils souhaitent. Dans ce sens, la méthanisation peut effectivement être un outil favorisant l'évolution ve rs l'agroécologie.

ARTICLE

Optimiser les services de l'interculture avec les Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique

S. Marsac[1], H Lagrange[1], C. Quod[1], M. Heredia[1], N. Delaye[2], F. Labalette[2], M. Bazet[4], EA. Sanner[1]

1 ARVALIS - Institut du végétal : Station Inter-Instituts, 6 ch de la côté vieille 31450 Baziège s.marsac@arvalis.fr

2 Terres Univia : 11 rue de Monceau CS 60003- 75 378 PARIS 08 – France n.delaye@terresunivia.fr

3 Terres Inovia : Station Inter-Instituts, 6 ch de la côté vieille 31450 Baziège v.lecomte@terresinovia.fr

4 Euralis : Avenue Gaston Phoebus 64231 Lescar marie.bazet@euralis.com

Résumé

La valorisation des cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE) est intégrée dans de nombreuses stratégies et prospectives nationales de transition énergétique. Cette valorisation permettrait d'ajouter de nombreuses fonctions économiques et environnementales à ces couverts d'interculture multiservices. Les références acquises au cours du programme OPTICIVE ont permis de proposer une première série de recommandations sur le management de ces séquences de 3 cultures en 2 ans. La place dans la succession de culture, le choix des espèces et des dates de semis sont des critères déterminants qui restent à régionaliser pour une maitrise approfondie de ces séquences. Ces CIVE insérées entre deux cultures alimentaires doivent toutefois être finement conduites pour réduire les risques et impacts dans la succession.

Abstract

National energy transition scenarios and prospective studies are based on Energy cover crops mobilisation in double cropping systems. The use of this biomass is a way to add economic and environmental functions to theses multi service cover crop. Experiments carried out during OPTICIVE program allowed to build the first crop management recommendations for these double cropping sequences. Their insertion into nowadays crop rotations, choice of the best species and sowing dates are decisive issues which have to be locally adapted for a good control of these systems. Between two food/feed crops, energy double crops have to be managed as primary crops, with specific recommendations (fertilisation) to decrease risk and impact across crop rotation.

Introduction

Le développement de l'usage de biomasse agricole notamment via des cultures énergétiques fait partie des scénarios de transition énergétique et de la stratégie nationale bioéconomie française (2017). Ces plans mettent en avant différents modes de valorisation de ces cultures. La voie de la méthanisation à la ferme est une des voies privilégiées.

Des objectifs ambitieux ont été fixés pour la production de biométhane à la ferme avec la création de 1000 installations de méthanisation agricole d'ici 2020 (Plan EMAA, 2013). La France comptait plus de 1000 projets de raccordement aux réseaux de transport et de distribution de gaz fin 2019.

Les cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE) représentent un enjeu majeur pour l'approvisionnement de ces méthaniseurs (ADEME et al., 2018) et pour le développement de l'agroécologie. En effet, face aux nombreux aléas climatiques entraînant la variation du cours des matières premières et aux exigences réglementaires et sociétales grandissantes (couverture des sols obligatoire en zone vulnérable, politique de réduction des intrants phytosanitaires), la valorisation des intercultures apparait comme un moyen de combiner efficacement résilience économique des systèmes d'exploitation (nouvelle source de revenus avec valorisation économique de couvert végétaux) et durabilité de ces systèmes (production d'énergie renouvelable, lutte contre les émissions de GES, etc.) (Justes, 2012 ; Berti, 2015 ; Martin, 2014 ; Goff, 2010 ; Heggenstaller, 2008).

Le potentiel de mobilisation de ces ressources est mis en avant dans différents scénarios (ADEME, 2009, 2012 ; Bardinal, 2014) avec un potentiel d'environ 20 millions de tonnes de matières sèches issues d'intercultures, soit une production d'énergie de l'ordre de 50 TWh PCS (ADEME et al., 2018). Cette évaluation s'appuie toutefois sur une généralisation des cultures intermédiaires dans la grande majorité des systèmes de production avec une hypothèse de récoltabilité de l'ordre de 50%, correspondant à une production de biomasse de plus de 4 t MS à l'hectare.

La séquence de trois cultures en deux ans inclue deux cultures alimentaires et une culture intermédiaire pour l'énergie dans l'objectif de maintenir la production alimentaire. Cette séquence de trois cultures constitue un ensemble d'études, pour intégrer les effets d'une des cultures de cette séquence sur les autres. En effet, cette séquence inclue une première culture alimentaire, dont le management peut être adapté afin de garantir les conditions de réussite de l'interculture valorisée en énergie, et la culture alimentaire suivante. Le cycle de production d'une culture alimentaire est généralement inférieur à un an et ces systèmes de double culture sont une opportunité pour optimiser les cycles de production. Cette séquence de culture s'inscrit dans une succession plus longue. Si de nombreuses expérimentations ont été conduites sur les CIVE (Expé CIVE - ADEME, CIBIOM - fonds ENERBIO 2010 - 06), peu d'entre elles travaillaient sur l'ensemble de la séquence de 3 cultures en 2 ans (Marsac, 2014 ; Szerencsits, 2014 ; Graß, 2013), prenant ainsi en compte l'efficience de la culture sur le plan énergétique mais aussi les effets de la culture précédente et ceux sur la culture suivante.

Les projets tels Expé-CIVE (Psilor, 2012) ou CIBIOM (Marsac, 2015) ont mis en avant l'intérêt de ces séquences de cultures avec une forte variabilité de production et le besoin de :

- Réduire les coûts de ces ressources en biomasse ;
- Optimiser la conduite de culture afin de réduire les risques et coûts : travail du sol dans la séquence, choix des espèces et optimisation des cycles de développement… ;
- Mieux apprécier les facteurs de risque sur ces séquences de culture : structure de sol, alimentation hydrique, climat…).

Plusieurs axes de questionnement sont étudiés à l'échelle du système de production par Arvalis, en partenariat avec la filière oléoprotéagineuse (Terres Univia et Terres Inovia dans le cadre du GIE GAO les associant à ARVALIS) : (i) quels systèmes de culture seront les plus efficients et le moins en concurrence avec le débouché alimentaire, (ii) à quelle(s) échelle(s) territoriale(s) valoriser ces cultures et pour quels enjeux, (iii) Quels besoins des différents acteurs de la filière et du territoire ?

L'optimisation de la conduite des séquences de trois cultures en deux ans alliant productions alimentaires et non alimentaires a été travaillée dans le programme Opticive (2016-2019 coordonné par le GIE GAO en partenariat avec Euralis et soutenu par l'Ademe) dans l'objectif de proposer des recommandations sur la conduite des séquences de culture.

Les CIVE d'hiver sont des intercultures semées à l'automne et récoltées au printemps avant implantation d'une culture alimentaire d'été (maïs, tournesol, sorgho). Cette séquence interroge notamment sur l'impact de la culture intermédiaire sur la culture alimentaire suivante (alimentation hydrique, techniques d'implantation). C'est en effet un compromis entre la production de la CIVE et l'implantation de la culture suivante au printemps qui doit être recherché. Les CIVE d'été sont quant à elles implantées suite à une culture d'hiver récoltée tôt (orge d'hiver voire pois d'hiver ou colza) et avant une autre culture alimentaire d'hiver ou de printemps (céréales à paille, protéagineux…).

Mais de nombreuses questions sont posées : quelles sont les espèces ou associations d'intérêt pour la production de biomasse et de biométhane dans ces séquences ? Leurs dates d'implantation et de récolte conditionnent elles leur potentiel de production et leur pouvoir méthanogène ? Ce potentiel est-il conditionné par la fertilisation ? Quel risque ou quel intérêt peuvent représenter les CIVE avec des séquences de 3 cultures en 2 ans sur le carbone organique des sols ? Dans quelle mesure la conduite des CIVE, consommatrices d'eau, impacte-elle le rendement des cultures alimentaires de la succession ? Peut-on généraliser les résultats acquis ou faut-il adapter ces premières recommandations ?

Cet article positionne les séquences de culture étudiées, les expérimentations et observations mises en œuvre pour répondre à ces interrogations avant de présenter les résultats et premières recommandations. Les perspectives d'extrapolation et de travaux complémentaires sont également abordées.

Matériels et méthodes

Contexte de l'étude

Les expérimentations du projet Opticive ont été conduites dans le Sud-Ouest de la France dans deux conditions contrastées vis-à-vis de l'alimentation hydrique :

- *En conditions peu limitantes (Béarn - 64) avec des précipitations abondantes, des hivers doux et étés chauds. Les sols étudiés sont représentatifs du secteur avec une partie argilo limoneuse humifère profonde (Touyas), puis d'autres sols plus limoneux à limono argilo sableux (boulbènes)(Tableau 1).*
- *En situations plus contraintes (Coteaux argilo-calcaire du Sud-Ouest- Lauragais-31) avec des conditions séchantes, des hivers plus frais et étés chauds. Le sol de ce site d'expérimentation est de type argilo-calcaire, colluvial (Tableau 1).*

Ces conditions climatiques offrent a priori une opportunité de développement de systèmes de double culture, étudiés dans le Sud-Ouest pour des productions alimentaires. L'impact de ces conditions pédoclimatiques sur le bilan hydrique et la production de chacune des cultures de la séquence est un des indicateurs à étudier. C'est pourquoi la majorité des sites ont été finement caractérisés.

Ces deux régions agricoles sont marquées par des successions de culture dominées par le maïs plus à l'ouest ou par les céréales à paille et tournesol dans les coteaux argilo-calcaires.

Les séquences suivantes ont pu être étudiées :

- *Céréales à paille (blé tendre et/ou blé dur) / CIVE Hiver / Sorgho ou Tournesol (succession type a) ;*
- *Maïs grain / CIVE Hiver / Maïs grain ou soja (succession type b) ;*
- *Orge Hiver (ou blé tendre) / CIVE été / Blé tendre (succession type c) ;*
- *Raygrass / maïs (type d).*

Les dispositifs expérimentaux

L'expérimentation de ces séquences de 3 cultures en 2 ans exige la prise en compte de dimensions annuelles et pluriannuelles : conduite de chacune des cultures et impacts positifs ou négatifs de chacune d'entre elles sur la précédente ou la suivante (état hydrique du sol, structure du sol selon les opérations culturales, pression adventices et ravageurs…).

Pour cela, trois types de dispositifs ont été mis en œuvre au cours du projet Opticive :

- Des essais dits analytiques avaient pour objectif d'améliorer les techniques de culture de la succession : screening espèces et associations, dates de semis, fertilisation, potentiel méthanogène. Ils étaient conduits sous forme de bandes de plusieurs centaines de m² (avec ou sans répétition mais avec duplication des mesures sur 4 répétitions de placettes de 0.25 m²) et des micro parcelles (10m² environ).
- Des essais de type analytique sur une séquence de culture permettaient d'évaluer l'impact d'une des cultures ou mode de conduite sur la culture suivante. Par exemple, l'évaluation de l'impact de CIVE d'hiver sur la culture alimentaire suivante, ou celui d'un mode de travail du sol sur les résultats techniques de la séquence de culture. Ce type de dispositif était conduit sous forme de bandes de culture avec ou sans répétition.
- Des essais dits « systèmes » ont également été valorisés pour apprécier l'impact de ces séquences de culture dans des systèmes plus longs et diversifiés. Ces essais systèmes concernaient les dispositifs Syppre® mis en œuvre dans le cadre d'une collaboration inter-instituts : ARVALIS, Terres Inovia, Institut Technique de la Betterave. Ces plateformes d'essais « systèmes » ont pour objectif de tester et comparer des systèmes de culture innovants afin d'améliorer leur performance économique et environnementale. Ces systèmes sont comparés à des systèmes témoin de chacune des régions d'étude. Ils ont été co-construits avec les agriculteurs, acteurs de la recherche et du développement pour répondre à ces enjeux de performance avec une contrainte environnementale majeure pour chacun des sites. 5 plateformes ont été installées en France. Deux ont été mobilisées pour ce projet OPTICIVE à Vieillevigne en coteaux argilo-

calcaire du Sud-Ouest (Lauragais, 31) et dans le Béarn (64) (Annexe I). Ces sites sont constitués de bandes de culture de plusieurs centaines de m² avec répétition. Des observations de placettes et mesures sur la bande entière sont réalisées.

Caractéristiques	Lauragais (31)	Sendets/ Burros (64)	Castétis/ Larreule (64)	Lay Lamidou (64)	Uzan (64)
Type de sol	Sol colluvial calcaire-rédoxique	Touyas	Limons profonds/moyens	Touyas	Boulbènes (Limon argilo sableux)
RU (mm)	110-120 (Syppre)	150/175	120-140 /100-120	150	
Pluviométrie (mm)					
Moyenne (18 ans)	688	1144	1144	1144	1144
2016	591	1149	1149	1149	1149
2017	647	998	998	998	998
2018	946	1202	1202	1202	1202
Facteurs testés					
2016	Screening espèces (CIVE hiver) Dates de semis	Screening espèces (CIVE hiver/été)	Screening espèces (CIVE hiver) Fertilisation (CIVE hiver) Impact CIVE sur la culture principale d'été (maïs ensilage)	Screening espèces (CIVE hiver) Dates de semis	Screening espèces (CIVE été)
2017	Screening espèces (CIVE hiver) Partition biomasse Travail du sol et suivi de la culture principale d'été : sorgho semé en semis direct ou strip till	Screening espèces (CIVE hiver/été) Partition biomasse Fertilisation (CIVE hiver) Pouvoir méthanogène (CIVE hiver)	Screening espèces (CIVE hiver/été) Fertilisation (CIVE hiver/été)		
2018	Screening espèces (CIVE hiver) Partition biomasse Travail du sol et suivi de la culture principale d'été : sorgho semé en semis direct ou strip till	Screening espèces (CIVE hiver/été) Partition biomasse	Screening espèces (CIVE hiver)		

- *Tableau 1 : Caractéristiques des sites expérimentaux et facteurs étudiés dans les essais OPTICIVE*

Une partie des essais analytiques a été conduite en périphérie (bordures des parcelles ou parcelles adjacentes) des essais systèmes Syppre ® afin d'améliorer les connaissances sur la conduite de ces essais pluriannuels. La caractérisation initiale de ces sites orientés système est aussi beaucoup plus fine.

Pour l'étude des dates de semis de CIVE dans l'objectif d'atteindre une biomasse optimale à la récolte sans impact majeur sur la culture suivante, deux essais (pour les successions type a et b) ont comparé un semis précoce (fin septembre –début octobre) à un semis plus tardif proche des recommandations pour les espèces travaillées (20/10 -1/11). En raison de conditions climatiques sèches en automne sur les campagnes d'essais, les semis ont souvent dû être décalés dans l'attente des pluies afin de garantir une levée homogène (objectif 20/09 et 10/10, mais 10 à 15 jours de décalage ont souvent été observés). La conduite des dispositifs Syppre ®, a aussi été confrontée à des contraintes matérielles retardant les dates objectives.

Pour l'alimentation minérale, des essais en microparcelle avec répétition ont été conduits sur le site de Castetis avec différentes modalités de fertilisation azotée (sans azote, 40 kg N/ha ou 80 kg N/ha). D'autres essais mobilisant les digestats ont été conduits sous forme de bande sans répétition mais avec des mesures de placettes répétées au sein de chaque bande. Ces dispositifs intégraient des témoins non fertilisés et des modalités fertilisées avec des engrais minéraux. Les mesures de concentration en azote des plantes et du sol avaient pour objectif d'évaluer les coefficients d'équivalence engrais (Keq) et coefficients apparents d'utilisation (CAU) (« Guide méthodologique Réseau PRO » 2015)

Les observations détaillées

Plusieurs dates d'observation de biomasse aérienne ont été réalisées sur les CIVE d'hiver - 15/03 – 1/04 et 20/04 environ - afin d'évaluer leur dynamique de croissance. Un second objectif était aussi d'implanter la culture suivante au plus tard le 1/05 : Des mesures de la biomasse aérienne totale ont été effectuées ainsi que des pesées de la totalité des récoltes machine avec mesure de la hauteur de récolte.

La matière sèche aérienne récoltée selon la hauteur dans la plante a également été mesurée sur CIVE d'hiver, en relation avec le projet SOLEBIOM, afin de caractériser le poids des chaumes qui restent au sol selon la hauteur de récolte. Les étages de biomasse de 0-10 cm, 10-20 cm 20-30 cm et au-delà ont été mesurés sur des dispositifs analytiques et Syppre®. Ces mesures visent notamment à paramétrer des modèles de simulation de l'état organique des sols tels qu'AMG (Clivot et al. 2019; Andriulo, Mary, et Guerif 1999). Le modèle a récemment été mis à jour dans le cadre du programme Solebiom avec une amélioration du paramétrage pour différentes cultures alimentaires. Des mesures spécifiques de masse racinaire ont été également réalisées dans les expérimentations Opticive sur l'essai analytique du Lauragais, en CIVE d'hiver 2017, afin de paramétrer ces nouvelles cultures. Pour cela des prélèvements de sol sur 0.25 m² sur la profondeur maximale de travail de sol (0.5*0.5*0.3 cm environ avec relevé exact de chaque volume prélevé) ont été réalisés dans chacune des bandes étudiées et répétés 4 fois. Ces mottes prélevées à la bèche ont ensuite été lavées et tamisées afin d'obtenir la masse racinaire.

La caractérisation des densités apparentes des sites Syppre® permet d'évaluer le niveau des réservoirs utiles et facilement utilisables (RU et RFU en mm) (Doussan, collectif RUEdesSOLS, et Cousin 2017). L'humidité pondérale du sol a été ainsi mesurée à chaque date d'observation de biomasse aérienne sur 3 horizons : 0-30 cm, 30-60 cm et 60-90 cm.

Les reliquats azotés ont pu être mesurés aux même dates, ainsi qu'en entrée et sortie hiver sur les essais systèmes Syppre® et leurs essais analytiques adjacents en 2017 et 2018. Ces dispositifs permettent de comparer des concentrations en azote et l'humidité du sol sous les CIVE d'hiver et en système témoin sur sol nu.

Des échantillons de biomasse ont été collectés et séchés à basse température (96h – 65°C) pour l'analyse du pouvoir méthanogène en méthode conventionnelle selon un plan d'analyse préétabli. Les analyses inter espèces ont été réalisées majoritairement par le laboratoire ITE et 3 échantillons par l'IRSTEA afin de réduire les biais de répétabilité inter laboratoire (Cresson et *al*., 2015). L'impact du stade de récolte sur ce pouvoir méthanogène a été analysé par 1 seul laboratoire avec l'utilisation d'un inoculum identique pour chacune des espèces étudiées et pour les 3 dates de récolte.

Traitement des données

Le traitement statistique des résultats d'essais s'est fait à plusieurs niveaux. Pour les essais « systèmes » de type Syppre, les répétitions conduites permettent de comparer des systèmes entre eux. Ainsi des analyses de variance peuvent être conduites sur les résultats d'une même culture dans deux systèmes différents.

Pour les essais analytiques conduits sous forme de bande, en parallèle de ces essais systèmes, ou autres essais (Vieillevigne, Larreule, …), seuls les rendements obtenus sur l'ensemble des bandes peuvent être comparés. Des mesures biologiques réalisées sur quelques placettes par bande ne permettent pas une représentativité suffisante de l'ensemble de cette bande. Seules les récoltes « machine » peuvent être analysées statistiquement, mais l'absence de répétitions dues à la lourdeur des expérimentations et la place disponible, réduit la force de ces analyses.

D'autres essais analytiques en micro-parcelle (Castetis) ont pu être analysés avec un traitement statistique classique (analyse de variance).

Le regroupement de ces essais est ainsi très complexe et ne permet d'analyse statistique globale. Ce sont des analyses descriptives basées sur la comparaison d'essais et sur la fréquence de résultats dans différents essais qui ont pu être conduites. Cette étape interroge néanmoins sur l'adaptation des dispositifs pour la suite des travaux. Des propositions seront détaillées en discussion.

L'état organique des sols et l'alimentation hydrique des CIVE ont été travaillés à partir d'outils et modèles de simulation.

L'état organique d'un sol s'observe à travers la quantité, la qualité et la répartition dans le sol de la Matière Organique (MO) (Duparque et al. 2007). Le modèle AMG permet de fournir des résultats sur ce premier point (Clivot et al. 2019). En effet, l'évolution de l'état organique des sols doit s'observer à long terme. Le récent développement des CIVE et de la méthanisation ne permet pas d'avoir des essais long terme sur lesquels s'appuyer. La modélisation est donc d'un réel appui pour ces évaluations a priori.

Ce modèle prend en compte les données climatiques, les apports de matières organiques via les résidus de culture, interculture ou produits organiques et caractéristiques initiales du sol. Différents jeux de simulation prenant en compte successions de culture et types de sol (Tableau 2) ont été construits à partir des expérimentations conduites afin d'être représentatifs de la région étudiée.

Nom du cas type	Choix du sol	Cultures dans la rotation	CIVE	Travail du sol
A	Terreforts moyens	Sorgho – Orge d'hiver	Cive d'hiver avant le sorgho -5q/ha pour le sorgho	Labour 25 cm
B	Terreforts moyens	Blé – Orge d'hiver – Maïs grain irrigué	Cive d'hiver avant le maïs grain ; -10q/ha pour le maïs	Labour 25 cm
C	Boulbènes	Blé – Orge d'hiver – Maïs grain irrigué	Cive d'hiver avant le maïs grain ; -10q/ha pour le maïs	Labour 25 cm
D	Terreforts moyens	Blé – Orge d'hiver – Maïs grain irrigué	Cive d'été après l'orge	Labour 25 cm

Tableau 2 : Cas type de simulation du stock de carbone organique avec AMG dans des successions avec CIVE

Dans les simulations réalisées, les pailles sont restituées et enfouies.

Les rendements moyens sont utilisés pour que le modèle calcule les allocations de biomasse entre le grain et les parties végétatives aériennes. Ces rendements sont issus de références départementales afin d'être représentatifs de types de sols et de la région considérée (Tableau 3).

A	Sorgho : 55q/ha	Orge d'hiver : 65q/ha	CIPAN : 2 tMS/ha	CIVE : 6tMS/ha	
B	Blé tendre d'hiver : 60q/ha	Orge d'hiver : 65q/ha	Maïs grain : 110q/ha	CIPAN : 2 tMS/ha	CIVE : 6tMS/ha
C	Blé tendre d'hiver : 60q/ha	Orge d'hiver : 65q/ha	Maïs grain : 110q/ha	CIPAN : 2 tMS/ha	CIVE : 6tMS/ha

Tableau 3 : Rendements moyens des cultures des cas types construits pour les simulations AMG du programme OPTICIVE

Deux digestats issus d'unités de méthanisation avec une mobilisation majeure de CIVE ont été caractérisés (Tableau 4) après prélèvements et échantillonnage au plus près des dates d'apport : composition chimique, fractionnement biochimique de la matière organique de ces digestats et minéralisation du carbone à 3 jours pour la détermination de l'ISMO[40]. Ces valeurs ISMO sont proches et se rapprochent également des données obtenues dans d'autres projets comme VADIMETHAN.

	Code échantillon	Produit	pH	MS (%MB)	MO (%MB)	CO (g/kg MB)	Ntot (g/kg MB)	N-NH_4 (g/kg MB)	P_2O_5 (g/kg MB)	K_2O (g/kg MB)	ISMO (% MO)
Digestat 1	776966	Digestat brut issu de méthanisation de lisier porc + déchets verts + CIVES + déchets abattoir	7.7	5.38	3.7	18.5	4.2	1.3	1.6	4.5	71.4
Digestat 2	777054	Digestat brut issu de méthanisation de CIVES + mâles maïs semence	9.8	5.71	4.3	21.5	5.4	3.2	3.1	2.0	62.3

Tableau 4 Composition chimique des digestats analysés essai OPTICIVE
(MB=Matière Brute, MS=Matière Sèche, MO=Matière Organique, CO=Carbone organique, Ntot=Azote Total)

Des simulations de l'évolution de l'état organique des sols ont été réalisées sur la base de ces hypothèses sur 100 ans.

Le niveau de réserve en eau des sols permet d'apprécier un risque de stress hydrique pour la culture en place ou la culture suivante. Le réservoir utile (RU) et ses composantes : réservoir facilement utilisable (RFU) et difficilement utilisable (RDU) (Doussan, collectif RUE des SOLS, et Cousin, 2017) sont plus ou moins bien connus selon les types de sol. L'estimation du remplissage de ces réservoirs a été réalisée via des bilans hydriques, avec des niveaux de réserves variables suivant l'enracinement des cultures. Les besoins en eau des plantes ont été évalués à partir de coefficients culturaux de référence, comme le blé pour les CIVE d'hiver à base de céréales en associations avec céréales majoritaires. L'état des réservoirs facilement utilisables ou difficilement utilisables a été évalué à la récolte des CIVE particulièrement et suivi après implantation des cultures alimentaires suivantes.

Des mesures d'humidité pondérale des sols ont également été réalisées pour évaluer ce remplissage des réservoirs du sol. Les caractérisations initiales des sols, notamment des plateformes Syppre ont permis de mesurer les densités apparentes de sols qui permettent de convertir ces humidités pondérales en niveau de réserve.

40 Indice de Stabilité de la Matière Organique

Résultats et premières recommandations

Les espèces et associations d'espèces

Les CIVE d'hiver ont été semées entre le 1/10 et le 3/11 et récoltées fin avril (autour du 24 avril dans le Lauragais succession type a). Ces dates de récolte sont plus variées dans le Béarn (succession type b) : mi-avril pour les graminées annuelles à fin mai pour des raygrass (succession type d). Tous les essais ont été fertilisés avec 40 à 80 kg N/ha en sortie hiver.

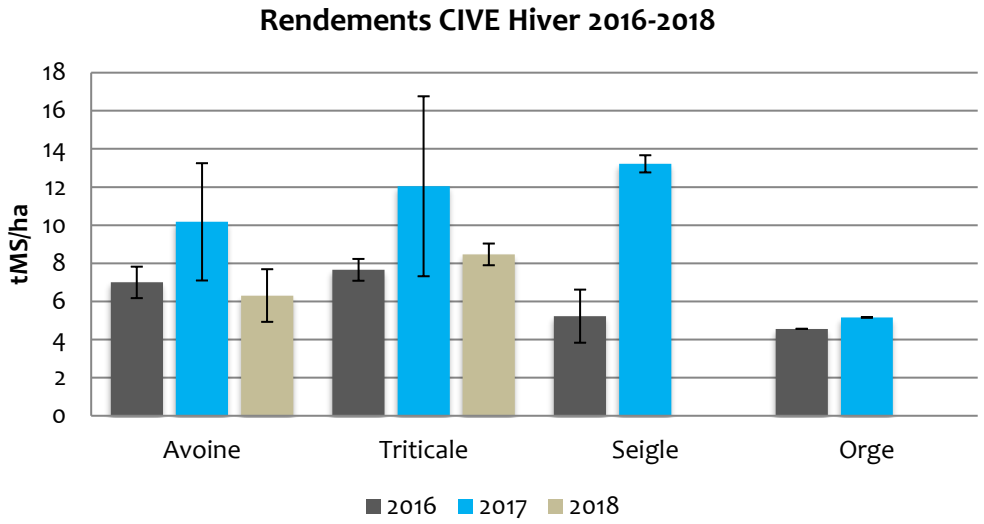


Figure 1 : Rendements biologiques moyens et variabilité interannuelle de la biomasse aérienne totale par espèce de CIVE Hiver 2016 - 2018 – ensemble des essais Opticive

Le regroupement des données fait ressortir de fortes différences de rendement d'une année sur l'autre avec les meilleurs rendements obtenus en 2017 toutes espèces confondues (Figure 1). L'avoine est l'espèce la plus productive sur les 3 années des plateformes d'essais systèmes, alors que le triticale ressort sur la totalité des autres dispositifs. Des différences de dynamique de croissance ont pu être notées entre années : 2017 la montaison a été plus précoce qu'en 2018, marquée par des biomasses plus élevées en sortie hiver mais avec des cultures qui se sont peu développées ensuite (non montré).

Les mesures des fractions de biomasse aérienne et souterraine de CIVE ont été réalisées en 2017 (Figure 2) et 2018. Le premier tronçon de 10 cm au-dessus du sol représente plus de 1 $tMS.ha^{-1}$. Avec les équipements de récolte mobilisés sur les essais, la hauteur de coupe était en moyenne de 15 cm. Le poids des chaumes non récoltés représente dans ces conditions de récolte près de 2 $tMS.ha^{-1}$. Les racines quant à elles représentent également près de 2 $tMS.ha^{-1}$ sur les trente premiers centimètres. Ces quantités de biomasse aérienne restituées par les résidus de récolte sont équivalentes à la biomasse moyenne d'une CIPAN enfouie avec une conduite classique (semée dès la récolte jusqu'à début septembre et détruite en entrée hiver).

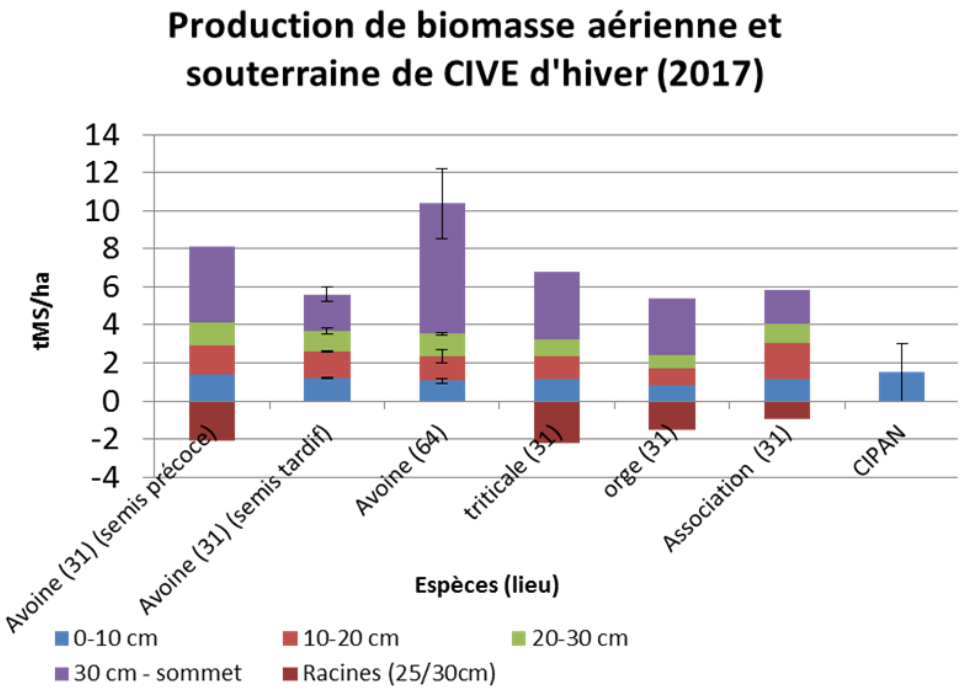


Figure 2 : Production de biomasse aérienne et souterraine de CIVE d'hiver 2017. La biomasse racinaire n'a pas été systématiquement mesurée (valeurs manquantes sur le graphique) (31 – essai dans le Lauragais ; 64 essai dans le Béarn).

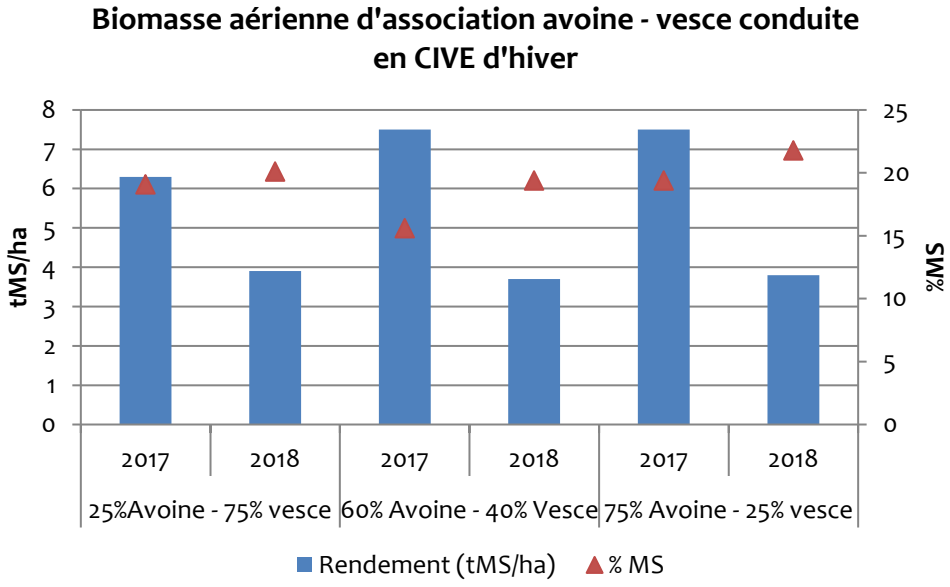


Figure 3 : Rendements en biomasse aérienne de CIVE d'hiver en association – 2017 et 2018 OPTICIVE (Castetis, 64 ; Euralis)

Les légumineuses pures produisent des biomasses inférieures aux graminées pures (Rapport final programme CIBIOM) mais l'association des deux espèces ne pénalise pas le rendement en biomasse avec une proportion de 20 à 40% de légumineuses. Cette proportion est dépendante de la graminée, de son port et développement hivernal mais aussi de l'espèce de légumineuse. Des espèces à développement précoce sont préférables.

Des semis précoces pour un compromis

Les tests de plusieurs dates de semis ont permis d'observer leur impact sur la production de biomasse, malgré les contraintes d'implantation mentionnées plus haut. Dans le Béarn (Figure 4) en 2016 avec un semis le 20 septembre 2015 (D1) comparé au 10/10/15 (D2), pour une même récolte le 12/04/16, le semis précoce permet une production de 2 à 5 t MS/ha de plus que le semis du 10/10/2015. Ce constat est valable pour l'ensemble des espèces testées et a pu être confirmé sur les semis 2016 du site Syppre® coteaux argilo-calcaire et de son essai analytique adjacent.

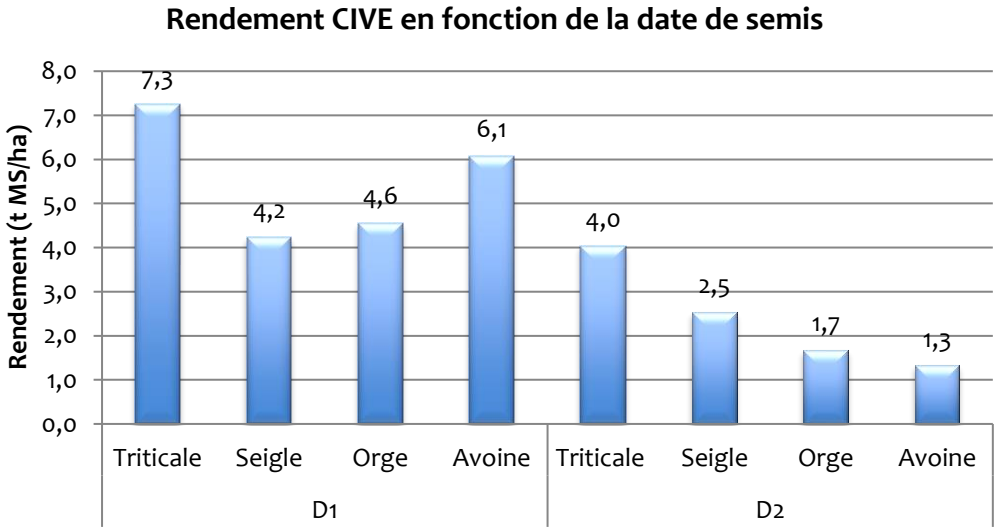


Figure 4 : Rendement CIVE d'hiver en fonction des dates de semis, OPTICIVE 2016, Lay Lamidou (64) – D1 : 20/0915 – D2 : 10/10/15

Pour les CIVE d'été également les semis précoces sont une condition essentielle pour atteindre des rendements satisfaisants économiquement (voir article 2). Les risques d'une faible production sont très élevés au-delà du 10/07. Le choix de la culture précédente est essentiel à cette implantation de CIVE d'été (Chambre d'agriculture du Loiret, 2012). Des séquences de culture avec orge d'hiver voire pois protéagineux d'hiver ou colza dans certaines régions sont donc plus favorables à cette insertion.

Une fertilisation adéquate pour optimiser la production de biomasse

La comparaison d'espèces conduite sur le site de Castetis (64) a permis d'observer des modalités avec apport de 80 kg N/ha (du redressement début montaison selon les espèces) ou sans fertilisation azotée (Figure 5). Cet apport d'azote occasionne systématiquement une production supérieure de biomasse de 2 à 4 t MS/ha selon les espèces étudiées. Cet effet a pu être confirmé les années suivantes du programme.

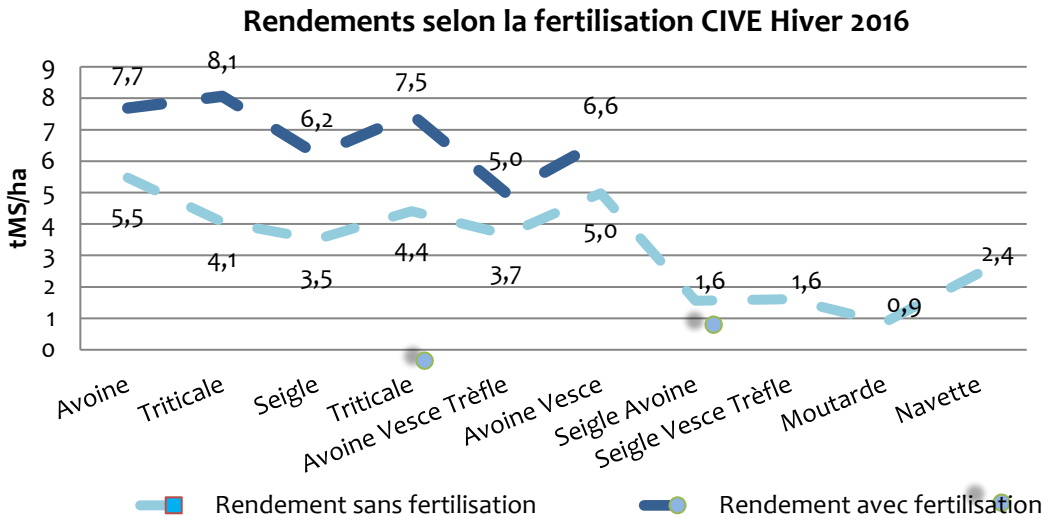


Figure 5 : Effet de la fertilisation sur le rendement en biomasse aérienne de CIVE d'hiver 2016 ; OPTICIVE (Castetis, 64), semis 23/10/2015-Récolte 12/04/16

Ces observations sont identiques en CIVE d'été avec l'intérêt confirmé d'une fertilisation. Cet apport est toutefois dépendant des conditions d'alimentation hydrique pour les CIVE d'été. Des travaux complémentaires sont nécessaires pour mieux connaitre et justifier les doses nécessaires.

La valorisation des digestats pour cette fertilisation est une opportunité qui a pu être testée et confirmée. Les conditions d'application sont essentielles pour une bonne valorisation, à l'image des autres produits résiduaires organiques.

<u>Prélèvements d'eau et d'azote, impact sur la culture suivante.</u>

Les reliquats azotés 2017 légèrement inférieurs à ceux d'un sol nu (- 6%) pourraient confirmer la capacité des CIVE à jouer leur rôle de couverts d'interculture piège à nitrate. C'est également le cas pour les CIVE d'été avec des niveaux de reliquats inférieurs au système de référence étudié sur Syppre ® Béarn (monoculture de maïs avec mulch : 90kg N/ha e 2017 et 45 kg N/ha en 2018) (Figure 7).

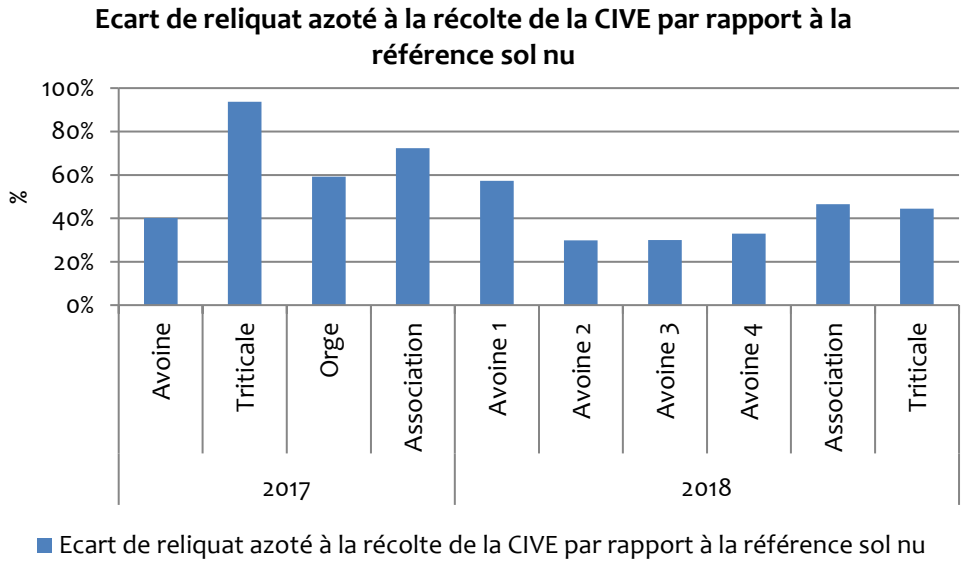


Figure 6 : Rapport de reliquat azoté à la récolte de la CIVE et un sol nu (fertilisée au printemps) sur l'essai Syppre® en coteaux argilo-calcaire du Lauragais, OPTICIVE.

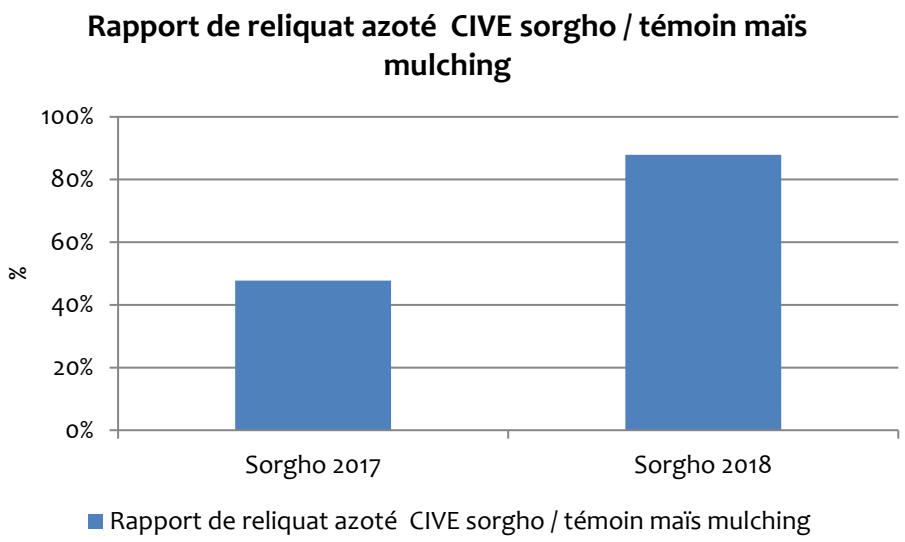


Figure 7 : Rapport de reliquat azoté à la récolte d'une CIVE sorgho (fertilisé 46 kg N/ha) et d'un maïs mulching (fertilisé) sur l'essai Syppre® Béarn, OPTICIVE

Les mesures d'humidité pondérale à la récolte des CIVE d'hiver (fin avril) confirment une consommation totale du réservoir facilement utilisable et une partie du réservoir difficilement utilisable[41] dans le Lauragais (Figure 8) et la quasi-totalité du réservoir facilement utilisable dans le Béarn. Dans tous les cas, les différences de réservoir entre espèces sont très faibles. Ces mesures confirment la consommation en eau des CIVE à cette période où les besoins des plantes sont maximaux.

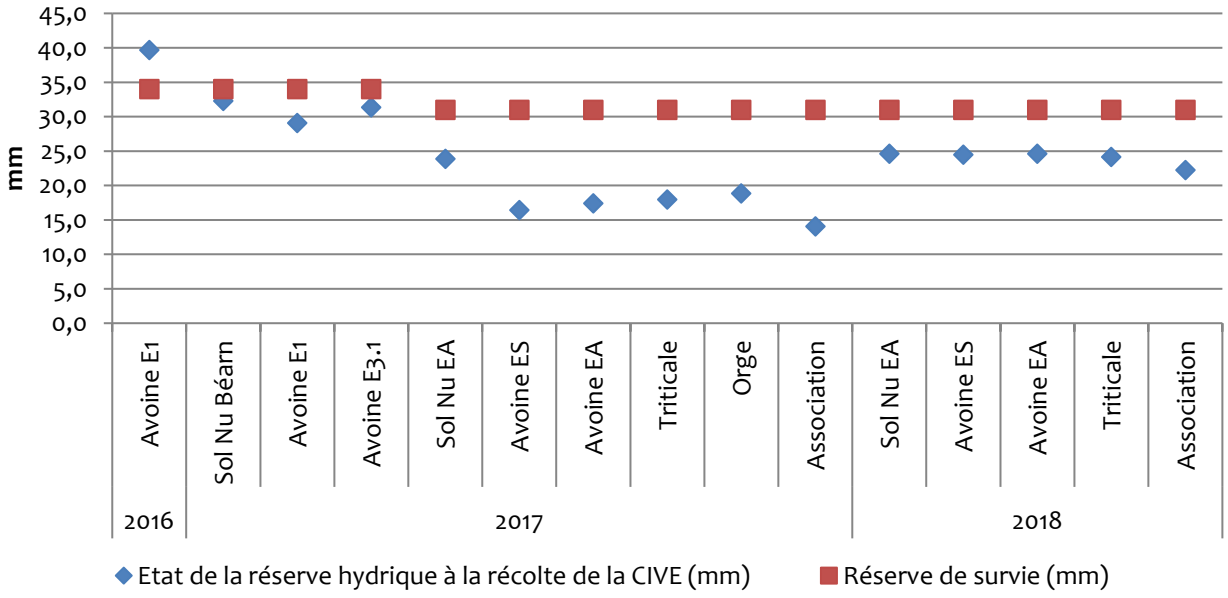


Figure 8: Eau disponible à la récolte de la CIVE d'hiver sur les dispositifs analytique et systèmes Syppre ® Béarn et coteaux argilo-calcaire du Lauragais dans le cadre d'OPTICIVE – EA : Essai Analytique ; ES Essai Système – Sol nu : référence observée sur sol sans couverture végétale pour une même date d'observation.

41 Part du réservoir utile (RU) plus difficilement utilisable par les plantes. Il s'agit de la différence entre le réservoir utile (totalité de l'eau accessible par les racines) et le réservoir facilement utilisable par les racines.

Cet assèchement de la réserve par les couverts est une source potentielle d'impact sur le rendement de la culture suivante. Des bilans hydriques ont été réalisés sur la séquence de culture, avec réinitialisation et correction de l'état initial de la réserve de la culture suivante à partir des mesures à la récolte de la CIVE précédente. Ces bilans confirment l'assèchement du réservoir utile à la date de récolte des CIVE (Figure 8). L'enracinement maximal et un fort indice foliaire expliquent cette forte consommation en eau. Toutefois sur les campagnes du projet Opticive, un rechargement de cette réserve hydrique du sol sur le mois de mai a été noté (Figure 9).

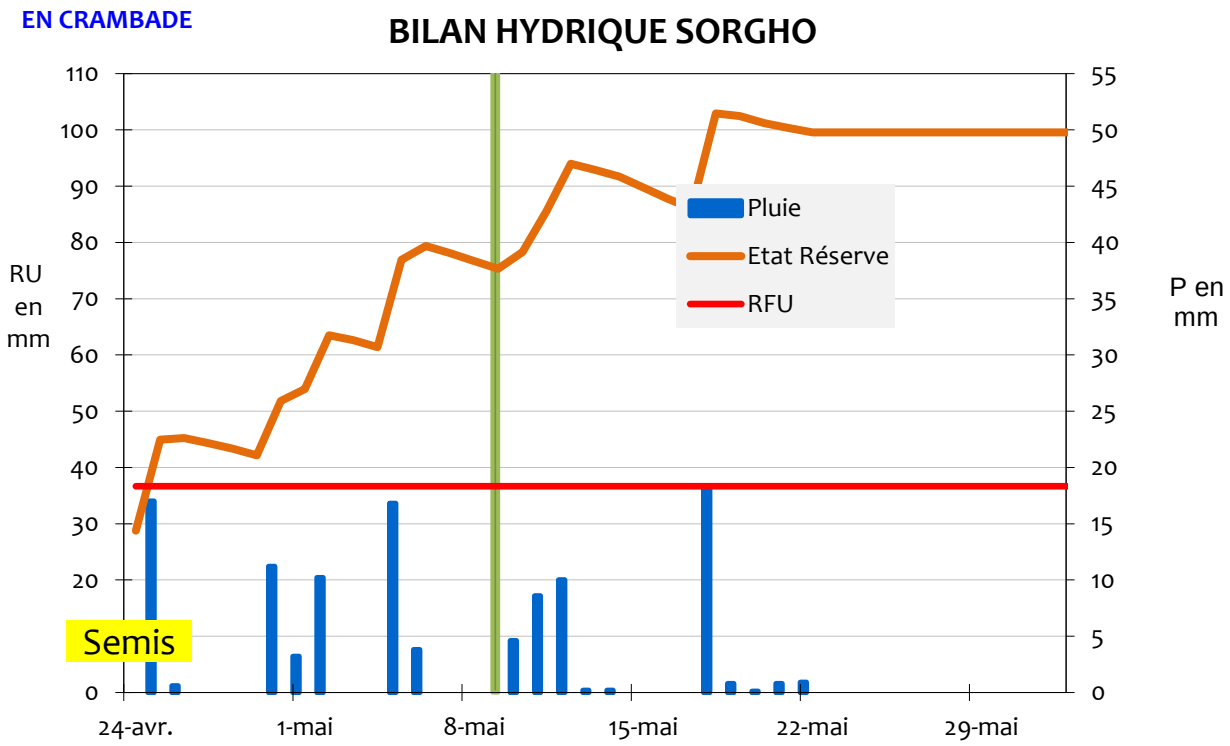


Figure 9: Etat de la réserve hydrique (RU- réservoir utile) pour un sorgho semé après CIVE d'hiver sur un sol argilo-calcaire en 2017 (Syppre® Lauragais) ; la ligne horizontale représente la valeur du réservoir difficilement utilisable.

Un impact de 0.9 t.ha^{-1} de grain a pu être mesuré sur le dispositif Syppre® Béarn. Le semis de variétés plus précoces après CIVE et le décalage de la date de semis de 10 à 15j par rapport à la référence en monoculture de maïs grain avec mulching explique majoritairement cet écart de rendement.

La problématique de l'alimentation hydrique est différente après CIVE d'été avec un retour des pluies et une recharge hivernale des réservoirs du sol. En revanche l'impact sur le drainage devra être évalué.

Espèce et pouvoir méthanogène

Des échantillons de biomasse ont été collectés sur toutes les expérimentations conduites au cours du projet Opticive et ajoutées aux premières références du projet Cibiom. Un plan d'analyse a ensuite été construit avec l'objectif de .

- comparer des pouvoirs méthanogènes (BMP) entre espèces ;
- mesurer l'évolution de ce BMP pour quelques espèces de CIVE d'hiver selon le stade de récolte.

L'analyse de ces BMP (litre CH_4.kgMV^{-1}) ne permet pas de différencier les espèces et facteurs de variabilité.. Un grand nombre d'échantillons (plus de 100 par espèce) serait nécessaire pour différencier ces espèces et variétés.

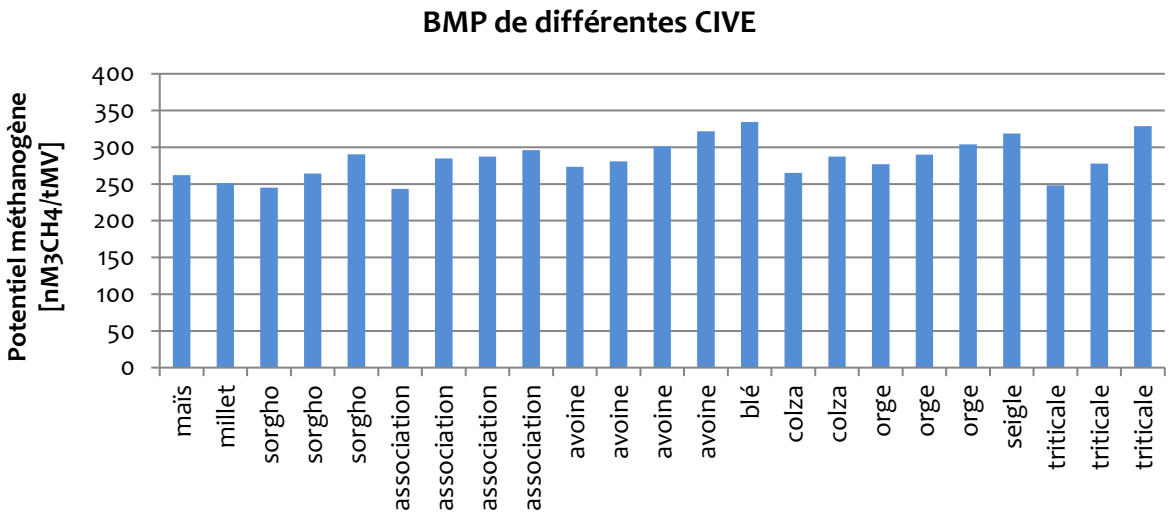


Figure 10 : Pouvoir méthanogène (BMP) de 23 échantillons de CIVE

Le BMP diminue au cours de la montaison de ces céréales (de 300 à 260 Nm³ CH_4.tMS^{-1})[42] mais ces différences restent encore inférieures aux incertitudes laboratoire qui existaient. La production supplémentaire de matière sèche permet d'obtenir des rendements en méthane nettement supérieurs avec ces récoltes plus tardives (épiaison 25/04 environ) : 2000 à 2500 Nm³ CH_4.ha^{-1} pour une récolte à l'épiaison des CIVE.

Ces résultats traduisent le besoin de rechercher une production maximale de biomasse. Cette recherche de productivité en relation avec l'optimisation de la conduite est également une voie d'intensification des services environnementaux (émission GES, stockage de carbone et efficience énergétique).

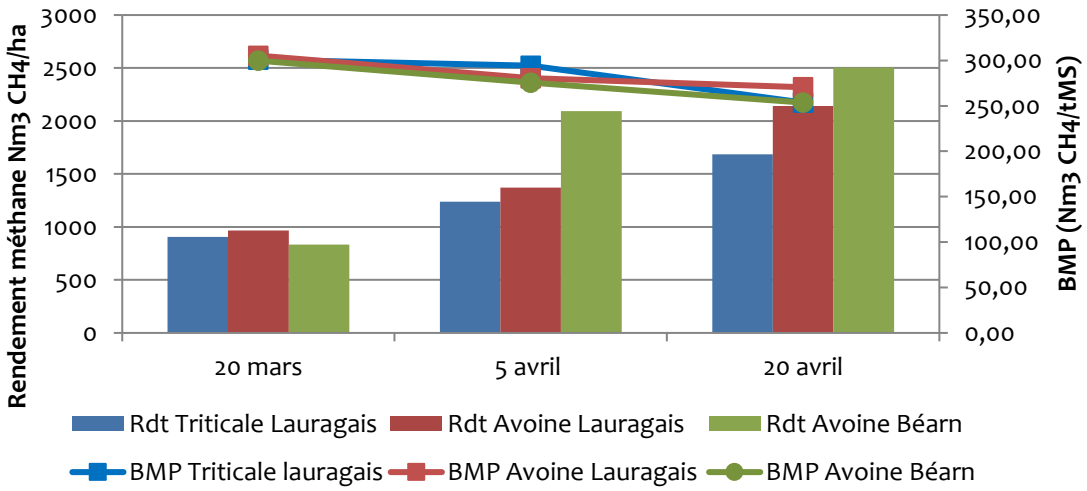


Figure 11 : Pouvoir méthanogène unitaire (BMP) et rendement méthanogène à l'hectare d'avoine et de triticale conduits en CIVE selon le stade de développement, OPTICIVE.

CIVE et carbone du sol

L'impact de la récolte des CIVE sur le stock de carbone des sols est une question fondamentale pour les agriculteurs comme pour les institutionnels.

42 Normo mètres cube de méthane. Il s'agit de l'unité de référence pour la mesure de ce volume de biométhane, dans des normes de température et de pression.

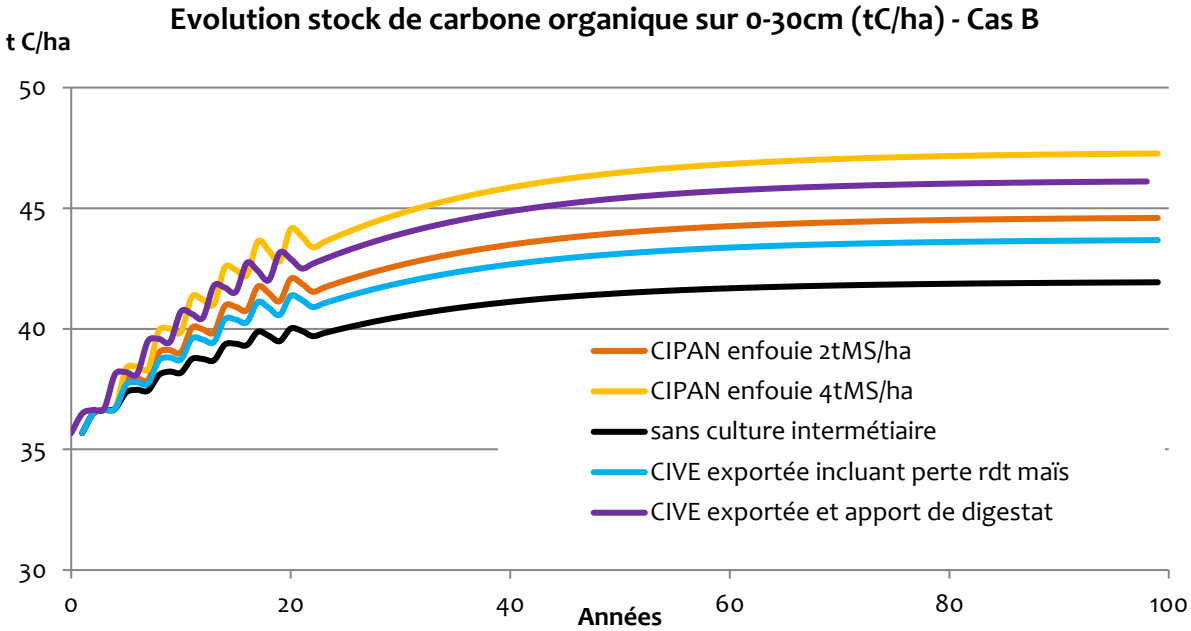


Figure 12: Evolution du stock de carbone organique du sol sur 0-30 cm de profondeur pour le cas type B de simulation Opticive.

Les simulations conduites confirment l'intérêt des couverts pour l'amélioration de l'état organique des sols. Des cas de couverts non récoltés (CIPAN enfouie) permettent de stocker du carbone en comparaison à un sol nu (figure 12). Pour les couverts récoltés de type CIVE, leur long développement permet d'obtenir des biomasses racinaires importantes (de l'ordre de 2tMS/ha) (Figure 2), supérieures à des biomasses de CIPAN détruite 3 mois après semis. La biomasse contenue dans les chaumes (2tMS/ha pour 15cm) participe également à une amélioration de l'état organique des sols dans tous les cas simulés dans le projet Opticive (ex. du cas B Tableau 2). Des simulations ont également été conduites au cours du projet Solebiom avec des conclusions identiques :

- ➔ La CIVE, bien qu'exportée, permet de stocker du carbone, du fait de la présence des racines et des chaumes (Figure 2) ;
- ➔ Sans apport de digestat, le stock de carbone après CIVE exportée est légèrement inférieur au stock avec une CIPAN enfouie, mais supérieur à un sol nu (résultats intimement dépendants des rendements estimés pour les CIPAN et les CIVE) ;
- ➔ L'apport de digestat sur CIVE restitue du carbone au sol. Le système avec CIVE et digestat permet un stockage de carbone supérieur à la situation avec CIPAN enfouie (résultats intimement dépendants des rendements estimés pour les CIPAN et les CIVE).

Discussion

Les conditions technico-économiques actuelles peuvent inciter à optimiser la production de CIVE (tarifs de rachat de l'énergie attractifs sur 15 ans) au détriment des cultures alimentaires (forte variabilité de prix, charges élevées…) avec un recul de la date de récolte des CIVE. En effet, en dépit de la forte variabilité observée, une conduite de culture adaptée des CIVE peut assurer une production satisfaisante (de 4 à plus de 10 tMS/ha) et une rentabilité indispensable à certaines explotations. Cet équilibre entre les productions avec une veille sur la bonne complémentarité entre les usages alimentaires et non alimentaires est fortement discuté et surveillé aujourd'hui.

La consommation en eau des différentes cultures de la succession était une des hypothèses majeures de cet impact, notamment la consommation des CIVE d'hiver avant culture d'été. Les observations, mesures et simulations réalisées viennent pondérer cette hypothèse. En effet, le mois de mai est historiquement un des mois les plus arrosés de l'année sur de nombreuses régions françaises. Le rechargement de la réserve dans de nombreuses situations après la récolte des CIVE, limiterait donc l'impact sur la culture suivante. Le déficit hydrique à la levée reste un facteur de risque pour les cultures alimentaires estivales suivantes, mais ne serait pas exclusif ou majoritaire. Cet impact pourrait être causé par d'autres facteurs : retard d'implantation de la culture suivante et changement de précocité, difficulté d'implantation ou concurrence de repousses de CIVE à la levée, difficulté d'enracinement… L'influence du changement climatique sur le régime hydrique de ces séquences de culture demandera à être évalué régionalement.

Ces résultats obtenus au cours du programme Opticive ont permis d'appréhender dans deux situations pédoclimatiques contrastées les grands facteurs de variabilité et de conduite des cultures. Les 3 années d'expérimentations ont aussi été l'occasion de se confronter à une forte variabilité qu'il est nécessaire d'intégrer pour la construction de recommandations. Toutefois, le nombre de séquences potentiellement testées est vite restreint sur des programmes de recherche de 3 ans. Les références d'une séquence peuvent être rapidement perdues ou difficilement valorisables avec ces risques météorologiques plus forts ces dernières années. Les résultats demanderont à être confirmés avec des observations à plus long terme. Comme l'incertitude météorologique, l'impact du changement de séquences de culture sur l'ensemble d'un système ne peut en effet se voir qu'à moyen terme : impact sur la pression adventice, la portance des sols.... Les dispositifs mis en œuvre dans le programme Opticive ont intégré ce besoin avec des observations sur les essais système. Mais le suivi chez des agriculteurs méthaniseurs est aussi une opportunité à valoriser pour de futures recommandations et améliorations des évaluations.

La diversité des essais réalisés, analytique et système aété une force et resteindispensable pour l'étude de ces séquences de culture. Toutefois, les modalités testées et les différences de dispositifs complexifient l'analyse et le regroupement des données. La présence d'un tronc commun de modalités et de méthodes d'observations uniformisées sont des pré-requis indispensable à la poursuite de l'acquisition de références. En effet, lors de la communication des résultats de ces travaux Opticive, de nombreux acteurs en charge d'expérimentation ont confirmé une trop large diversité des méthodes et approches d'expérimentation. Les observations en grandes parcelle se multiplient et exigent comme pour les essais analytiques des méthodes et recommandations pour le regroupement, l'analyse et l'extrapolation des résultats d'essais. C'est face à ces enjeux que des propositions ont été faites dans la cadre du projet RECITAL qui visera à établir des recommandations régionalisées.

Les essais instrumentés réalisés en situations contrastées sont aussi une voie vers la modélisation qui permettra de mieux identifier et quantifier les risques pour des méthaniseurs. Ces risques sont se situent tant au niveau de la production afin de garantir un approvisionnement en substrats, que d'autres éléments de la conduite de culture afin d'apporter les recommandations pour un développement durable de cette nouvelle filière risques de lixiviation selon les stratégies de valorisation des digestats : apports d'automne, sortie hiver sans possibilité d'enfouir...

Pour cela, les expérimentations devront être conduites dans différentes régions afin de mieux quantifier la variabilité de production et d'identifier les principaux facteurs de variabilité. Cette extension des observations sera aussi un moyen de valider les extrapolations permises par la modélisation. Les retours d'expérience des agriculteurs méthaniseurs qui produisent des CIVE sont aussi des sources d'information et d'adaptation à valoriser.

Mais face aux incertitudes climatiques, aux changements de réglementations, de mécanismes de soutien et face à de nouvelles attentes sociétales, la dimension multiservice de ces cultures devra être approfondie. En effet, les enjeux sont forts en termes de lutte contre les adventices et bioagresseurs. L'identification des mécanismes (alléolopathie, biofumigation…) à l'origine de ces services est également indispensable afin de construire au mieux les systèmes de culture de demain.

Le levier de la génétique, avec l'adaptation d'espèces et de variétés à ces séquences de double culture constitue un enjeu fort pour demain. Cette amélioration variétale est également une opportunité d'adaptation au changement climatique. L'augmentation des températures peut réduire la durée de cycle des cultures, laissant plus de place aux intercultures.

L'enjeu carbone est un autre service non négligeable qui devra être approfondi. Le Tableau 5 reprend les principales interprétations des changements de pratiques simulés sur le carbone du sol. La comparaison des pratiques sans CIVE et avec CIVE permet d'évaluer l'effet réel de la présence et de la valorisation de cette interculture. Ces premiers résultats confirment les opportunités de ces systèmes pour développer la couverture des sols dans une logique agronomique, environnementale mais aussi économique. Mais les risques générés par ces systèmes de culture sont loin d'être négligeables. Si des économies de charges peuvent être attendues à moyen terme, la rémunération de ces externalités comme le stockage de carbone, la réduction des émissions de GES ou autres facteurs d'impact sur est certainement un autre axe de travail pour accompagner et sécuriser le développement de ces pratiques agroécologiques.

C'est en effet la combinaison de ces leviers agronomique, climatique, génétique et environnemental qui pourra orienter la conception des systèmes de culture et systèmes de production de demain, au cœur de la bioéconomie.

Question posée	Remarques
Quel est le rôle d'un couvert type CIPAN dans le stockage du carbone	La présence d'une CIPAN et le retour au sol des résidus permettent de stocker du carbone
Quel est l'effet dela production d'une CIVE en comparaison de celle d'une CIPAN	Les CIVE enfouies, permettent de stocker plus de carbone que les CIPAN. En effet, leur production de biomasse est plus importante.
L'introduction d'une CIVE d'hiver pouvant impacter sur le rendement de la récolte suivante, quel est l'effet de cette perte de rendement sur le stockage du carbone	Si la CIVE entraine une diminution de rendement de la culture suivante, le stockage du carbone en est légèrement impacté
Quel est l'impact de l'exportation de la CIVE	Lorsque la CIVE est exportée, en comparaison au cas où elle est restituée, le potentiel de stockage du carbone diminue. Mais cette situation est à comparer à une CIPAN enfouie.
Quel est l'impact d'apports de digestats dans le système	Les digestats 1 et 2 donnent des résultats similaires. L'apport de digestat permet bien de stocker du carbone.
Quel est le bilan final de la comparaison entre l'état initial (CIPAN enfouie) et la rotation avec CIVE exportée et apport de digestats	Les tendances vont à l'augmentation des stocks. L'exportation de la CIVE avec apport du digestat n'entraine pas une diminution du stockage du carbone par rapport à la pratique de restitution des CIPAN.

Tableau 5 : analyse comparative des simulations d'évolution des stocks de carbone organique avec CIVE ; modèle Arvalis-AMG V6.1 dans le cadre d'OPTICIVE

Références bibliographiques

- ADEME. 2012. Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050 – Synthèse
- ADEME. 2009. Methanisation agricole et utilisation de cultures énergétiques en codigestion, avantages/inconvénients et optimisation.
- ADEME, 2018, Un mix de gaz 100% renouvelable en 2050 ? – Synthèse
- Bardinal M., La biomasse dans le mix énergétique- Vision énergétique 2030-2050 de l'Ademe. Séminaire ANCRE-ALLENVI Place de la biomasse dans la transition énergétique. Disponible sur le site Internet de l'INRA: http://www6.inra.fr/bioeconomie/Seminaire-du-13-mars-2014
- Berti, M.T., Johnson, B.L., Gesch, R.W, Samarappuli, D., Ji, Y., Seames, W.,Kamireddy, S.R. 2013. Forage sorghum: an excellent feedstock for second generation biofuels in the North Central Region of the USA. p. 160–165. In 21stEuropean Biomass Conf. and Exhibition. 2–6 June, 2013, Copenhagen, Denmark, Available at www.etaflorence.it/proceedings (verified 12.10.14).
- Clivot, Hugues, Jean-Christophe Mouny, Annie Duparque, Jean-Louis Dinh, Pascal Denoroy, Sabine Houot, Françoise Vertès, et al. 2019. « Modeling Soil Organic Carbon Evolution in Long-Term Arable Experiments with AMG Model ». Environmental Modelling & Software 118 (août): 99-113. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.04.004.
- Andriulo, Adrian, Bruno Mary, et Jérôme Guerif. 1999. « Modelling Soil Carbon Dynamics with Various Cropping Sequences on the Rolling Pampas ». *Agronomie* 19 (5): 365-77. https://doi.org/10.1051/agro:19990504.
- Clivot, Hugues, Jean-Christophe Mouny, Annie Duparque, Jean-Louis Dinh, Pascal Denoroy, Sabine Houot, Françoise Vertès, et al. 2019. « Modeling Soil Organic Carbon Evolution in Long-Term Arable Experiments with AMG Model ». *Environmental Modelling & Software* 118 (août): 99-113. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.04.004.
- Cresson, Romain, Sébastien Pommier, Fabrice Beline, Théodore Bouchez, Pierre Buffière, Jesús Andrés Cacho Rivero, Camacho Patricia, et al. 2015. « Etude interlaboratoires pour l'harmonisation des protocoles de mesure du potentiel méthanogène des matrices solides hétérogènes ». In *Journées Recherche Industrie Biogaz et Méthanisation*. Rennes, France. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01958139.
- Doussan, Claude, . collectif RUEdesSOLS, et Isabelle Cousin. 2017. « La Réserve Utile : concepts, outils, controverses ». In *Atelier du RMT Sols et Territoires*, 40 p. Orléans, France. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01595478.
- Duparque, Annie, Hubert Boizard, Nathalie Damay, Jean-luc Julien, Christine Leclercq, et Bruno Mary. 2007. « Evolution de l 'état organique du sol a l'échelle de la parcelle ». In *GEMAS-COMIFER Les 8èmes rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre*, 1-16.
- « Guide méthodologique Réseau PRO ». 2015. Ademe. www.rmt-fertilisationetenvironnement.org.
- Goff, B.M., Moore, K.J., Fales, S.J., Heaton, E.A., 2010. Double-cropping sorghum for biomass. Agron. J. 102, 1586–1592.
- Graß R., Heuser F., Stülpnagel R., Piepho HP., Wachendorf M ; 2013 ; Energy crop production in double-cropping systems : results from an experiment at seven sites; European Journal of Agronomy ; 51; p120-129.
- Heggenstaller, A.H., Anex R.P., Liebman M., Sundberg D.N., Gibson L.R; 2008; Productive and nutrient dynamics in bioenergy double cropping systems. Agronomy Journal. 100, 1740-1748.
- Justes E. et al. 2012. « Réduire les fuites de nitrate au moyen des cultures intermédiaires ». Rapport d'expertise INRA.

- Marsac, S., Labalette, F., Laboubee, C., Sausse, C.; French double cropping systems assessment for both biogas and food use; 2014 ; Biogaz Science 2014; Conference proceedings – Oral presentation
- Marsac S., Labalette F., Sausse C., Laboubée C., Multicriteria assessment of French cropping systems including energy catch crops, Proceedings of the 23th European Biomass Conference & Exhibition, Vienne, Austria 1-4 June 2015
- Martin, M., 2014. A bioenergy feedstock/vegetable double-cropping system. Ind. Crops Prod. 59, 223–227. Doi: 10.1016/j.indcrop.2014.05.025
- MEDDE, MAAF, Le Plan Energie Méthanisation Autonomie Azote (EMAA); 2012.
- Psilor E., Etude sur champ des potentiels agronomiques, méthanogènes et environnementaux des cultures intermédiaires à vocation énergétique – Projet ExpéCIVE 2012 – ADEME – Rapport Août 2013.
- Szerencsits M. et al., 2014, Biogas from cover crops – energy yield and EROEI, Biogas Science 2014, Vienna, Processdings.

Autres références

- Chambre d'agriculture du Loiret : « Etude sur l'intérêt des cultures Cives pour la méthanisation en région Centre ». 2012. Disponible auprès de la CA du Loiret

Programmes de recherche cités

Opticive (2015/2018) : soutenu par l'Ademe, animé par le GIE GAO (ARVALIS – Institut du végétal – Terres Univia - Terres Inovia) en partenariat avec Euralis

CIBIOM (2011/2013) : soutenu par le Fonds Enerbio (Fondation Tuck), animé ARVALIS - Institut du végétal en partenariat avec le CETIOM et Solagro.

Solebiom : soutenu par le PIVERT – programme GENESYS, animé par Agro-Transfert ressources et territoires, en partenariat avec INRA et terres Inovia, et avec la participation du GIE GAO.

Expé-CIVE (2013/2014) : soutenu par l'ADEME animé par Méthaneva en partenariat avec Caussade semences

ARTICLE

Les cultures intermédiaires à vocation énergétique : de l'évaluation technico-économique et environnementale à la construction des axes de travail régionalisés pour favoriser leur développement

S. Marsac[1], M. Heredia[1], N. Delaye[2], F. Labalette[2], V. Lecomte[3], M. Bazet[4]

1 ARVALIS - Institut du végétal : Station Inter-Instituts, 6 ch de la côté vieille 31450 Baziège s.marsac@arvalis.fr

2 Terres Univia : 11 rue de Monceau CS 60003- 75 378 PARIS 08 – France n.delaye@terresunivia.fr

3 Terres Inovia : Station Inter-Instituts, 6 ch de la côté vieille 31450 Baziège v.lecomte@terresinovia.fr

4 Euralis : Avenue Gaston Phoebus 64231 Lescar marie.bazet@euralis.com

Résumé

La valorisation des cultures intermédiaires pour l'énergie (CIVE) est une opportunité fréquemment mise en avant dans les scénarii de transition énergétique et agroécologique. Les références acquises au cours du programme OPTICIVE ont permis d'évaluer techniquement, économiquement et environnementalement ces nouvelles ressources dans différents scénarios. Malgré une production variable et coûteuse de ces CIVE dans des systèmes de 3 cultures en 2 ans, leur valorisation permet d'ajouter des fonctions économiques et environnementales aux couverts d'interculture, améliorant de nombreux indicateurs des exploitations (efficience énergétiques, GES). L'analyse conjointe de ces résultats avec les acteurs de la filière a permis d'identifier différents axes de travail dans de grands bassins de production pour améliorer les connaissances et l'intérêt de ces ressources.

Abstract

Energy cover crops mobilisation in double cropping systems is included in different energy and agroecology transition scenarios. These resources were assessed from OPTICIVE résults into different scenarios from a technic, economic and environmental point of view. . Despite a variable and expensive production, valorisation of energy cover crops in double cropping systems adds new economic and environmental functions to cover crops, improving global farm assessment (energy efficiency, GHG). A common analysis of these results with stakeholders was carried out to identify and prioritize further works to improve knowledge, management and sustainability of these ressources.

Introduction

La valorisation des couverts d'interculture pourrait compléter leurs services écosystémiques (Justes et Richard 2017 ; Berti, 2015 ; Martin, 2014 ; Goff, 2010) par des fonctions économiques et environnementales. Cette valorisation non alimentaire est envisagée dans différents scénarios de transition énergétique notamment via la méthanisation.

Les enjeux sur ces cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE) sont forts pour accompagner le développement de cette filière (ADEME et *al.*, 2018) et pour le développement de l'agroécologie : enjeux sur la qualité de l'eau, sur l'économie circulaire, les émissions de gaz à effet de serre (GES) ou encore la résilience des exploitations agricoles.

Face aux nombreux substrats potentiels de méthanisation, la mobilisation de ces CIVE interroge sur leur compétitivité et la rentabilité qu'elles peuvent apporter aux exploitations agricoles. Mais les questions sont aussi nombreuses sur leur efficience énergétique. En effet, plus de 1000

projets d'injection de biométhane étaient enregistrés fin 2019, mobilisant une part croissante de CIVE.

Insérées entre deux cultures alimentaires, ces CIVE peuvent impacter la conduite et la productivité des cultures précédente et suivante (Cf article 10 de ce numéro). La séquence de ces 3 cultures produites sur 2 ans constitue ainsi la base de l'évaluation de ces systèmes.

L'évaluation multicritère permet de caractériser les systèmes de culture et systèmes d'exploitation mobilisateurs de ressources en biomasse avec des indicateurs techniques (temps de travail, pression phytosanitaire, consommation de carburant…), économiques (produit brut, marges brute, nette, coûts de production…) et environnementaux (émissions GES, efficience énergétique, stockage de carbone…). Elle repose sur différentes hypothèses de conduite de culture, de matériels associés, de production. Elle peut être conduite à différentes étapes d'une chaine de valeur : au champ, rendu site de valorisation et en sortie d'unité de méthanisation.

Les expérimentations conduites au cours de projets de recherche ont permis une première évaluation de ces séquences de 3 cultures en 2 ans (Marsac, 2014 ; Szerencsits, 2014), séquences intégrées dans des successions de culture plus longues, elles même composantes de systèmes de culture. En dépit de leur intérêt en termes d'approvisionnement, le coût de production de ces ressources était élevé, mais leur intérêt environnemental confirmé.

Le projet Opticive a permis d'améliorer les connaissances sur la conduite de ces séquences de culture (Marsac et *al*., 2019) et d'en préciser l'évaluation dans un contexte politique et réglementaire différent (complément de prix de rachat de l'énergie avec la valorisation de CIVE). Ces références permettent d'améliorer les évaluations technico-économiques et environnementales de ces successions.

Pour cela, des scénarios d'insertion des CIVE dans les systèmes de culture ont été définis. Une évaluation multicritère a été réalisée puis présentée à des groupes d'agriculteurs avec les premières recommandations techniques issues du projet Opticive. Des travaux de groupe ont ensuite permis de définir, avec ces producteurs, les voies d'amélioration de ces systèmes, tant dans la conduite des cultures, que dans leur valorisation. Cet article rappelle les méthodes et scénarios d'évaluation mis en œuvre tant au niveau de la culture, des séquences de culture que du système de production avant d'en présenter les résultats. L'animation des travaux de groupe est ensuite rappelée avant de synthétiser les axes de travail issus de ces concertations régionales.

L'évaluation multicritère des séquences de culture avec CIVE

L'évaluation multicritère peut être réalisée en plusieurs étapes : à l'échelle de la culture, de la séquence de culture, de l'unité de méthanisation et du système d'exploitation agricole (ou système de production) associant une ou plusieurs exploitations agricoles à une unité de méthanisation.

Méthode d'évaluation

A l'échelle de la parcelle et de la séquence de culture, ces évaluations ont été réalisées avec l'outil Systerre® (Jouy et *al*., 2010), un outil d'évaluation conçu par ARVALIS - Institut du végétal, partagé avec d'autres instituts-techniques. Il est destiné à évaluer les performances techniques, économiques et environnementales des productions végétales. L'évaluation se fait à l'échelle souhaitée par l'utilisateur : parcelle, système de culture ou exploitation. Les indicateurs restitués ne sont pas agrégés (

Tableau 1), permettant à l'utilisateur de gérer l'évaluation de ceux-ci. Néanmoins, le diagnostic réalisé avec cet outil s'arrête à la sortie de la parcelle, il ne prend pas en compte le stockage de la biomasse et sa valorisation. D'autres outils sont alors mobilisés pour ces étapes. C'est par

exemple le cas de Méthasim® pour des hypothèses de coût d'investissement et de fonctionnement d'unités de méthanisation. Cet outil Méthasim® aide à déterminer l'intérêt économique de projets de méthanisation agricole. Il a été réalisé en partenariat avec l'IFIP et intègre l'outil DIGES, développé par l'IRSTEA, qui permet d'estimer les économies de GES réalisées grâce à la méthanisation. Les références techniques et économiques pré-renseignées sont toutefois modifiables.

Systerre® intègre de nombreuses bases de données de référence pour le calcul des différents indicateurs (Tableau 1) (poids des matériels, consommation unitaire d'énergie, produits phytosanitaires et doses homologuées, prix de référence pour les intrants et pour la vente des cultures…).

Echelle/indicateur	*Coût de production*	*Rentabilité*	*Efficience énergétique*	*Bilan GES*	*Autres indicateurs techniques*
Culture	*€/t ou €/tMS*	*€/ha*	*Rapport entre énergie produite et énergie consommée*	*Kgeq CO2/ha ou kg eqCO2/MJ*	*Temps travail, IFT…*
Séquence de culture		*€ ou €/ha*			*Temps travail, IFT*
Unité de méthanisation	*€/tMS et €/MWh*	*€*	*Non calculée avec outils et références disponibles*		*Temps de travail*
Système d'exploitation agricole		*€ ou €/ha*			*Temps travail, IFT…*

Tableau 6 : Indicateurs technico-économiques et environnementaux identifiés au cours du projet Opticive selon l'échelle de travail

Mais l'évaluation de quelques-uns de ces indicateurs comme le coût de production des CIVE pose toutefois de nombreuses questions méthodologiques. Ce coût de production peut rémunérer une partie (coût de trésorerie) ou la totalité des charges de production (coût complet) d'une culture : charges opérationnelles, charges de mécanisation, de main d'œuvre, charges fixes d'exploitation.… On peut citer notamment l'affectation de l'impact d'une CIVE d'hiver sur la production de la culture suivante (1t de maïs grain en moins d'après les résultats expérimentaux) ou la valeur économique attribuée aux digestats de méthanisation épandus au champ.

Mais l'affectation d'une partie des « charges fixes » annuelles (fermage, frais de gestion…) à chacune des cultures de la succession est un autre enjeu méthodologique. Comment proratiser les charges de fermage et charges diverses ainsi que les cotisations MSA et la rémunération des capitaux propres comptabilisées dans les coûts complets ? Cette répartition peut se faire en fonction du nombre de cultures, du chiffre d'affaires de chacune d'entre elles ou selon l'énergie potentielle. Deux types de coûts seront ainsi présentés plus bas :

coûts complets rémunérant la totalité des facteurs de production : intrants, mécanisation, main d'oeuvre et les charges fixes proratisées au nombre de cultures ;

coût hors charges fixes (HCF) : intrants, mécanisation, main d'oeuvre sans charges fixes supportées uniquement par les cultures alimentaires.

Le coût complet correspond à une vision d'exploitation à moyen – long terme, dans un objectif d'analyse nationale voire internationale. Le coût hors-charges fixes est une vision à court terme qui permet d'évaluer le coût de la CIVE sans intégrer un changement plus large du système. C'est un coût qui n'exige pas de mise à jour du calcul sur les productions alimentaires.

Pour calculer ces différents indicateurs, différents cas d'étude ou scénarios doivent être définis : quelles cultures alimentaires, quelles CIVE selon les premières recommandations, quelles séquences de culture, quels types d'unité de méthanisation ?

Les scénarii d'évaluation

Scénarios de systèmes de culture (SdC)
Le projet Opticive a permis de travailler sur l'optimisation de la conduite de ces séquences de culture dans 3 contextes du Sud-Ouest, avec un objectif d'extrapolation : Béarn, Vallée de Garonne et Lauragais. (Tableau 2 ; Figure 1). Les résultats techniques de ces expérimentations permettent de préciser les conduites de culture et séquences adaptées à l'insertion des CIVE pour ces évaluations multicritères. Ces séquences ont été proposées après analyse des déclarations de surface annuelles dans les régions concernées. Ces séquences de cultures ont été adaptées à partir des connaissances acquises dans le projet pour intégrer cultures alimentaires et différents types de CIVE (Tableau 2). Dans chacun des contextes travaillés, des fermes type finement caractérisées (parc matériel, main d'œuvre, interventions, charges…) étaient disponibles, pour conduire ces évaluations, fermes travaillées par le pôle Economie et Système de Production d'ARVALIS

Contexte Pédo-climatique	Successions testées	Adaptation des espèces de la séquence de culture	Modification du travail du sol
Béarn	Blé tendre hiver-CIVE hiver-Maïs	Aucune	Maïs : **Simplification (Strip Till)**
	Blé tendre hiver - CIVE été-Maïs	Aucune	Aucune
	Orge Hiver-CIVE-Blé tendre hiver	**Soja dérobé** après l'orge d'hiver remplacé par la **CIVE**	Aucune
	CIVE-Maïs-CIVE-Soja	Aucune	Maïs : **Simplification (Strip Till)** Soja : **Simplification (Strip Till)**
	CIVE-Maïs	Simplification avec un passage de Strip Till superficiel	Maïs : **Simplification (Strip Till)**
Vallée de Garonne	Orge Hiver-Soja dérobé-CIVE hiver-Maïs	**Blé tendre Hiver** remplacé par **Orge Hiver +Soja dérobé**	Soja : **Simplification (Strip Till)** Maïs : **Simplification (Strip Till)**
	CIVE-Soja-CIVE-Maïs	Aucune	Soja : Aucune Maïs : **Simplification (Strip Till)**
	CIVE-Maïs	Aucune	Maïs : **Simplification (Strip Till)**
Lauragais	Orge Hiver-CIVE-Sorgho	**Blé Dur Hiver** remplacé par **Orge Hiver** **Tournesol** remplacé par **Sorgho**	Aucune
	Blé dur hiver – CIVE hiver - Tournesol	Aucune	BDH : **Semis Direct + 1 herbicide supplémentaire** Tournesol : **Simplification (Strip Till)**

Tableau 7: scénarii de contextes pédoclimatiques et de systèmes de culture retenus pour les simulations technico-économiques et environnementales Opticive – Scénarios issus des résultats d'expérimentation.

L'ajout d'une CIVE dans une séquence de culture peut modifier cette séquence, en termes d'espèces cultivables mais également en termes de pratiques culturales. C'est pourquoi les pratiques caractérisées sur les fermes type utilisées (système de référence) ont été adaptées en fonction des recommandations techniques issues d'Opticive (Tableau 2). Par exemple, la simplification du travail du sol est une opportunité fréquemment mise en œuvre afin de réduire les délais entre la récolte d'une culture et l'implantation de la culture suivante. A l'inverse, dans certains cas, l'introduction de la CIVE augmente le nombre de passages mécaniques sur la parcelle afin de résoudre des impasses de désherbage ou des risques de concurrence de repousse de CIVE sur la culture suivante. Les hypothèses de production sont également issues de ces travaux Opticive (Tableau 4).

Scénarios de méthanisation

Concernant les scénarios de méthanisation, un travail de groupe spécifique a été organisé avec différents acteurs de la filière : agriculteurs méthaniseurs, organismes de développement, constructeurs, opérateurs de réseau de gaz. A partir des premiers retours d'expérience et perspectives de développement de la filière, différents cas de méthanisation, de valorisation du biogaz et mix de substrats ont été envisagés. Cinq grand cas types communs ont pu être définis (Tableau 3 ; Figure 1) :

- 2 types d'unité en injection de gaz (70 et 135 $Nm^3.h^{-1}$)
- 3 en cogénération de 80 à 300 kWe (KiloWatt électrique).

Les acteurs de la construction ou acheteurs d'énergie ont pu préciser les hypothèses sur les coûts d'investissement et de fonctionnement de ces unités en complément de l'outil Méthasim® (Tableau 3).

Cas méthanisation		Injection 1	Injection 2	Cogénération 1	Cogénération 2	Cogénération 3
Substrat (tMB)	CIVE	8 000	16 000	2 300	4 500	5 500
	Fumier bovin	4 000	4 000	2 000	2 000	11 000
	Biodéchets					1 833
Débits CH4 ($Nm^3.h^{-1}$)		69.8	134.9			
Puissance (kWe)		284	564	81	151	295
Coût investissement (k€) MéthaSim, soit en €.kWe^{-1}		2 064 7 268	3 777 6 697	777 9 593	1 184 7 841	2 166 7 342
Dépenses d'exploitation (hors épandage et CP) (k€)		291	406	58	86	151
Coût investissement (k€) (source GrDF), soit en €.kWe^{-1}		2 700 9 507	4 400 7 801	900 11 111	1 359 9 000	2 419 8 200

Tableau 8: Cas type de méthanisation retenus de l'atelier de conception conduit dans le cadre d'Opticive

Systèmes de production (SdP)
Deux cas peuvent se présenter pour des agriculteurs :

- Être fournisseur d'une unité de méthanisation. Dans ce cas les CIVE sont vendues et des règles d'échange peuvent être construites pour la récolte et le retour de digestats (prestation, vente…).
- Être porteur de projet. Dans ce cas une partie ou la totalité des CIVE pourront être produites par lui-même sur son exploitation agricole.

L'évaluation économique et énergétique de ces systèmes doit alors se faire en comptant la vente des CIVE ou de l'énergie produite mais également les économies de charges (fertilisation…) ou manque à gagner (pertes sur les cultures alimentaires précédentes ou suivantes). Dans le second cas, les charges liées au méthaniseur (amortissement, fonctionnement…) devront également être déduites de la vente d'énergie.

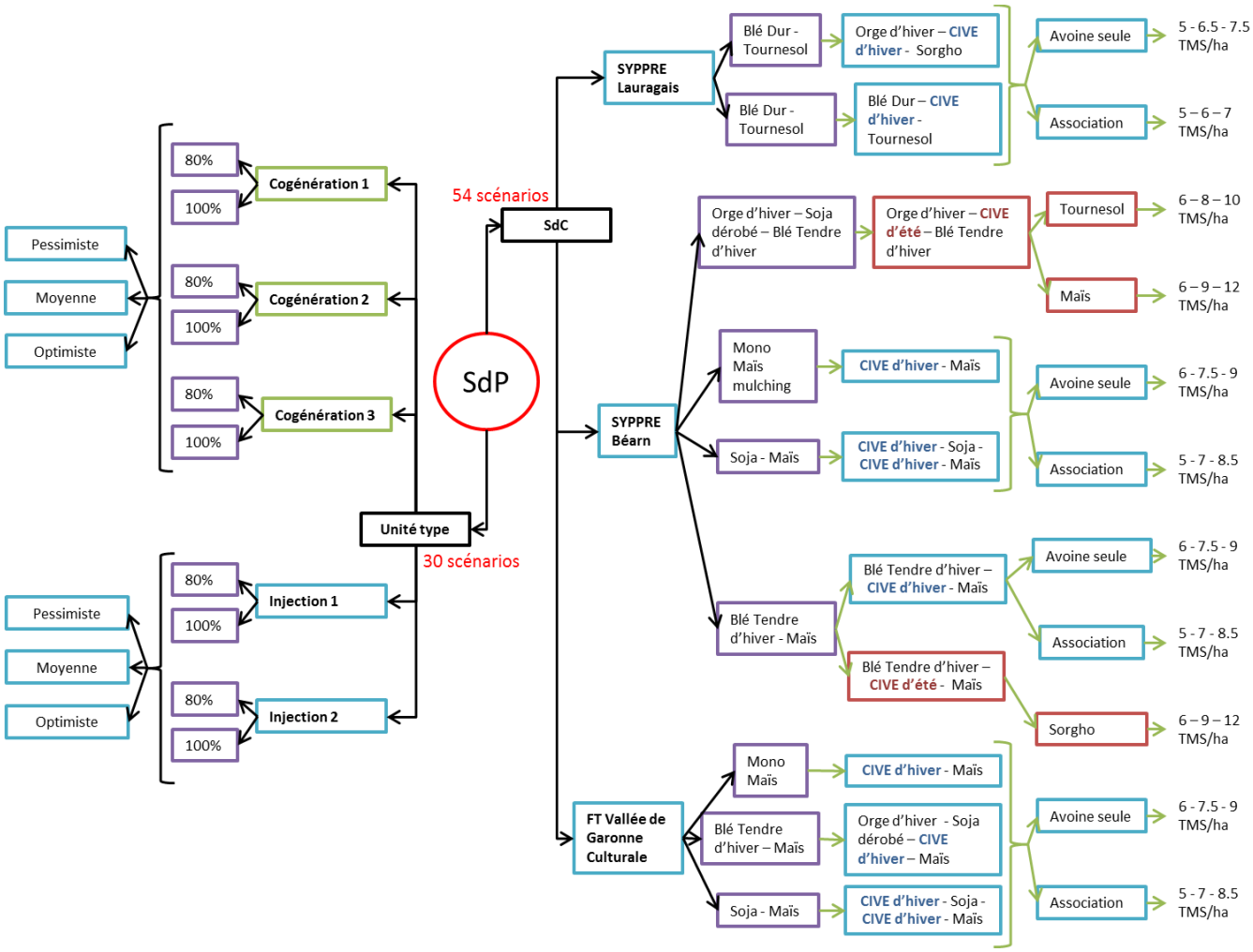


Figure 13 : Synoptique des scénarii de simulation réalisés dans Opticive (d'après T Seguin)

La combinaison de tous ces scenarii d'évaluation (Figure 1) compose plus de 50 cas de systèmes de culture. Des hypothèses de rendement des unités de méthanisation ont également été intégrées soit près de 30 cas.

Les résultats présentés ci-dessus sont une synthèse de ces cas type, notamment par grande catégorie de Cive : hiver ou été, voire contexte pédoclimatique.

L'exemple des deux systèmes d'exploitation du méthaniseur dans le contexte du Béarn sera présenté pour une unité en injection (injection 2). Les autres cas ne seront pas détaillés dans les résultats.

Résultats des Indicateurs technico-économiques et environnementaux des séquences de culture en sortie de parcelle

De la parcelle au système de culture :

Toutes espèces confondues, le coût complet des CIVE varie de 95 à 125€.t MS-1. Les CIVE d'été sont globalement plus coûteuses en raison du coût des semences, hybrides pour les espèces travaillées. Ces coûts de production (complets ou hors charges fixes) sont intimement liés au niveau de production et restent globalement élevés. La prise en compte des charges fixes dans ce coût n'est pas négligeable avec un enjeu de 30 à 50 €.t MS-1 selon les contextes (Tableau 4) soit un coût HCF des CIVE qui varie de 70 à 90 €.t MS^{-1}.

Contexte	Béarn						Lauragais						Béarn		
Succession	CIVE-Maïs						Blé dur – CIVE d'hiver – Tournesol						Blé Tendre d'hiver – CIVE d'été - Maïs		
Type de CIVE	Avoine			Avoine-Vesce			Avoine			Avoine-Vesce			Sorgho		
Rendement (t MS/ha)	6	7.5	9	5	7	8.5	5	6.5	7.5	5	6	7	6	9	12
Coût de production COMPLET (€/tMS)	139	112	93	156	112	92	160	123	107	150	125	107	144	96	72
Coût de production HORS CH FIXES (€/tMS)	87	69	58	93	66	55	105	80	70	94	78	67	94	63	47

Tableau 9: coûts de production complet et hors-charges fixes de différentes CIVE selon leur rendement et les contextes pédoclimatiques étudiés pour Opticive

La valeur attribuée aux digestats de méthanisation, épandus au champ, peut constituer une autre source de variabilité du coût de la CIVE selon le profil de l'agriculteur : s'il méthanise lui-même sa production de biomasse, il peut estimer qu'il s'agit d'un co-produit dont la valeur d'achat est nulle. Inversement, il peut considérer que ce co-produit a une valeur puisque de l'énergie a été consommée pour le produire.

Dans le cas où l'agriculteur ne méthanise pas sa production, le digestat possède une valeur considérée comme une charge pour la production des cultures suivantes.

Un seuil de rendement peut également être évalué afin d'équilibrer les charges de la CIVE. Pour un prix de vente de la CIVE de 125 €.t MS^{-1} (ou 27 €.t MB^{-1} environ à 20% MS), il est nécessaire de récolter 6 t $MS.ha^{-1}$ pour équilibrer l'intégralité des charges de la CIVE, dont une partie des charges fixes. Si ces charges fixes restent rémunérées par les cultures alimentaires (équilibre du coût HCF) ce rendement seuil est réduit de 2 $tMS.ha^{-1}$ pour ce même niveau de prix. Pour des prix de biomasse inférieurs, ces rendements seuils seront forcément plus élevés, près de 8 tMS.ha-1 pour un prix proche de 80 €.t MS^{-1}.

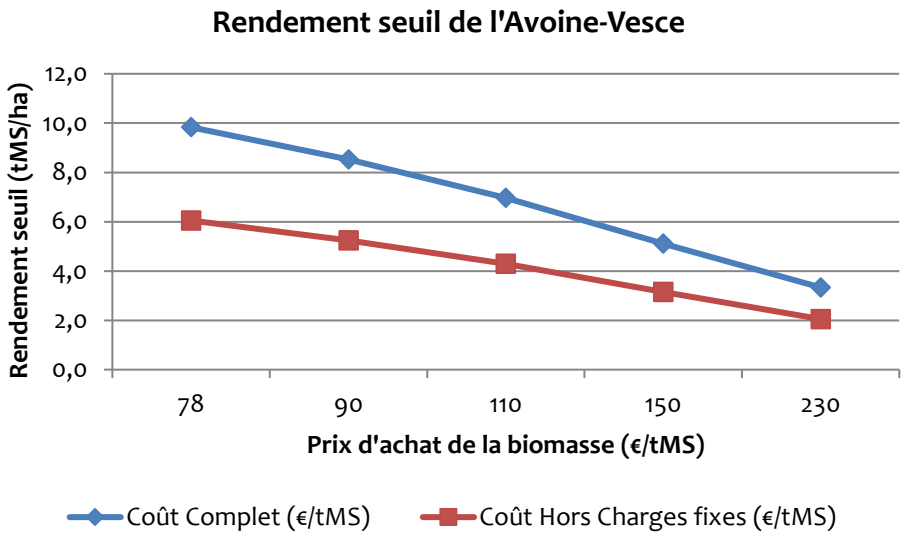


Figure 14 : seuils de rendement de CIVE selon le prix d'achat de ces ressources (objectif couvrir le coût de production), Opticive

Ces systèmes de culture présentent aussi de nombreux autres enjeux de durabilité, tant sur le temps de travail et le besoin en main d'œuvre que sur les autres enjeux environnementaux comme les émissions de GES. L'adaptation des systèmes de culture peut être une voie d'économie de temps sur la parcelle, notamment via les techniques d'implantation simplifiées, économisant de 2 à 4 $h.ha^{-1}$ sur l'ensemble de la séquence de culture. L'unité de méthanisation générera quant à elle un besoin en main d'œuvre de l'ordre de de 0.25 à 0.8 UTH selon la taille de l'unité.

L'efficience énergétique, rapport entre l'énergie produite et énergie consommée de ces systèmes de culture est systématiquement améliorée en entrée stockage par rapport à des séquences de référence de 2 cultures alimentaires par an (non montré). Les calculs d'énergie consommée intègrent toutes les énergies directes (consommation de carburant, électricité…) et indirectes (énergie de fabrication des engrais, des matériels…) Quant aux émissions de GES, elles sont également réduites au regard de l'énergie produite en sortie de parcelle, permettant d'économiser en moyenne 100 $gCO_2.kWh^{-1}$. La méthanisation est une voie d'économie d'émissions aussi par substitution d'énergie fossile. Le bilan global est toutefois dépendant des stratégies et des distances d'approvisionnement.

<u>A l'échelle de l'unité de méthanisation</u>

Le méthane a une équivalence énergétique de 10 à 11 $kWh.m^{-3}$ selon les conditions de températures et de pression. A partir du potentiel méthanogène (BMP de 250 à 300 Nm^3 $CH_4.tMS^{-1}$pour les CIVE – résultats d'analyse Opticive), il est possible de convertir notre coût de production de CIVE (€.t MS^{-1}) en équivalent énergie : de 20 à 50 €.MWh^{-1}. Avec l'ajout des coûts relatifs à l'unité de méthanisation qui incluent les charges fonctionnement (main d'œuvre, maintenance, énergie consommée) ainsi que les charges d'investissement (amortissement, frais financiers), il permet de calculer un coût total de l'énergie en sortie d'unité de méthanisation (cf. figure 2).

Cet indicateur sert à évaluer la compétitivité de ce type de ressource (comparaison à d'autres substrats de méthanisation), ainsi que la rentabilité du système de production (vis-à-vis du prix de rachat de l'énergie fixé dans le cadre de cet exercice à environ 113 €.MWh^{-1} en injection directe de biométhane). Ce coût de production permet également d'estimer le prix de vente minimum ou prix seuil de l'énergie qui permettrait au projet d'équilibrer les charges (investissement, fonctionnement et ressources en biomasse) afin de réaliser un exercice nul. C'est une valeur seuil qui situe l'intérêt de la biomasse issue de CIVE.

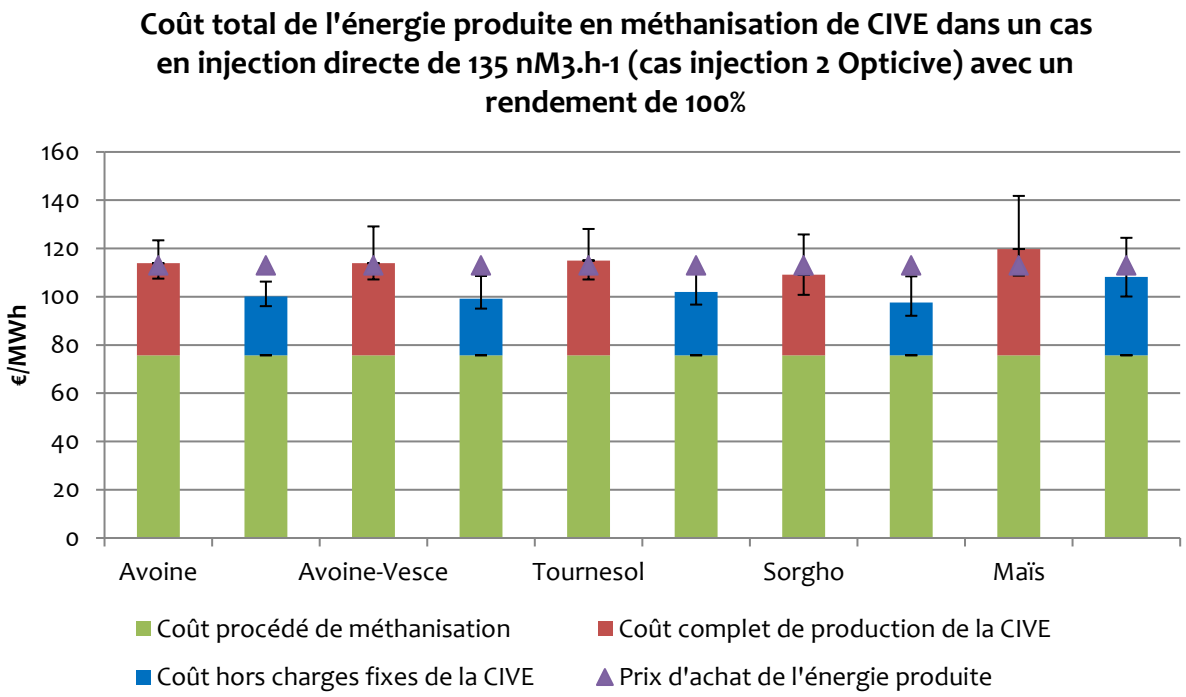


Figure 15: Coût total de l'énergie produite dans le cas d'une unité de méthanisation en injection à 135 Nm³.h⁻¹

Le coût total de l'énergie produite (somme du coût relatif au procédé de méthanisation et du coût de la ressource) atteint 113 €.MWh-1 hors subvention à l'investissement (Figure 3) pour une unité qui injecte 135 Nm3.h^{-1} (environ 15 000 t de substrat). Ce coût correspond au niveau du prix de rachat de l'énergie fixé par l'Etat (2019). Selon le coût de la ressource pris en compte (coût complet ou coût hors charges fixes) et sa variabilité (niveau de charge et de rendement), ce coût varie de 90 (avec les coûts hors HCF) à 140 €.MWh-1 en comptabilisant le coût complet de la ressource.

Ce coût est légèrement supérieur pour une unité en injection de 70 Nm3.h^{-1} (cas injection 1 du Tableau 3, non montré ici).

Dans les cas de cogénération (cogénération 1 et 2 du Tableau 3), ce coût total de l'énergie produite (non montré ici) est supérieur au prix de rachat de l'énergie. Le complément de prix de rachat qui existe pour la valorisation de CIVE en injection de biométhane (pas en cogénération) en 2019 explique en partie ce résultat.

Ce coût est toutefois soumis à de nombreux autres facteurs de variation inhérents aux technologies et cosubstrats utilisés. Ces coûts ont été évalués avec un rendement de 100% du pouvoir méthanogène (BMP) ce qui minimise ces coûts de l'énergie produite. En effet, ces rendements méthanogènes ne sont pas atteints en unité réelle. Selon les technologies, la présence de post-digesteurs, ces rendements peuvent être de 80% seulement. Les rendements d'épuration du gaz ou de cogénération sont également très impactant sur ces coûts et la rentabilité des unités. Tous ces résultats sont ainsi intimement dépendants de ces hypothèses d'unités de méthanisation, avec peu de standardisation et de références au moment de l'étude.

Rentabilité de la succession de culture

La rentabilité à l'échelle d'un système de production peut être évaluée selon 2 profils d'exploitation comme cela était précisé auparavant : le cas d'un agriculteur approvisionneur d'unité de méthanisation tierce ou celui d'un agriculteur investisseur dans une unité.

Pour le premier cas, à l'échelle d'une séquence de culture initiale en monoculture de maïs (avec mulching), les charges opérationnelles et de mécanisation sont augmentées sur 2 ans (poste semences, épandage, semis, récolte). Mais l'emploi d'une variété plus précoce de maïs, pour s'adapter au semis plus tardif dû à la CIVE, permet de récolter un grain plus sec d'économiser sur les frais de séchage. Avec la vente de la CIVE (6 t MS/ha) à hauteur de 125 €/t MS, la marge nette est augmentée de 93 €/ha.

Pour le second cas, sur la base des hypothèses relatives à l'unité de méthanisation précédente (cas en injection de 135 $Nm^3.h^{-1}$), hors aides à l'investissement et avec un rendement optimal de méthanisation (100%), la valorisation des CIVE à hauteur du coût complet de production ne permet pas d'améliorer la marge nette (hors aide) mais la dégrade de 100 €/ha environ pour un rendement de CIVE de 6 t MS/ha. L'enjeu de productivité est essentiel dans ce cas. En effet avec un rendement CIVE de 7.5 t MS/ha cette marge nette de la succession est alors améliorée de 56 €/ha.

	Succession référence maïs mulching	Succession innovante Maïs - CIVE (6 tMS/ha)	Succession Innovante Maïs - CIVE (7.5 tMS/ha)
Marge nette hors aide (€/ha)	263	159	319

Tableau 10: Marge nette de successions de culture à base de maïs, résultats OPTICIVE

Ces premiers résultats techniques et économiques attirent l'attention sur l'importance de :

- le besoin d'adapter le référentiel technico-économique à chaque situation : zone pédo-climatique, système de culture, typologie d'unités de méthanisation (potentiel de rendement, variabilité de la production, impact sur les cultures de la séquence…) ;
- la disponibilité de co substrats méthanogènes et peu cher ;
- la recherche et l'accompagnement technique nécessaire pour la réussite de ces systèmes.

De l'analyse multicritère aux axes de travail

C'est dans cet objectif que 6 ateliers de co-conception ont été réalisés au cours de l'hiver 2018/2019. Conviés par des conseillers locaux (chambres d'agriculture, coopératives et acteurs de la filière (associations locale, AILE, GrDF, ENGIE), ces séances ont regroupé producteurs de grande culture, des éleveurs, agriculteurs méthaniseurs, porteurs de projet. Ces ateliers, de 15 à 35, personnes ont permis d'assurer des échanges et travaux par petit groupe (4 à 7 personnes avec 1 conseiller au maximum) afin de garantir de l'interactivité autour des sujets suivants :

Identification des séquences de culture adaptées aux contextes régionaux. A partir des expériences de chacun des participants et des problématiques agronomiques locales identifiées, des séquences de culture adaptées a priori aux filières et contraintes de chacune des régions ont été identifiées. Cette étape est parue essentielle à tous les interlocuteurs.

Conduite *a priori* de ces séquences de culture. Ces conduites *a priori* de la CIVE et des cultures précédentes et suivantes ont été déclinées et comparées entre groupes.

Confrontation aux premières recommandations. Les conduites de cultures construites précédemment, ont alors été analysées et comparées aux premières recommandations issues d'Opticive. Cette séquence a permis de présenter les résultats du programme de recherche et d'autres références régionales des partenaires, de les comparer aux pratiques envisagées et par la même de transférer ces premières recommandations. Les retours d'expérience des participants ont également permis de compléter ces travaux.

Identification des axes de travail complémentaires et priorisation. Sur chacune des successions identifiées et suite à l'analyse des conduites de culture, les facteurs de risque ont été identifiés, synthétisés entre groupe et discutés. Des propositions d'axes de travail ont alors été discutées puis priorisées lors de l'atelier pour chacune des régions.

Ces propositions spécifiques aux contextes de production ont été analysées, comparées et synthétisées, certaines restant communes à différents bassins Trois grands axes de travail ont été identifiés : la conduite de la séquence de culture, la valorisation des digestats et l'approche du système d'exploitation agricole. Des travaux plus classiques sur les recommandations variétales et l'efficience des digestats ont pour objectif de qualifier les facteurs de risque et d'identifier des critères techniques, économiques et environnementaux d'aide au choix et à la conduite des successions. Des actions plus innovantes comme les semis sous couvert ont également été ciblées toujours dans l'optique de positionner au mieux le cycle de chacune des cultures de la rotation.

La communication de résultats a également été recommandée en particulier sur le statut organique des sols dans ces successions et les connaissances sur le pouvoir méthanogène (Cf. article 10 de ce numéro).

Cette co-construction des axes de travail a aussi permis de structurer et fédérer des partenariats notamment avec les acteurs de l'amont de la méthanisation, autour de problématiques communes et propres à chacune des grandes orientations régionales.

Echelle de travail	Axe de travail ou de communication
Conduite de la séquence de culture	Screening des espèces et des variétés
	Association d'espèces ou espèces pures : impact sur le potentiel biomasse, les risques et la culture suivante
	Semis sous couvert de CIVE dans le précédent : quel itinéraire technique (outils, espèces, dates) en CIVE hiver et CIVE été
	Fertilisation des CIVE : quelles règles de conduite ?
	Intérêt des CIVE pour la gestion des bioagresseurs, notamment désherbage et lutte contre les ravageurs
	CIVE d'été et besoins en eau (irrigation)
	Modalités de gestion de l'orge d'hiver en précédent CIVE d'été afin de limiter la pression des repousses : modes de récolte pour libérer le sol, intérêt de la récolte des menues pailles pour limiter le retour au sol de petites graines d'orge ou d'aventices
Gestion et valorisation des digestats	Optimisation de la valorisation d'apports de digestat en fin d'été : choix des espèces et analyse des risques associés
	Épandage de digestat : gestion et impact sur la fertilité physique et biologique du sol (risque de tassement, impact à long terme biologie sol)
	Typologie des digestats (classification des digestats selon substrats…)
	Conditions de limitation des risques volatilisation ammoniacale (date mode d'apport, culture…)
	Suivi à long terme du carbone des sols
	Stratégie de stockage digestats : impact technico-économique comparé d'un stockage long et de la valorisation des digestats selon les périodes d'apport
Système d'exploitation	Concurrence ou Complémentarité des CIVE pour l'alimentation en système élevage
	Modèle économique de valorisation des CIVE : prix d'achat seuil, intérêt sur la résilience, sécurisation des approvisionnements, temps de travail
	Analyse de l'opportunité et des risques de systèmes de 2 cultures par an (ex : Orge d'hiver, CIVE été – Cive Hiver – Maïs)
	Analyse technico-économique et environnementale comparée des CIVE et cultures dédiées dans un système d'exploitation : compétitivité, rentabilité, efficience énergétique
	Intérêt des autres mécanismes de rémunération ? (Rémunération des externalités positives dont carbone, Résilience des systèmes d'exploitation, valeur économique du digestat…)
	Approche filière – territoire : intérêt de la filière sur l'autonomie en fertilisation ou carbone d'un territoire
	Analyse comparée de stratégies logistique de stockage de CIVE et de digestats.
	Valorisation des surfaces prairiales : quelles stratégies d'exploitation et analyse comparée à la valorisation de CIVE ?

Tableau 11 : Synthèse des questions, axes de travail et de communication co-construits par les acteurs amont de la filière au cours d'ateliers participatifs.

Limites et perspectives

L'impact du changement de séquences de culture sur l'ensemble d'un système ne peut se voir qu'à moyen terme : impact sur la pression adventice, la portance des sols... Le nombre de séquences potentiellement testées est vite restreint sur des programmes de recherche de 3 ans. Les risques météorologiques plus forts ces dernières années sont aussi un facteur d'incertitude majeur (et peut être plus fréquemment observés ces prochaines années) pour ces expérimentations sur 2 ans, afin étudier une séquence complète. L'intérêt de dispositifs pluriannuels comme les dispositifs Syppre® est fort pour ces thématiques avec chaque composante d'une rotation présente chaque année dans ces expérimentations. Ces observations à moyen terme gagneront alors à être valorisées pour de futures recommandations et améliorations des évaluations.

Comme l'ont montré les travaux de groupe, la régionalisation des recommandations est une étape indispensable pour le développement de ces systèmes. Les spécificités locales en termes de successions, de sol, d'offre climatique ou encore d'équipement doivent être intégrées dans ces règles de décision.

Les indicateurs techniques, économiques et environnementaux qui ont pu être calculés, sont intimement dépendants des hypothèses sur les techniques de production. Ces évaluations devront être précisées avec le retour des évolutions de systèmes à plus long terme : effet sur l'autonomie en fertilisant, effet sur le désherbage et la pression bioagresseurs. Mais l'analyse à l'échelle du système d'exploitation agricole complet est fondamentale aujourd'hui. Cette analyse qui inclue les autres ateliers d'une exploitation agricole et d'une unité de méthanisation est également intimement dépendante des hypothèses économiques considérées pour ces unités. Sans pouvoir bénéficier d'un chiffrage précis par des constructeurs pour les unités type co-construites au cours d'Opticive, les deux jeux d'hypothèses que nous avons pu considérer démontrent des différences notables qui impactent significativement les seuils de rentabilité présentés. Ces chiffrages gagneraient alors à être réalisés sur des unités de méthanisation réelles récemment mises en production.

Les coûts de production de l'énergie produite sont en effet élevés et illustrent le soutien encore nécessaire à cette filière. Ces coûts proches de 120 €.MWh-1 sont largement supérieurs à l'objectif fixé de coût de l'énergie produite dans la programmation pluriannuelle de l'énergie (67 €/MWh en 2023 ; Janvier 2019). Cela illustre les besoins de recherche pour réduire les coûts et les risques inhérents à la variabilité de production dans ces systèmes de double culture. C'est un des enjeux de la bioéconomie de répartir la création de valeur ajoutée sur une filière. La récente étude ENEA Consulting (2019) à la demande des acteurs clé de la filière (GRDF, GRTgaz, le Club Biogaz de l'ATEE et le Syndicat des Énergies Renouvelables avec l'appui de l'ADEME, la DGE et Solagro) a permis de préciser les voies prioritaires de recherche qui se situent à toutes les étapes de la chaine de production d'énergie : du substrat (et en conséquence les systèmes d'exploitation associés), de la valorisation du gaz, de la technologie et de rémunération des externalités positives.

Face à ces enjeux et aux premiers retours des agriculteurs et conseillers, quelques axes de recommandations peuvent être apportés pour ces systèmes innovants mobilisateurs de biomasse :

- Poursuivre l'acquisition de références en vue de régionaliser les recommandations et s'adapter plus précisément aux contextes pédoclimatiques et spécificités des systèmes de culture ;

- Communiquer largement ces premières recommandations, intérêts et risques, puis résultats technico-économiques pour aider à structurer les changements de systèmes, à mieux évaluer la valeur de leurs ressources ;
- Structurer les travaux conduits à l'heure actuelle sur ces systèmes de 3 cultures en 2 ans pour capitaliser les expériences et partager les méthodologies d'évaluation ;
- Etudier les mécanismes et opportunités de rémunération des externalités positives (stockage de carbone, réduction de la pression phytosanitaire, développement de l'autonomie des exploitations) pour cette filière.

Ces axes rappellent l'enjeu d'une recherche partenariale multiacteurs pour le développement de ces systèmes d'exploitation porteurs d'enjeux en termes d'économie rurale et d'économie circulaire.

Références bibliographiques

- ADEME. 2012. Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050 – Synthèse

- ADEME. 2009. Methanisation agricole et utilisation de cultures énergétiques en codigestion, avantages/inconvénients et optimisation.

- ADEME, 2018, Un mix de gaz 100% renouvelable en 2050 ? – Synthèse

- Berti, M.T., Johnson, B.L., Gesch, R.W, Samarappuli, D., Ji, Y., Seames, W.,Kamireddy, S.R. 2013. Forage sorghum: an excellent feedstock for second generation biofuels in the North Central Region of the USA. p. 160–165. In 21stEuropean Biomass Conf. and Exhibition. 2–6 June, 2013, Copenhagen, Denmark, Available at www.etaflorence.it/proceedings (verified 12.10.14).

- Jouy L. , Emonet E. , Retaureau P. , Creuzet J. 2010. Un support concret pour anticiper l'avenir. Perspectives Agricoles n° 372 - Novembre 2010

- Justes, Eric, et Guy Richard. 2017. « Contexte, Concepts et Définition des cultures intermédiaires multi-services. » Innovations Agronomiques 62 (décembre): 1-15.

- Goff, B.M., Moore, K.J., Fales, S.J., Heaton, E.A., 2010. Double-cropping sorghum for biomass. Agron. J. 102, 1586–1592.

- Martin, M., 2014. A bioenergy feedstock/vegetable double-cropping system. Ind. Crops Prod. 59, 223–227. Doi: 10.1016/j.indcrop.2014.05.025

- Marsac, Sylvain, Caroline Quod, Valérie Leveau, Manuel Heredia, Nicolas Delaye, Françoise Labalette, Vincent Lecomte, Marie Bazet, et Eve-Anna Sanner. 2019. « Optimisation of French Energy Cover Crop Production in Double Cropping Systems for On-farm Biogas Use ». In European Biomass Conference and Exhibition Proceedings, 27th EUBCE-Lisbon 2019:40-49. https://doi.org/10.5071/27thEUBCE2019-1AO.4.5.

- Marsac, S., Labalette, F., Laboubee, C., Sausse, C.; French double cropping systems assessment for both biogas and food use; 2014 ; Biogaz Science 2014; Conference proceedings – Oral presentation

- Marsac S., Labalette F., Sausse C., Laboubée C., Multicriteria assessment of French cropping systems including energy catch crops, Proceedings of the 23th European Biomass Conference & Exhibition, Vienne, Austria 1-4 June 2015

- Szerencsits M. et al., 2014, Biogas from cover crops – energy yield and EROEI, Biogas Science 2014, Vienna, Proceedings.

TÉMOIGNAGE

La méthanisation est-elle compatible avec l'agriculture de conservation ?

Interview de Frédéric Thomas - Propos recueillis par Grégory Vrignaud

La réponse peut paraître évidente pour certains, mais nous avons souhaité poser la question à Frédéric Thomas spécialiste des techniques de conservation des sols depuis une vingtaine d'années et qui a créé la revue spécifique TCS (Techniques culturales simplifiées, devenue Techniques de conservation des sols).

Où en est l'agriculture de conservation aujourd'hui en France ?

Il est difficile de quantifier les surfaces en place ou le nombre d'exploitations, mais cette pratique est en très forte progression pour différentes raisons. Tout d'abord, les agriculteurs qui maitrisent cette technique ont des résultats technico-économiques très performants. Cela pousse d'autres agriculteurs dans le cadre d'une pression économique forte à se tourner vers ces nouvelles solutions. La 2ème raison s'explique par la mise en place de pratiques cohérentes sur le plan agronomique et environnemental, notamment avec la systématisation de couverts végétaux divers et performants, d'enchainements culturaux habiles et de colzas associés, et ce malgré les incertitudes sur l'usage du glyphosate. Si en complément on ajoute de l'élevage sur ces fermes, le système est encore bonifié. Enfin l'année 2019 avec ses extrêmes tant en température qu'en pluviométrie, qui risquent de se répéter, a montré que nos parcelles en agriculture de conservation encaissent plus facilement ces conditions extrêmes. Un autre atout pour les années à venir.

Un des piliers de l'agriculture de conservation est le retour au sol du carbone, la méthanisation qui en consomme une partie peut-elle satisfaire cet objectif ?

Dans un système cohérent avec méthanisation, le stockage de carbone ne m'inquiète pas. En effet si les couverts exportés indispensables à la méthanisation vont retirer une partie du carbone du système, les couverts vont développer un système racinaire performant : lorsque l'on regarde les exsudats racinaires, c'est du « carbone liquide » qui va rentrer dans le sol, le dynamiser et augmenter l'activité biologique. Il faut ajouter que, concernant les résidus de surface, on a une méconnaissance de leur valorisation. En effet, la majorité de la matière organique qu'on laisse à la surface du sol est souvent consommée par l'activité biologique de surface et très peu de ce carbone semble être investi et sert à l'augmentation du stock de matières organiques. C'est plus l'acte d'implantation, la croissance des végétaux et la répétition de phases de croissance qui boostent l'augmentation du stockage du carbone dans le sol. A l'image des systèmes d'élevage pâturant qui exportent une grande quantité de carbone (respiration des animaux), toutes les expérimentations sur ces systèmes montrent qu'ils continuent de stocker du carbone dans les sols. Alors aujourd'hui, les exploitations qui n'ont pas cette opportunité de transformer une partie de leurs productions végétales en lait ou viande peuvent très bien les transformer en biogaz grâce à une unité de méthanisation. Dans l'économie du carbone, ce n'est pas la masse produite qui est importante, c'est la vitesse à laquelle on fait tourner le carbone dans le système agricole et qu'on le valorise : à l'image de l'élevage, je vois la méthanisation selon le même principe. En effet, ce n'est pas parce que 75 à 80 % du carbone est métabolisé par l'élevage ou un méthaniseur que tout est perdu pour le sol et l'enrichissement de la matière organique. Ici je tiens à rassurer ceux qui sont trop centrés sur la quantité à rapporter au sol. Ils n'ont pas à s'inquiéter, et ce pour différentes raisons :

- une faible part des substances sucrées et labiles reste en tant qu'humus dans le sol (elles seront aussi rapidement respirées par la vie du sol) ;

- les animaux apportent comme la méthanisation des substances plus solubles pour plus de croissance végétale et de photosynthèse au final ;

- ils retournent au sol aussi comme la méthanisation des produits enrichis en lignine qui sont plus précurseurs d'humus ;

- de ce fait ces situations favorisent une activité fongique plus qu'une activité bactérienne au niveau du sol qui est plus efficace (moins de minéralisation rapide de carbone) dans la transformation des produits organiques en humus et donc au final au stockage du carbone.

Vous parlez de systèmes cohérents avec la méthanisation, pouvez-vous développer ?

Je vois cette cohérence à différents niveaux. Evidemment d'abord équilibre agronomique : la méthanisation ne doit pas voler tous les résidus de culture, et l'agriculteur ne doit pas orienter l'ensemble de ses rotations et récoltes pour nourrir le digesteur, dans ce cas l'excès pourrait être dangereux dans l'agriculture de conservation. Mais une rotation avec une CIVE tous les 3 ou 4 ans par exemple qui intègre un seigle avec une légumineuse pour capter également de l'azote me semble très pertinent. Et s'il faut intégrer une culture dédiée pour allonger la rotation, pourquoi pas, il ne faut pas être dogmatique ! C'est le moyen d'enrichir la rotation là où il peut manquer des opportunités pour avoir des rotations équilibrées avec suffisamment de plantes en association et avec des périodes de semis étalées sur toute l'année. Certaines années, il sera aussi possible de récolter les bandes enherbées, menues pailles, écarts de tri ou encore des parcelles en échec de désherbage. Il faut faire le bilan de tous les bénéfices de ces pratiques, c'est aussi un moyen de faire baisser les IFT. C'est que du positif !

Cette nouvelle activité de production d'énergie apporte également une cohérence économique notamment pour apporter un revenu complémentaire et plus stable que les céréales notamment.

C'est en effet également un moyen de « verticaliser » les entreprises/exploitations, j'entends par là le fait d'augmenter la rentabilité des surfaces dans les exploitations agricoles (3 cultures en 2 ans) et d'éviter d'aller chercher des surfaces supplémentaires, dans un scénario de fuite en avant avec des économies d'échelle qui ne garantissent pas d'amélioration systématique des résultats économiques.

Enfin, je n'oublie pas la cohérence territoriale notamment par rapport à la taille des projets. Ces projets doivent rester cohérents avec un territoire tant comme zone de collecte que pour la valorisation de l'énergie, notamment la chaleur dans le cas des unités de cogénération. Il faut être bien calé avec son environnement. Et je suis persuadé que l'agriculture, à travers la biomasse, est la meilleure source d'énergie car elle est stockable, transportable et utilisable quand on en a besoin.

Comment voyez-vous la valorisation du digestat ?

Je ne me fais pas une montagne de l'usage du digestat à partir du moment où l'introduction de la méthanisation permet également de produire des couverts végétaux qui, comme nous l'avons déjà évoqué, permettront de « restituer » des exsudats racinaires. Ces digestats, s'ils sont bien calibrés et homogènes, vont pouvoir répondre à différents besoins des parcelles d'autant plus valables si on dispose d'une presse à vis pour gérer fraction solide et liquide. Par exemple on pourra épandre plutôt du digestat solide sur une parcelle de laquelle on a tiré beaucoup de carbone (exportation de paille pour l'élevage, maïs fourrage…) et à l'inverse on appor-

tera du digestat liquide avant colza pour booster son développement ou encore faciliter la dégradation des pailles de maïs pour le blé qui suivra. Il faut rester logique et utiliser ces produits pour compenser certaines pratiques. En termes de recherche, il sera intéressant de mieux qualifier les digestats, notamment minéralisation et réorganisation de l'azote.

Il est également intéressant que la méthanisation puisse recycler des ressources complémentaires non produites par l'exploitation. En plus d'être un substrat pour le digesteur, cette biomasse permet de faire entrer de la fertilité complémentaire sur l'exploitation : N, P, K mais aussi oligo-éléments et matière organique résiduelle, c'est du bonus.

Donc selon vos propos, méthanisation et agriculture de conservation sont finalement assez liées et répondent à des objectifs communs

Je pense que c'est difficile de faire de la méthanisation sans agriculture de conservation : dans les deux systèmes il faut multiplier les implantations, re-semer rapidement avec des coûts maitrisés et une capacité de réussite de ses semis. De plus la méthanisation a besoin de sols portants pouvant encaisser du trafic. Ces pratiques peuvent donc également faire réfléchir au trafic contrôlé[43], utile dans nos systèmes.

La méthanisation contribue à mettre en place un système malin et opportuniste à l'image de nos pratiques en agriculture de conservation. Elle permet ainsi de produire du gaz renouvelable, baisser la fertilisation minérale et les phytos, diminuer le travail du sol tout en augmentant les revenus et en étant favorable au sol et à biodiversité, c'est quand même pas mal !

43 Grâce au GPS et l'adaptation des outils agricoles (largeur de travail et distances entre les roues des tracteurs) il est possible de canaliser le passage des roues pour limiter le tassement du sol uniquement sur certaines bandes de sol

TÉMOIGNAGE

Que sait-on vraiment de l'impact des digestats de méthanisation sur la qualité biologique des sols agricoles ?

Sophie SADET-BOURGETEAU2, Pierre-Alain MARON1 et Lionel RANJARD1

1INRA/UMR Agroéocologie, Dijon, France
2AgroSup Dijon, Dijon, France

Les digestats : typicité et qualité agronomique

La méthanisation est une technologie basée sur la dégradation par des micro-organismes de la matière organique, en conditions contrôlées et en l'absence d'oxygène. Cette dégradation aboutit à la production : 1) d'un biogaz utilisé comme énergie renouvelable et 2) d'un co-produit riche en matière organique appelé digestat. Généralement, ce digestat est retourné au sol soit sous une forme brute, soit sous une forme liquide ou solide après une étape de séparation de phase. La fraction solide du digestat est réputée pour son contenu élevé en matière organique présentant une importante proportion de carbone stabilisé. Elle contiendrait environ 18 fois moins d'azote minéral que le digestat brut (Reibel, 2018). La fraction liquide, elle, se caractérise par une teneur en azote minéral plus importante que dans la phase solide, et par la présence de fractions organiques plus labiles (jusqu'à 90% de minéralisation du carbone organique) (Houot et al., 2014). Ces caractéristiques lui confèrent ainsi une valeur fertilisante supérieure au digestat brut (Maynaud et al., 2017). Cette fraction liquide est également plus infiltrable dans le sol de par sa faible teneur en matière sèche (Reibel, 2018). D'un point de vue réglementaire, depuis août 2019, les digestats de méthanisation ne sont plus considérés comme des déchets, mais comme des produits valorisables, soumis aux règles de mise sur le marché des fertilisants organiques (JORF n°0221 du 22 septembre 2019).

Après épandage, le devenir de la matière organique présente dans les digestats est fortement dépendant du contexte pédoclimatique et de la diversité des organismes présents dans le sol. Faute d'études approfondies, l'impact des digestats sur la composante biologique du sol reste toutefois largement méconnu et il n'est pas possible aujourd'hui de statuer sur l'adéquation entre cette pratique de valorisation agronomique et le maintien, voire la promotion de la diversité de ces organismes et des fonctions et services associés (dynamique des matières organiques et cycles du carbone et de l'azote, bio-disponibilité des éléments nutritifs, dégradation de polluants organiques, rétention de polluants métalliques, action sur la structure des sols, etc..). De même, comme évoqué plus haut, ces digestats et plus particulièrement ceux de phase liquide, sont riches en azote fortement disponible, les rendant intéressants pour pallier l'utilisation d'amonitrates de synthèse, mais posant aussi des questions d'ordre environnemental en termes de pertes d'azote (sous forme dissoute ou gazeuse) et d'impact sur la biodiversité des sols.

Etat de nos connaissances sur l'impact des digestats

Actuellement, peu de données scientifiques sont disponibles pour objectiver l'impact des digestats de méthanisation sur la qualité biologique des sols. Certaines études suggèrent qu'un apport de digestats augmente la biomasse et l'activité microbienne des sols (Odlare et al., 2008 ; Abubaker et al., 2012 ; Chen et al., 2012 ; Walsh et al., 2012 ; Caracciolo et al., 2015 ; García-Sánchez et al., 2015 ; Hupfauf et al., 2016). A l'inverse, d'autres travaux ne reportent aucun effet des digestats de méthanisation sur ces mêmes paramètres (Andruschkewitsch et al., 2013 ; Johansen et al., 2013 ; Juárez et al., 2013 ; Wentzel et al., 2015 ; Coelho et al., 2019). Ces divergences de résultats peuvent s'expliquer par des variabilités de facteurs expérimentaux (type de digestats, quantité apportée, type de sol…). Concernant la structure des communautés microbiennes du

sol, l'ensemble des études s'accordent à mettre en évidence qu'un apport de digestat induit une modification de cette dernière (García-Sánchez et al., 2015 ; Sapp et al., 2015 ; Gómez-Brandón et al., 2016). L'apport de digestat au sol aurait tendance à favoriser la population bactérienne du sol en augmentant sa croissance (Walsh et al., 2012) et sa diversité (Sapp et al., 2015). A l'inverse, les champignons, eux, tireraient peu de bénéfices de cette pratique, puisque l'apport de digestat au sol n'aurait pas d'effet sur la croissance de la population fongique, et aurait même un effet négatif sur la structure de cette communauté (Wentzel and Joergensen, 2016). Concernant l'impact des digestats sur la macro-faune du sol, peu de données sont également disponibles dans la littérature scientifique. Il semble cependant que l'apport de digestats induise une augmentation de la biomasse et de l'abondance des vers de terre au niveau des sols agricoles (Koblenz et al., 2015). Ces résultats ne représentent cependant pas un consensus, puisqu'une autre étude démontre l'effet délétère des digestats de méthanisation sur les vers de terre (Ross et al., 2017). Pour résumer, que l'on considère les micro- ou les macroorganismes du sol, les résultats disponibles dans la littérature scientifique sont à ce jour contradictoires ; chaque étude rapportant des effets propres à des digestats particuliers, appliqués dans des conditions expérimentales uniques, rendant les conclusions actuelles peu génériques. D'autre part, à notre connaissance, très peu d'études recensent, après plusieurs années d'apports consécutifs, l'impact des digestats de méthanisation sur la biologie du sol (Wentzel et al., 2015). Pour l'ensemble des raisons évoquées ci-dessus, les données issues de la littérature scientifique ne permettent pas à ce jour d'objectiver l'impact des digestats de méthanisation sur la qualité biologique des sols. Il est donc nécessaire d'acquérir encore de nouvelles connaissances pour permettre la mise en évidence de relations génériques.

En parallèle de cette littérature scientifique sont disponibles un bon nombre de rapports provenant d'associations, de groupes de travail… Ces rapports sont de provenance multiple, en lien avec des projets de R&D, émanant de demandes sociétales… Dans ces documents, l'impact des digestats sur la biologie du sol est également décrit, voire même décrié. Ainsi, il est rapporté que l'apport de digestats solides induit une diminution de la vie des sols (MethaLAE-CASDAR, 2018). Concernant plus spécifiquement les vers de terre, les conclusions sont variables. Certains rapports montrent un effet positif des digestats sur les lombrics, mais également les acariens et les collemboles (Burmeister et al., 2015). D'autres documents sont plus mitigés, notamment celui de l'ANSES (2018) qui démontre un impact négatif des digestats sur la reproduction des vers de terre. Enfin, de façon plus concrète, sur le terrain et plus particulièrement dans le département du Lot, une partie de la population représentée par des associations locales s'oppose à l'épandage de digestats issus de méthanisation de déchets de canard gras (CSNM, 2019). Cette opposition est en lien avec le type de sol présent dans ce département, un système karstique peu filtrant, pouvant induire des effets négatifs sur la qualité biologique des sols et des eaux souterraines.

Que fait la recherche ?

Comme nous l'avons mentionné plus haut, la recherche académique n'est à ce jour pas en mesure d'objectiver l'impact des digestats sur la biologie des sols, qui aujourd'hui représente un levier important pour la transition agroécologique basée sur la réduction des intrants de synthèse. Dans ce contexte, il devient urgent de produire des connaissances sur ce sujet afin de mieux évaluer l'impact de telles pratiques. C'est dans ce cadre que le groupe de réflexion « Metha-REV » a été mis en place. Ce groupe, composé de différentes parties prenantes sur cette thématique : la recherche publique sur la biologie des sols agricoles (INRAE, CNRS, Université, ESA Angers…), des associations agroenvironnementales (WWF, GERES, ATEE…), des acteurs du développement agricole (CA, GIEE…) et des acteurs de l'énergie (ENGIE, GRDF, ADEME…), est coordonné scientifiquement par L. Ranjard (INRAE Dijon, UMR Agro écologie). Le principal

objectif de ce groupe est de mettre en place rapidement des projets de recherche permettant de mieux évaluer l'impact des digestats sur la qualité des sols. C'est dans ce cadre que le projet Metha-BioSol, coordonné scientifiquement par S. Sadet-Bourgeteau (AgroSup Dijon) et techniquement par la chambre d'agriculture de Maine-et-Loire, a été déposé à des appels d'offre du ministère de l'agriculture et de l'ADEME. Brièvement, Le projet Metha-BioSol vise à évaluer l'impact des digestats de méthanisation sur la qualité biologique et écologique des sols en utilisant des bio-indicateurs opérationnels (c'est-à-dire diversité des meso et micro-organismes, dynamique du carbone (C) et état sanitaire (pathogènes) des sols). Ce projet répondra à des interrogations de plus en plus nombreuses d'agriculteurs engagés dans des démarches de méthanisation en tant qu'utilisateurs de digestats. Le projet sera constitué de deux parties : 1) Evaluer, via des mesures en conditions contrôlées, l'impact des digestats en tenant compte du type de sol, du type de digestat et de la répétition des apports ; et 2) Mettre en place un réseau national de fermes agricoles et effectuer un diagnostic de l'impact de l'apport de digestats associé à diverses pratiques agronomiques et dans des contextes pédoclimatiques variés. L'ensemble des résultats générés sera ensuite analysé et transféré aux agriculteurs afin d'améliorer, si nécessaire, leurs pratiques.

Bibliographie

Abubaker, J., Risberg, K., Pell, M., 2012. Biogas residues as fertilisers–Effects on wheat growth and soil microbial activities. Applied Energy. 99, 126-134.

Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, d.l.e.e.d.t., 2018. Conclusions de l'évaluation relatives à la demande d'autorisation de mise sur le marché de la société SAS BIOVILLENEUVOIS pour l'ensemble de produits FERTI BIOVILLENEUVOIS (digestats de méthanisation).

Andruschkewitsch, M., Wachendorf, C., Wachendorf, M., 2013. Effects of digestates from different biogas production systems on above and belowground grass growth and the nitrogen status of the plant-soil-system. Grassland Science. 59, 183-195.

Burmeister, J., Walter, R., Fritz, M., 2015. Effets de la fertilisation des digestats issus de la méthanisation sur la faune du sol.

Caracciolo, A.B., Bustamante, M.A., Nogues, I., Di Lenola, M., Luprano, M.L., Grenni, P., 2015. Changes in microbial community structure and functioning of a semiarid soil due to the use of anaerobic digestate derived composts and rosemary plants. Geoderma. 245, 89-97.

Chen, R., Blagodatskaya, E., Senbayram, M., Blagodatsky, S., Myachina, O., Dittert, K., Kuzyakov, Y., 2012. Decomposition of biogas residues in soil and their effects on microbial growth kinetics and enzyme activities. Biomass Bioenergy. 45, 221-229.

Coelho, J.J., Hennessy, A., Casey, I., Woodcock, T., Kennedy, N., 2019. Responses of ryegrass, white clover, soil plant primary macronutrients and microbial abundance to application of anaerobic digestates, cattle slurry and inorganic N-fertiliser. Appl Soil Ecol. 144, 112-122.

CSNM, 2019. Inquiétudes du CSNM vis à vis de la Méthanisation non raisonnable / Mise en garde et Propositions.

García-Sánchez, M., Siles, J.A., Cajthaml, T., García-Romera, I., Tlustoš, P., Száková, J., 2015. Effect of digestate and fly ash applications on soil functional properties and microbial communities. European journal of soil biology. 71, 1-12.

Gómez-Brandón, M., Juárez, M.F.-D., Zangerle, M., Insam, H., 2016. Effects of digestate on soil chemical and microbiological properties: A comparative study with compost and vermicompost. J. Hazard. Mater. 302, 267-274.

Houot, S., Pons, M.-N., Pradel, M., Caillaud, M., Savini, I., Tibi, A., 2014. Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaires sur les sols à usage agricole et forestiers. Impacts agronomiques, environnementaux, socio-économiques. irstea.

Hupfauf, S., Bachmann, S., Juárez, M.F.-D., Insam, H., Eichler-Löbermann, B., 2016. Biogas digestates affect crop P uptake and soil microbial community composition. Sci Total Environ. 542, 1144-1154.

Johansen, A., Carter, M.S., Jensen, E.S., Hauggard-Nielsen, H., Ambus, P., 2013. Effects of digestate from anaerobically digested cattle slurry and plant materials on soil microbial community and emission of CO2 and N2O. Appl Soil Ecol. 63, 36-44.

Juárez, M.F.-D., Waldhuber, S., Knapp, A., Partl, C., Gómez-Brandón, M., Insam, H., 2013. Wood ash effects on chemical and microbiological properties of digestate-and manure-amended soils. Biol Fertil Soils. 49, 575-585.

Koblenz, B., Tischer, S., Rücknagel, J., Christen, O., 2015. Influence of biogas digestate on density, biomass and community composition of earthworms. Industrial Crops and Products. 66, 206-209.

Maynaud, G., Patureau, D., Druilhe, C., Ziebal, C., Jimenez, M., Torrijos, M., Pourcher, A., Wery, N., 2017. Caractérisation physico-chimiques et microbiologiques de digestats bruts et post-traités destinés à l'épandage agricole. Techniques Sciences Méthodes. 5, 33-50.

MethaLAE-CASDAR, 2018. Améliorer la fertilité des agrosystèmes.

Odlare, M., Pell, M., Svensson, K., 2008. Changes in soil chemical and microbiological properties during 4 years of application of various organic residues. Waste management. 28, 1246-1253.

Reibel, A., 2018. Valorisation agricole des digestats:Quels impacts sur les cultures, le sol et l'environnement?, La méthanisation en Provence-Alpes-Côte d'azur.

Ross, C.-L., Wilken, V., Krück, S., Nielsen, K., Sensel-Gunke, K., Ellmer, F., 2017. Assessing the impact of soil amendments made of processed biowaste digestate on soil macrofauna using two different earthworm species. Archives of Agronomy and Soil Science. 63, 1939-1950.

Sapp, M., Harrison, M., Hany, U., Charlton, A., Thwaites, R., 2015. Comparing the effect of digestate and chemical fertiliser on soil bacteria. Appl Soil Ecol. 86, 1-9.

Walsh, J.J., Rousk, J., Edwards-Jones, G., Jones, D.L., Williams, A.P., 2012. Fungal and bacterial growth following the application of slurry and anaerobic digestate of livestock manure to temperate pasture soils. Biol Fertil Soils. 48, 889-897.

Wentzel, S., Joergensen, R.G., 2016. Effects of biogas and raw slurries on grass growth and soil microbial indices. Journal of plant nutrition and soil science. 179, 215-222.

Wentzel, S., Schmidt, R., Piepho, H.-P., Semmler-Busch, U., Joergensen, R.G., 2015. Response of soil fertility indices to long-term application of biogas and raw slurry under organic farming. Appl Soil Ecol. 96, 99-107.

ARTICLE

Effets à court terme des digestats bruts de méthanisation sur la productivité et la qualité fourragère ainsi que sur le fonctionnement microbien sous prairies

Early effects of digestates on the productivity and quality of forages and on soil microbial variables in grasslands

Laflotte Alexandre[1], Pacaud Stéphane[1], Daigneux Benjamin[2], Poirrier Fanny[3], Genestier Julie[3], Ravard Benjamin[1], Le Roux Yves[4], Piutti Séverine[3]

[1]Université de Lorraine, ENSAIA, Centre R&D, TSA 40602, F-54518 Vandoeuvre-lès-Nancy
[2]Agra-Ost, Klosterstrasse 38, B-4780 Sankt-Vith
[3]Université de Lorraine, INRAE, UMR 1121 Agronomie et Environnement, TSA 40602, F-54518 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex
[4]Université de Lorraine, UR-AFPA, TSA 40602, F-54518 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex

Résumé

Dans le cadre d'un projet INTERREG, cinq sites expérimentaux de prairies permanentes sont suivis depuis 2017 avec pour objectif de comparer dans différentes conditions pédoclimatiques les effets de différentes modalités de fertilisation (digestat de méthanisation vs engrais de synthèse vs lisier brut vs témoin non fertilisé).

Cet article montre que 2 ans après le début des applications des différents fertilisants -à unités d'azote équivalentes- les rendements en biomasse sont significativement plus élevés sur des parcelles fertilisées par du nitrate d'ammonium en comparaison à des parcelles non fertilisées. Les rendements en biomasse des parcelles fertilisées par du lisier ou du digestat sont intermédiaires. Cependant les valeurs fourragères et les teneurs en éléments minéraux ne permettent pas de discriminer les modalités de fertilisation. De même, à ce stade, il n'est pas possible de distinguer d'effet significatif des modalités de fertilisation sur le fonctionnement microbien des sols.

Mots-clés : Digestat de méthanisation, rendement, qualité fourragère, variables microbiennes, Interreg Grande Region

Abstract

In a European Project gathering french, belgian, luxembourgish and german partners, five permanent grassland experimental sites have been monitored since 2017. The aim of this project is to compare the effects of different fertilizers under different pedoclimatic conditions (digestate vs chemical fertilizer vs manure vs unfertilized control).

This article shows that 2 years after the start of the application of the different fertilizers – for the same nitrogen units - the biomass yields are significantly higher on plots fertilized with ammonium nitrate compared to unfertilized plots. The biomass yields of plots fertilized with manure or digestate are intermediate. However, the feeding values and the mineral contents do not make it possible to identify the fertilizer. Likewise, after two years, it is not possible to distinguish a significant effect of the modes of fertilizer on the soil microbial variables.

Keywords : digestate, yield, feeding value, soil microbial variables, Interreg Grande Region

Introduction

L'utilisation de biomasse en méthanisation permet de générer des coproduits de réaction correspondant à une matrice organique résiduelle i.e. digestats bruts (Zhang *et al.*, 2007) qui peuvent être utilisés en agriculture comme engrais et/ou amendements organiques (Möller et Müller, 2012). De nombreux verrous ont été levés ces dernières années sur la faisabilité technique autour de la mise en place d'unités de méthanisation, mais de nombreuses questions sont actuellement adressées à la profession agricole concernant l'épandage au champ et la valorisation agronomique des digestats bruts. Les digestats pourraient ainsi améliorer (i) à très court terme la production agricole (biofertilisant), (ii) à plus long terme la fertilité des sols agricoles (activateurs de la vie du sol), les deux potentialités devant permettre de diminuer la dépendance des systèmes agricoles vis-à-vis des intrants de synthèse.

Concernant les aspects de biofertilisation, la caractéristique essentielle des digestats à considérer est sa forte disponibilité en éléments minéraux, notamment en azote avec en une forme ammoniacale pouvant représenter entre 44 et 81% de l'azote total (Möller et Müller, 2012). Ces digestats peuvent ainsi dans certaines conditions et pour certaines espèces végétales remplacer les engrais de synthèse (Alburquerque *et al.*, 2012 ; Coelho *et al.*, 2019). Dans le cas des espèces prairiales et notamment du ray-grass anglais, si les digestats peuvent significativement augmenter le rendement en comparaison d'un témoin non fertilisé, leur valeur fertilisante reste néanmoins souvent inférieure aux engrais azotés de synthèse (Walsh *et al.*, 2012). Néanmoins, la majorité des résultats disponibles dans la littérature scientifique proviennent d'essais en conditions contrôlées réalisées en mésocosmes sur des cycles de développement courts.

Les matières organiques des sols (MOS) sont le pilier de la fertilité des sols (Manlay *et al.*, 2007), définie comme la capacité à « fournir des nutriments essentiels pour la croissance des plantes cultivées, soutenir une communauté biotique diversifiée et active et présenter une structure favorable » (Mäder *et al.*, 2002). Ces MOS constituent notamment à la fois un réservoir de nutriments pour les plantes dans les agroécosystèmes et une source de carbone et d'énergie pour les micro-organismes du sol, acteurs majeurs de la minéralisation des MOS.

Les conditions pédoclimatiques et les pratiques culturales influencent la taille et l'activité des micro-organismes du sol. Les pratiques agricoles permettant d'augmenter les entrées de carbone dans le sol sont de manière générale favorables au fonctionnement microbien. Ainsi, l'épandage régulier d'effluents d'élevage permet un retour au sol de substrats organiques pouvant stimuler les communautés microbiennes tant en termes de croissance que d'activité de minéralisation des MOS (Zhang *et al.*, 2012 ; Zhang *et al.*, 2015). Aussi les digestats, du fait de caractéristiques différentes (ratio C/N faible, forte teneur en azote minéral, C moins labile…) par rapport à des effluents bruts (lisier ou fumier) pourraient modifier à court et moyen terme le fonctionnement microbien des sols.

Initié en 2016, le projet Interreg PERSEPHONE a notamment pour objectif de comparer dans différentes conditions pédoclimatiques (France, Belgique, Luxembourg et Allemagne) les effets de différentes modalités de fertilisation (digestat vs engrais chimiques vs lisier brut vs témoin non fertilisé) sur la production de fourrage en prairies (rendement et qualité fourragère) et sur des variables microbiennes (biomasse microbienne carbonée et azotée ainsi que des mesures d'activités enzymatiques relatives aux différents cycles biogéochimiques du carbone, azote, phosphore et soufre) en lien avec la fertilité biologique des sols (Petitjean *et al.*, 2019).

Matériel et méthodes

Les sites expérimentaux

Figure 1 : Carte des différents sites expérimentaux suivis entre 2017 et 2019

Cinq sites expérimentaux sont suivis dans le cadre de ce projet Interreg (Figure 1). Les sites d'Emmels, Steinborn, Erpeldange et La Bouzule ont été mis en place au début du projet en février 2017. Le site de Grendel qui était déjà installé et pour lequel nous n'avons pas de caractérisation initiale n'a pas été inclus dans l'analyse des résultats de fonctionnement microbien. Les caractéristiques physico-chimiques des sols des 4 sites retenus sont présentés dans le Tableau 1. Le tableau 1 met en évidence des textures différentes selon les sites expérimentaux considérés, avec le site de Steinborn présentant un sol à dominante sableuse alors que les sites d'Emmels et Erpeldange sont à dominante limoneuse. Le site de la Bouzule présente une teneur en calcaire plus importante et un pH proche de 8,2 contre 5,8 sur le site d'Emmels. La teneur en C organique est deux fois plus importante sur le site de Emmels (38,4‰) que de Steinborn (19,5‰). Les sites de la Bouzule et d'Erpeldange ont des teneurs en C organique intermédiaire proches autour de 32‰. Cette caractérisation initiale met en évidence des différences de propriétés physico-chimiques plus importantes entre les sites qu'entre les blocs d'un même site. Cela suggère que nous disposons donc d'un gradient pédoclimatique et que les différents sites présentent une faible hétérogénéité.

Tableau 1 : Principales caractéristiques physico-chimiques des sols présents sur les sites au moment de la mise en place des modalités de fertilisation.

Site	Argile (‰)		Limons (‰)		Sables (‰)		pH	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Bouzule (n=4)	255,75	46,31	348,00	21,34	336,50	66,98	8,23	0,05
Emmels (n=4)	102,50	67,94	625,25	91,47	206,25	39,29	5,78	0,13
Erpeldange (n=4)	170,50	75,33	571,25	69,60	205,25	9,98	6,23	0,05
Steinborn (n=4)	187,75	6,40	238,75	37,75	540,25	30,58	6,58	0,75

Site	Calcaire (CaCO3) total (‰)		Azote (N) total (‰)		Carbone (C) organique (‰)	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Bouzule (n=4)	451,00	70,04	3,85	0,17	34,60	1,62
Emmels (n=4)	0,00	0,00	4,03	0,13	38,40	1,84
Erpeldange (n=4)	0,00	0,00	3,68	0,10	30,58	0,65
Steinborn (n=4)	1,25	1,89	1,90	0,08	19,53	1,05

Modalités étudiées

L'ensemble des sites correspondent à des prairies permanentes (PP) à l'exception du site de La Bouzule qui présente à la fois un essai sur PP et un autre sur prairie temporaire (PT) implantée en 2017. Cinq modalités de fertilisation communes à tous les sites ont été mises en place selon un dispositif en bloc avec randomisation (4 répétitions / modalité) pour l'étude :

- Témoin non fertilisé (Contrôle)
- Digestat brut de la ferme du Faascht (DBF) (commun à tous les sites) : 230 unités N
- Digestat brut local (DBL) : 230 unités N
- Lisier brut local (LBL) : 230 unités N
- Nitrate d'ammonium (Nammo) : 230 unités N

Les apports de fertilisants ont été fractionnées en 4 apports. Les 230 unités N ont été réparties équitablement sur ces 4 apports. Le tableau 2 précise les dates d'apport pour chacune des années.

Tableau 2 : Date d'apport des fertilisants en 2017 et 2018

Année	1er apport	2ème apport	3ème apport	4ème apport
2017	16 mars	30 mai	12 juillet	13 septembre
2018	29 mars	7 mai	18 juin	11 octobre

Chaque modalité correspond à une microparcelle de 9 à 12m² selon les sites. Les caractéristiques des différents digestats sont détaillées dans le tableau 3.

Tableau 3 : Caractéristiques des différents digestats et lisiers selon les sites d'épandage.

Modalité de fertilisation	% MS	N total (kg/tonne frais)	NH_4 (kg/tonne frais)	N-NH_4/N Total	K_2O (kg/tonne frais)	P_2O_5 (kg/tonne frais)
DBF	6,5	6,4	4,0	63%	3,7	1,9
DBL BOUZULE	3,5	2,1	0,6	30%	2,2	0,7
DBL EMMELS	4,5	4,4	2,8	64%	4,4	1,2
DBL ERPELDANGE	8,4	5,6	3,3	58%	6,3	2,4
DBL STEINBORN	6,8	3,8	1,8	48%	6,0	1,9
LBL BOUZULE	6,0	2,9	1,4	48%	3,0	1,3
LBL EMMELS	6,8	4,0	2,1	53%	5,5	1,5
LBL ERPELDANGE	6,3	2,9	1,4	47%	2,7	1,3
LBL STEINBORN	5,7	3,4	1,1	31%	4,4	1,3

Variables mesurées

Production fourragère (quantité de biomasse et qualité fourragère)

Les campagnes de fauche 2017 et 2018 ont été analysées sur l'ensemble des sites (Grendel-Attert, Bouzule PP, Erpeldange, Steinborn, Emmels). Trois fauches ont été réalisées par an et par site (sauf Bouzule Prairie Permanente (PP) 2018 – 2 fauches). Pour la production de biomasse, une pesée de la biomasse totale fauchée sur chaque microparcelle est réalisée à chaque fauche. La détermination de la teneur en MS est faite sur un échantillon par microparcelle placé en étuve à 65 °C.
Pour ce qui est de la qualité fourragère, le second essai présent sur le site de La Bouzule (PT) a été intégré à l'analyse. Les échantillons ainsi séchés sont envoyés pour analyse de teneur en minéraux et valeur fourragère :

- Les minéraux analysés sont MgO, CaO, Na_2O, K_2O, P_2O_5 (respectivement Magnésium, Calcium, Sodium, Potassium et Phosphore), cendres
- Les indicateurs de valeurs fourragères sont MAT, UFL, FOS, ADL, ADF, NDF, CELL, PROTTOT, PDIE, PBD, SSTOTAUX (respectivement Matière Azotée Totale, Unité fourragère Lait, Matière organique fermentescible, Acid Detergent Lignin, Acid Detergent Fiber, Neutral Detergent Fiber, Cellulose, Protéines totales, Protéines digestibles dans l'intestin grêle permises par l'énergie, Protéines brutes digestibles, Sucres Solubles totaux)

Variables microbiennes

Des prélèvements sont effectués deux fois par an : en février / mars avant les premiers apports d'azote et en octobre avant la dernière fauche de l'année. Quatre prélèvements sont réalisés sur chaque micro-parcelle sur 15 cm de profondeur. Les sols sont ensuite tamisés à 5 mm et stockés à 4°C quelques jours avant détermination des différentes variables microbiennes. Pour caractériser le fonctionnement du sol, nous avons suivi différents indicateurs :

- La biomasse microbienne carbonée et azotée. La méthode utilisée pour le dosage de la biomasse microbienne du sol est celle de la fumigation-extraction (Vance *et al.*, 1987).
- Six activités enzymatiques microbiennes impliquées dans différentes étapes de la minéralisation des MOS. : Les leucine aminopeptidases (hydrolyse des liaisons peptidiques des peptides), Nacetylglucosaminidases (hydrolyse de la chitine), les ß-glucosidases (hydrolyse des oligosaccharides), les arylsulfatases (hydrolyse des esters de sulfates) et les phosphatases acides (hydrolyse des esters de phosphate). Ces activités enzymatiques (exprimées en nmol/h/g sol sec) ont été dosées par fluorimétrie (Petitjean et al., 2018).
- les pools extractibles à l'eau chaude de carbone et azote total (Sparling *et al.,* 1998).

En raison de l'antériorité du site d'Attert-Grendel, ces variables n'ont été mesurées que sur les sites de Emmels, Steinborn, Bouzule PP et PT et Erpeldange en mars 2019, permettant ainsi de mesurer les effets de deux années de pratiques culturales.

Analyse statistique

Pour la biomasse produite, une analyse de variance à deux facteurs (Site et Traitement) a été réalisée pour chaque année. Pour la qualité des fourrages (teneur en minéraux et valeurs fourragères), une analyse de données non-supervisée a été réalisée avec une analyse en composante principale (ACP) suivie d'une classification ascendante hiérarchique (CAH). Les teneurs en MgO, CaO, Na_2O, K_2O, P_2O_5, cendres ont été utilisées en variables actives et les rendements en MS et les dates de fauche ont été notés en variables illustratives.
Pour les valeurs fourragères, MAT, UFL, FOS, ADL, ADF, NDF, CELL, PROTTOT, PDIE, PBD, SSTOTAUX ont été utilisées en variables actives alors que les rendements en MS et les dates de fauche ont été utilisés en variables illustratives.

Résultats et discussion

Quantité de biomasse produite en 2017 et 2018

Les quantités de biomasse (kg MS ha^{-1}) produites par coupe ont été cumulées afin de comparer les 5 modalités de fertilisation entre elles (Figures 2 à 5). Pour les deux années malgré une interaction traitement*site (p=0,06 en 2017 et p=0,008 en 2018) des tendances peuvent être observées : la modalité Nammo est celle qui permet d'obtenir la biomasse la plus élevée sur les deux années, et à l'inverse la modalité Contrôle correspond au rendement le plus faible. Pour les digestats et le lisier, aucune hiérarchie entre ces trois modalités ne peut être établie (Figure 2 et Figure 3). L'analyse de données met en évidence un fort effet site avec des rendements moyens notamment sur le site d'Erpeldange quasiment trois fois plus élevés que sur le site d'Attert-Grendel.

Ainsi, malgré cette interaction traitement*site, une analyse de variance testant uniquement l'effet traitement a été réalisée (Figure 4 et Figure 5) ; comme déjà vu sur les figures 2 et 3 quelle que soit l'année, la modalité Nammo permet d'obtenir le niveau de biomasse produite le plus élevée en comparaison de la modalité Contrôle qui présente le niveau de biomasse le plus faible. Les digestats et le lisier sont intermédiaires.

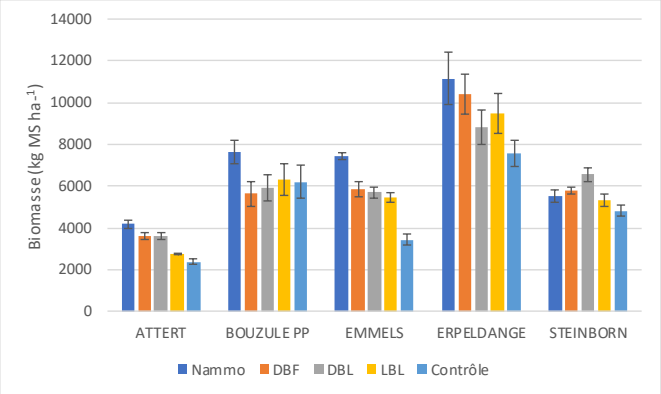


Figure 2 : Rendements croisés moyens pour l'année 2017 par site et par traitement. (p value site = 2.10^{-16} ; p value traitement*site = 0,06)

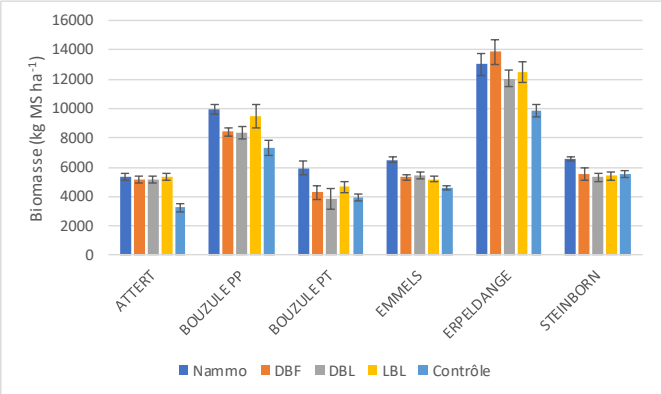


Figure 3 : Rendements croisés moyens pour l'année 2018 par site et par traitement. (p value site = 2.10^{-16} ; p value traitement*site = 0,008)

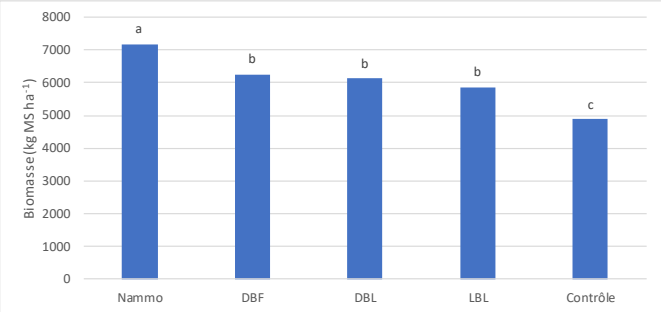


Figure 4 : Rendements moyens pour l'année 2017 tous sites confondus. Des lettres différentes indiquent une différence significative entre les modalités comparées (p value=9.10^{-7})

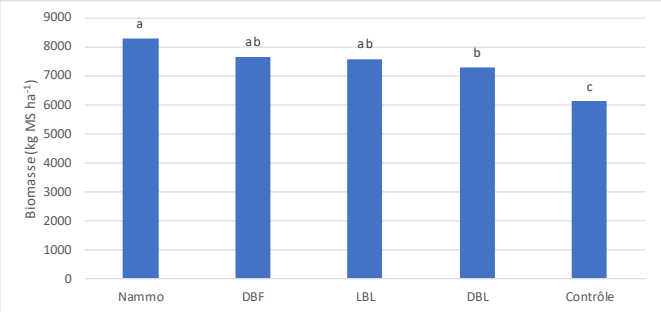


Figure 5 : Rendements moyens pour l'année 2018 tous sites confondus. Des lettres différentes indiquent une différence significative entre les modalités comparées (p value=3.10^{-9})

La biomasse obtenue en 2017 par la fertilisation au nitrate d'ammonium est significativement plus élevée (7190 kg MS ha^{-1}) que celle permise par le témoin non fertilisé (4880 MS ha^{-1}), soit 2310 kg MS ha^{-1} en plus (+47%) avec 230 unités d'azote sous forme de nitrate d'ammonium – en moyenne sur tous les sites – soit un peu plus de 10 kg MS ha^{-1} unité N^{-1} (Figure 4). Les trois autres modalités Digestat Brut Local, Digestat Brut du Faascht, Lisier Brut Local sont intermédiaires. Elles ne sont pas différentes entre elles mais sont statistiquement différentes des modalités NAmmo et Contrôle. Ainsi à l'issue de la première année de façon globalisée sur l'ensemble des sites, les modalités digestats et lisier ne se discriminent pas sur la base du rendement fourrager.

En 2018, le rendement de la modalité NAmmo est statistiquement supérieur aux modalités Digestat brut local (DBL) et Contrôle (Figure 5). Les modalités Digestat Brut de Faascht (DBF) et Lisier (LBL) sont intermédiaires et non différentes des modalités NAmmo et DBL. Si l'on compare les rendements 2017 et 2018, il apparait que :

- Les rendements moyens 2018 de chaque modalité sont plus élevés que l'année précédente (+15 à +25% selon les modalités)
- Le classement des modalités par ordre de productivité décroissante est le même en 2018 qu'en 2017, avec toujours une productivité plus élevée pour NAmmo, puis les deux digestats (DBL et DBF) et le lisier (LBL) et enfin le Contrôle.
- L'apport de 230 unités N sous forme de nitrate d'ammonium permet en 2018 la production de 2170 kg MS ha^{-1} supplémentaire par rapport au contrôle, proche du résultat observé en 2017.
- L'effet site est identique en 2017 et 2018.

<u>Qualité des fourrages récoltés : teneur en minéraux</u>

L'évolution des variations de la teneur en minéraux des fourrages a été abordée par une analyse de variance à trois facteurs. Cette approche permet de mettre en évidence systématiquement des effets simples significatifs (site, traitement, coupe), des interactions doubles variables en fonction des minéraux testés mais pas d'interaction triple significative. Pour des questions de lisibilité le tableau d'analyse de variance à trois facteurs Site*Traitement*Coupe n'est pas présenté.

Les histogrammes présentés en figure 6A, 6B, 6C, 6D illustrent pour deux teneurs en minéraux (K_2O et P_2O_5) et uniquement pour la première coupe de chaque année, les interactions Traitement*Site. Il existe également une interaction Traitement*Site différente selon les années pour un élément considéré.

Ainsi il apparaît difficile par l'ANOVA de donner des conclusions génériques sur l'effet des facteurs simples ou des interactions doubles ou triple pour les minéraux étudiés.

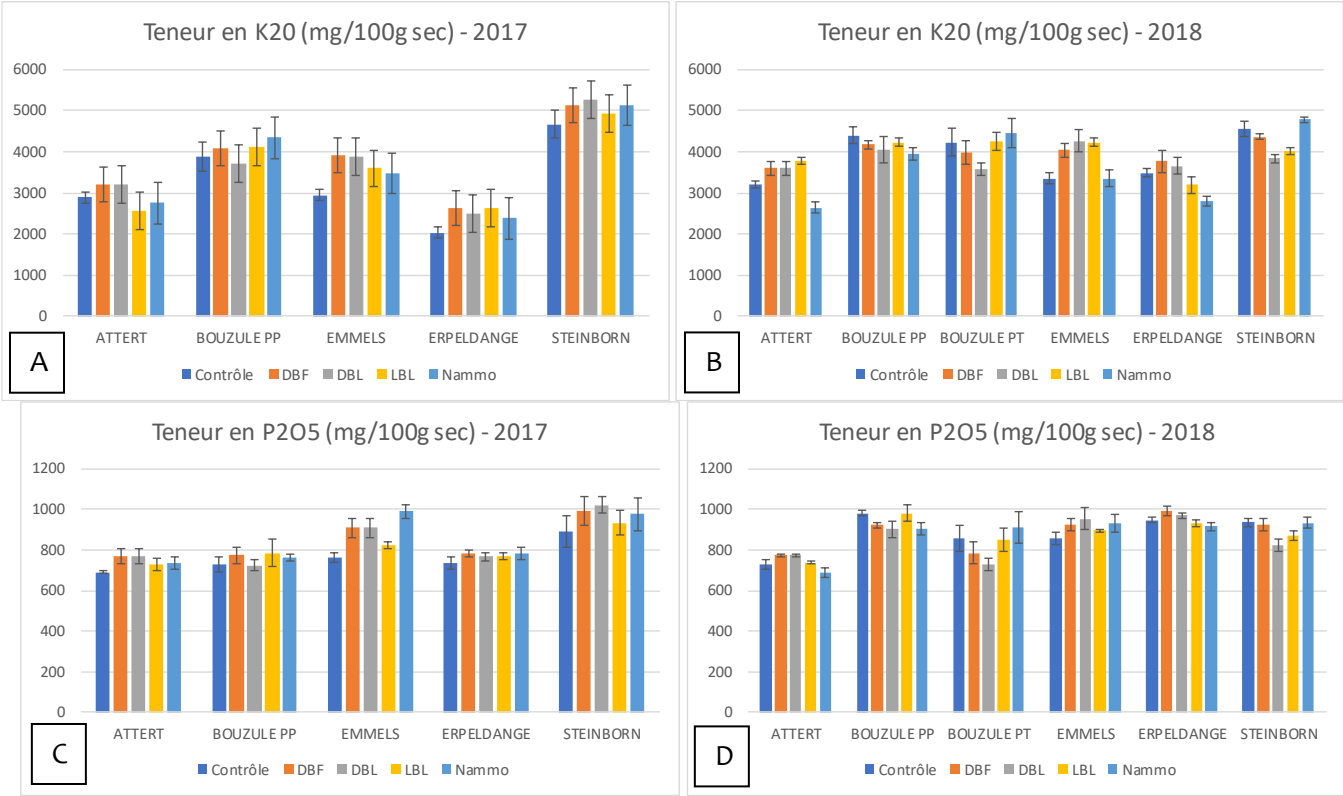


Figure 6 : Teneur des fourrages récoltés en mg pour 100g sec de K2O (A et B) et P2O5 (C et D) pour chaque traitement et chaque site de la première coupe de 2017 (A et C) et 2018 (B et D).

Une analyse en composantes principales (ACP) est réalisée sur les 6 variables qui caractérisent les teneurs en minéraux des fourrages. Les deux premières dimensions de l'ACP expliquent environ 60% de l'inertie du nuage de points. Les variables MGO, CAO, NA2O et K2O (respectivement teneur en magnésium, calcium, sodium et potassium) contribuent le plus à la construction de l'axe 1, et les variables cendre, P2O5 et K2O contribuent le plus à la construction de l'axe 2. Une projection (Figure 7A) des individus selon leur appartenance aux « modalité de fertilisation », variable qui ne participe pas à la construction de l'ACP, montre qu'il n'est pas possible de mettre en évidence par cette méthode d'effet des modalités de fertilisation sur la teneur en minéraux des fourrages récoltés. Les mêmes conclusions peuvent être proposées pour le lien entre le rendement en matière sèche et la date utilisées en variables illustratives quantitatives et les 6 variables qui caractérisent les teneurs en minéraux des fourrages (Figure 7B).

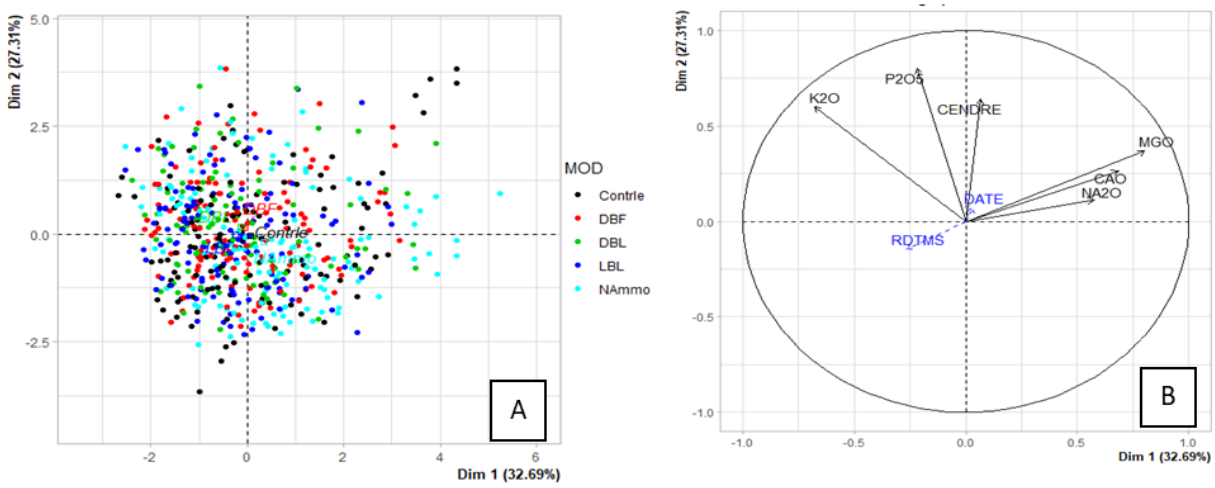


Figure 7 : Analyse en composantes principales (dimensions 1 et 2) effectuée sur les teneurs en minéraux mesurées sur les 5 modalités de fertilisation pour l'ensemble des sites en 2017 et 2018. Les individus sont regroupés sur le graphique A selon la variable « modalité de fertilisation » et les variables de construction du plan factoriel sont représentées sur le cercle des corrélations sur le graphique B.

La classification ascendante hiérarchique (CAH) réalisée (données non montrées) confirme comme la représentation graphique (Figure 7A) que les modalités de fertilisation n'ont pas d'effets sur les teneurs en minéraux des fourrages. En revanche, si les individus sont regroupés selon la variable « sites expérimentaux » (Figure 8A), les regroupements suggèrent un effet des conditions pédoclimatiques supérieur à l'effet du mode de fertilisation. De la même façon, le numéro d'ordre de la coupe dans l'année apparaît supérieur à l'effet du mode de fertilisation (Figure 8B).

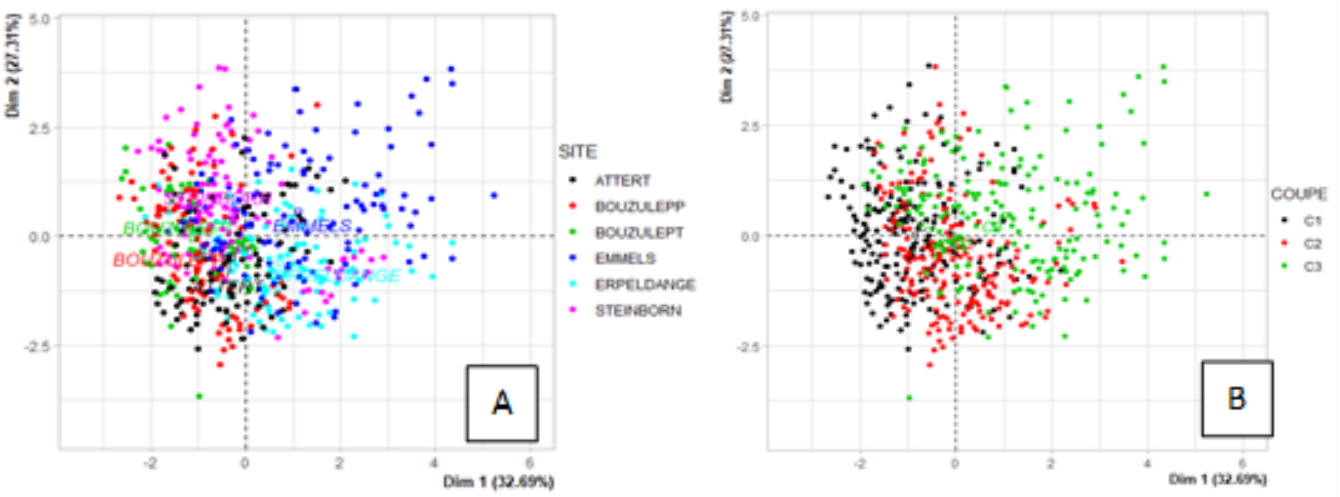


Figure 8 : Analyse en composantes principales (dimensions 1 et 2) effectuée sur les teneurs en minéraux mesurées sur les 5 modalités de fertilisation pour l'ensemble des sites en 2017 et 2018. Les individus sont regroupés sur le graphique A selon la variable « site » et sur le graphique B selon la variable illustrative « numéro d'ordre de la coupe »

<u>Qualité des fourrages récoltés : valeurs fourragères</u>

Toutes les variables relatives aux « valeurs fourragères » sur les deux années ont été utilisées pour réaliser une ACP. Les deux premières dimensions de l'ACP expliquent plus de 81 % de l'inertie du nuage de points (Figure 9B). Les variables UFL, FOS, ADL, ADF, NDF et CELL (Unité fourragère Lait, Matière organique fermentescible, Acid Detergent Lignin, Acid Detergent Fiber, Neutral Detergent Fiber, Cellulose) contribuent le plus à la construction de l'axe 1, alors que PROTTOT, PDIE, PBD, SSTOTAUX (Protéines totales, Protéines digestibles dans l'intestin grêle permises par l'énergie, Protéines brutes digestibles, Sucres Solubles totaux) contribuent le plus à la construction de l'axe 2 (Figure 9B).

Une projection (Figure 9A) des individus selon leur appartenance aux « modalité de fertilisation », variable qui ne participe pas à la construction de l'ACP, montre qu'il n'est pas possible de mettre en évidence par cette méthode d'effet des modalités de fertilisation sur la valeur fourragère des fourrages récoltés.

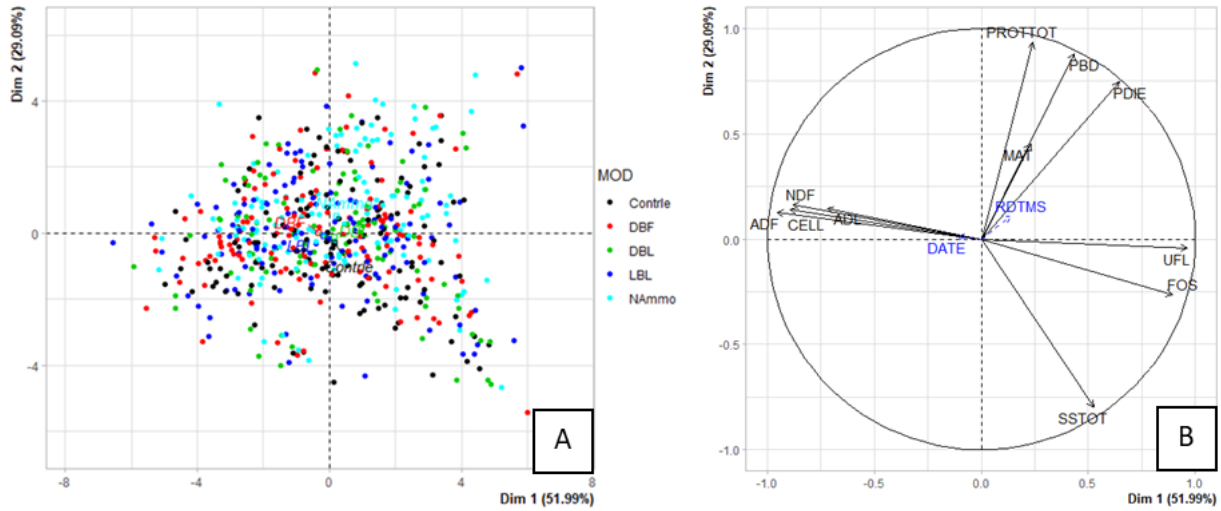


Figure 9 : Analyse en composantes principales (dimensions 1 et 2) effectuée sur les valeurs fourragères mesurées sur les 5 modalités de fertilisation pour l'ensemble des sites en 2017 et 2018. Les individus sont regroupés sur le graphique A selon la variable « modalité de fertilisation » et les variables de construction du plan factoriel sont représentées sur le cercle des corrélations sur le graphique B.

Comme pour la teneur des fourrages en minéraux, l'effet site et l'effet du numéro d'ordre de la fauche apparaissent plus importants que l'effet modalité de fertilisation. Les deux analyses en composantes principales (Figure 10A et 10B) montrent que les variables « site » et « Numéro d'ordre de la fauche », qui ne participent pas à la construction de l'ACP, permettent de discriminer des groupes d'individus appartenant à la même modalité (site pour la Figure 10A et numéro de fauche pour la Figure 10B).

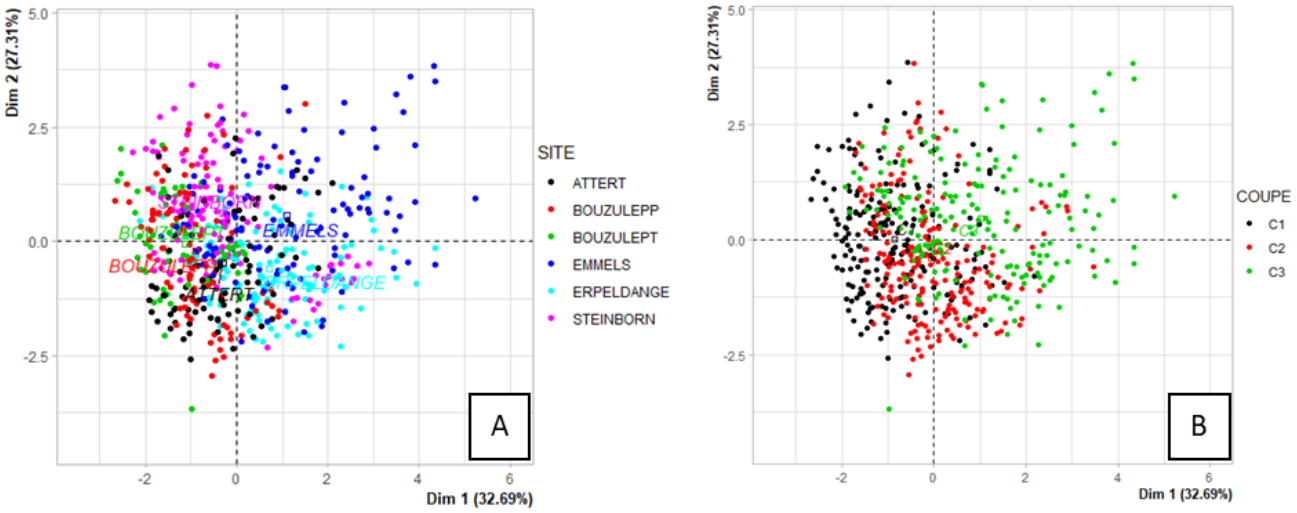


Figure 10 : Analyse en composantes principales (dimensions 1 et 2) effectuée sur les valeurs fourragères mesurées sur les 5 modalités de fertilisation pour l'ensemble des sites en 2017 et 2018. Les individus sont regroupés sur le graphique A selon la variable « site » et sur le graphique B selon la variable illustrative « numéro d'ordre de la coupe »

En comparaison à un effluent d'élevage brut (fumier ou lisier), le digestat contient potentiellement plus d'azote biodisponible pour les plantes en raison d'une plus grande proportion des formes d'ammonium (NH_4^+) (Möller et Müller, 2012). Nos résultats mettent en évidence qu'en 2017, si les digestats ont un effet fertilisant significatif en comparaison d'un témoin non fertilisé, ils ne permettent pas d'atteindre une biomasse fourragère équivalente à la modalité ammonitrate et ne se différencient pas des effluents bruts. En 2018, les digestats apparaissent intermédiaires entre le témoin non fertilisé et la modalité ammonitrate. Peu d'études sont référencées dans la bibliographie sur les effets de l'épandage de digestats sur les rendements et la qualité fourragère des prairies permanentes. La majorité des essais sont conduits sur des modèles prairies temporaires avec des peuplement monospécifique de ray-grass anglais ou en mélange avec des légumineuses semés en conditions contrôlées ou sur des parcelles d'essai. De plus les digestats de méthanisation présentent une grande diversité de composition en fonction de la ration et de la conduite du procédé de méthanisation (Guilayn *et al.*, 2019). En conditions contrôlées, Walsh *et al.* (2012) mettent en évidence une biomasse cumulée sur 16 semaines du mélange ray-grass-trèfle blanc significativement supérieure avec une fertilisation à base de digestats de méthanisation (150 unités d'N) en comparaison des autres modalités de fertilisation (témoin non fertilisé, effluents bruts, engrais minéral). Un essai reprenant ces mêmes modalités de fertilisation sur des prairies temporaires nouvellement semées en ray-grass entre 2011 et 2013 montre d'une part des rendements obtenus la 1ère année du même ordre de grandeur que nos essais (environ 9 tonnes de MS ha^{-1}) et d'autre part que les rendements cumulés sur 3 ans sont significativement plus élevés pour la modalité «digestat brut» que pour la modalité «nitrate d'ammonium», ces rendements n'étant pas différents de ceux de la modalité «lisier brut» (Walsh *et al.*, 2018). Concernant la teneur en minéraux et la qualité fourragère, aucun effet du mode de fertilisation n'a pu être mis en évidence en 2017 et 2018 ce qui est en cohérence avec les travaux de

Walsh *et al.* (2018). Le fait que la biomasse récoltée dans notre étude présente des caractéristiques différentes selon les sites étudiés pourrait s'expliquer par des différences à la fois de paramètres physico-chimiques des sols et de pratiques de gestion (fertilisation, régime de fauche…) antérieures à la mise en place des essais qui sont certainement à l'origine de différences de compositions floristiques entre les sites. En effet des apports répétés d'azote sous forme minérale peuvent diminuer la proportion de légumineuses dans les mélanges prairiaux et la fixation symbiotique (Nesheim *et al.*, 1990), ce qui peut modifier la qualité fourragère.

Fonctionnement microbien des sols

Le tableau 4 présente les moyennes et les écarts-types des variables microbiennes suivies sur les différents sites.

Tableau 4 : Moyenne ±écart-type des variables microbiennes des sols (0-15 cm) pour les différents dispositifs expérimentaux.

Steinborn	Bglu	LAP	ARS	Phos	NAG	BMC	BMN	HWC	HWN	N-NO_3
	nmoles h^{-1} g^{-1} sol					µg C g^{-1} sol	µg N g^{-1} sol	µg C g^{-1} sol	µg N g^{-1} sol	µg N g^{-1} sol
Témoin	0,541 ± 0,025	0,363 ± 0,070	0,165 ± 0,015	1,085 ± 0,140	0,226 ± 0,033	296,2 ± 106,3	37,4 ± 18,0	380,5 ± 192,1	54,9 ± 26,3	14,1 ± 4,6
Nitrate d'ammonium : 230 unités N	0,485 ± 0,061	0,284 ± 0,066	0,128 ± 0,024	0,973 ± 0,218	0,220 ± 0,067	343,4 ± 191,9	46,1 ± 11,1	550,8 ± 135,1	70,9 ± 8,5	14,3 ± 3,9
Lisier Brut local : 230 unités N	0,536 ± 0,034	0,387 ± 0,100	0,139 ± 0,014	1,001 ± 0,093	0,241 ± 0,024	356,2 ± 26,8	48,3 ± 14,4	471,7 ± 311,1	61,5 ± 34,2	11,4 ± 0,5
Digestat Brut local : 230 unités N	0,602 ± 0,209	0,309 ± 0,052	0,145 ± 0,037	1,031 ± 0,154	0,252 ± 0,016	388,1 ± 148,6	49,2 ± 7,5	450,0 ± 267,1	57,2 ± 25,9	11,2 ± 2,2
Digestat brut Faascht : 230 unités N	0,599 ± 0,143	0,377 ± 0,195	0,141 ± 0,054	0,979 ± 0,249	0,268 ± 0,053	316,8 ± 125,9	53,3 ± 10,4	472,5 ± 184,1	68,4 ± 23,5	11,6 ± 1,3

Emmels	Bglu	LAP	ARS	Phos	NAG	BMC	BMN	HWC	HWN	N-NO_3
	nmoles h^{-1} g^{-1} sol					µg C g^{-1} sol	µg N g^{-1} sol	µg C g^{-1} sol	µg N g^{-1} sol	µg N g^{-1} sol
Témoin	0,932 ± 0,374	0,249 ± 0,041	0,214 ± 0,047	1,546 ± 0,170	0,246 ± 0,074	529,4 ± 170,3	70,9 ± 16,0	562,5 ± 48,4	69,2 ± 5,5	15,6 ± 8,3
Nitrate d'ammonium : 230 unités N	0,892 ± 0,393	0,334 ± 0,059	0,215 ± 0,068	1,340 ± 0,211	0,270 ± 0,129	609,6 ± 53,4	65,1 ± 13,6	595,1 ± 53,3	76,0 ± 6,4	26,0 ± 6,0
Lisier Brut local : 230 unités N	0,841 ± 0,333	0,305 ± 0,125	0,185 ± 0,014	1,295 ± 0,169	0,243 ± 0,132	514,8 ± 111,5	60,4 ± 10,0	634,9 ± 67,3	82,1 ± 13,8	23,4 ± 8,4
Digestat Brut local : 230 unités N	0,766 ± 0,127	0,307 ± 0,117	0,194 ± 0,038	1,417 ± 0,183	0,260 ± 0,048	584,0 ± 106,4	85,1 ± 27,2	654,3 ± 45,6	84,9 ± 5,3	31,2 ± 6,0
Digestat brut Faascht : 230 unités N	1,032 ± 0,370	0,275 ± 0,122	0,187 ± 0,027	1,284 ± 0,322	0,232 ± 0,079	500,0 ± 120,1	68,5 ± 13,4	627,1 ± 101,7	73,3 ± 9,2	21,8 ± 9,0

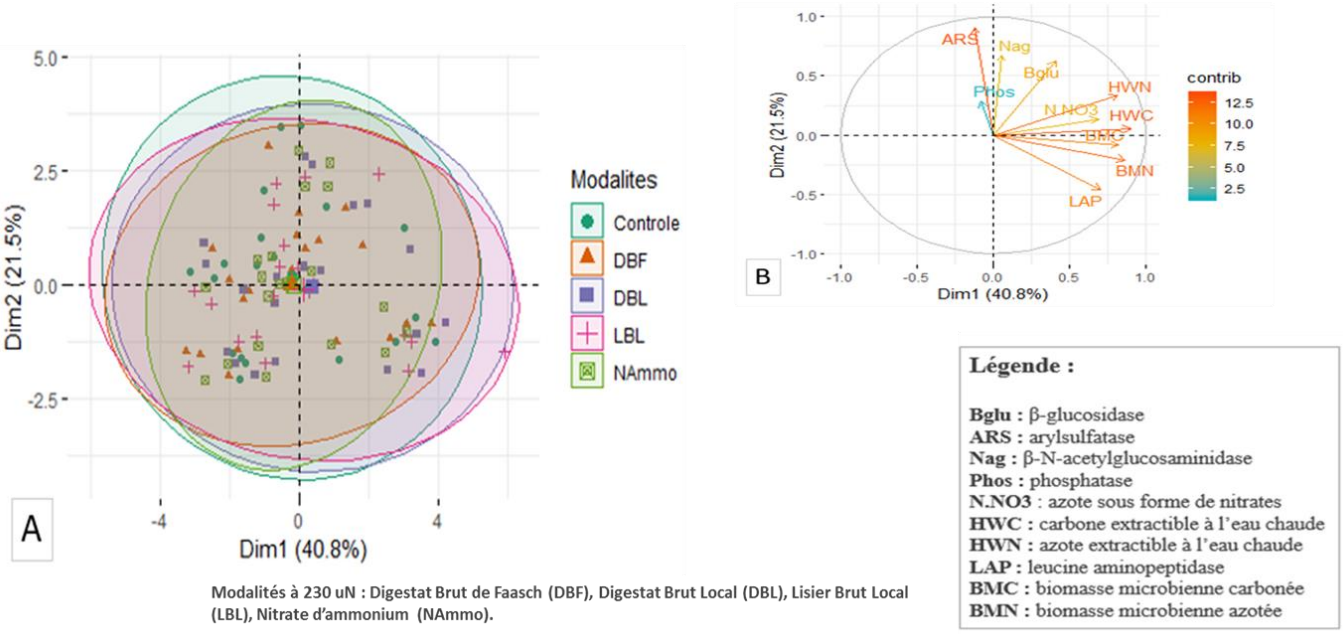
Bouzule PP	Bglu	LAP	ARS	Phos	NAG	BMC	BMN	HWC	HWN	N-NO_3
	nmoles h^{-1} g^{-1} sol					µg C g^{-1} sol	µg N g^{-1} sol	µg C g^{-1} sol	µg N g^{-1} sol	µg N g^{-1} sol
Témoin	0,653 ± 0,173	0,903 ± 0,201	0,049 ± 0,004	0,458 ± 0,076	0,213 ± 0,049	652,8 ± 333,0	109,1 ± 39,6	813,6 ± 90,6	90,0 ± 11,8	33,0 ± 18,8
Nitrate d'ammonium : 230 unités N	0,671 ± 0,144	0,846 ± 0,217	0,051 ± 0,010	0,420 ± 0,130	0,247 ± 0,082	633,3 ± 144,3	93,3 ± 20,9	792,3 ± 16,6	84,9 ± 2,9	29,9 ± 18,1
Lisier Brut local : 230 unités N	0,676 ± 0,157	1,169 ± 0,221	0,055 ± 0,002	0,471 ± 0,091	0,271 ± 0,080	735,4 ± 104,0	128,5 ± 22,7	877,3 ± 78,5	95,8 ± 9,5	31,8 ± 11,1
Digestat Brut local : 230 unités N	0,536 ± 0,235	0,796 ± 0,097	0,051 ± 0,012	0,433 ± 0,133	0,206 ± 0,094	929,3 ± 172,1	125,5 ± 33,9	818,6 ± 95,0	88,7 ± 11,2	35,6 ± 18,9
Digestat brut Faascht : 230 unités N	0,718 ± 0,203	0,828 ± 0,262	0,052 ± 0,008	0,495 ± 0,137	0,240 ± 0,101	739,5 ± 58,4	111,0 ± 17,2	804,8 ± 87,0	89,2 ± 10,6	24,3 ± 7,5

Bouzule PT	Bglu	LAP	ARS	Phos	NAG	BMC	BMN	HWC	HWN	N-NO_3
	nmoles h^{-1} g^{-1} sol					µg C g^{-1} sol	µg N g^{-1} sol	µg C g^{-1} sol	µg N g^{-1} sol	µg N g^{-1} sol
Témoin	0,413 ± 0,047	0,466 ± 0,098	0,044 ± 0,005	0,421 ± 0,067	0,116 ± 0,016	477,1 ± 80,2	67,1 ± 6,7	386,5 ± 15,6	28,4 ± 2,4	10,5 ± 6,3
Nitrate d'ammonium : 230 unités N	0,403 ± 0,106	0,492 ± 0,142	0,043 ± 0,013	0,390 ± 0,131	0,118 ± 0,022	488,5 ± 158,4	61,3 ± 14,3	401,3 ± 82,3	29,6 ± 5,4	9,1 ± 4,8
Lisier Brut local : 230 unités N	0,433 ± 0,105	0,419 ± 0,106	0,039 ± 0,008	0,387 ± 0,123	0,117 ± 0,029	360,8 ± 148,6	54,3 ± 18,8	411,4 ± 79,1	36,5 ± 10,9	16,9 ± 11,1
Digestat Brut local : 230 unités N	0,441 ± 0,066	0,521 ± 0,136	0,044 ± 0,006	0,372 ± 0,070	0,109 ± 0,016	459,3 ± 109,4	64,4 ± 12,1	439,7 ± 51,1	33,8 ± 4,9	10,9 ± 3,4
Digestat brut Faascht : 230 unités N	0,443 ± 0,170	0,426 ± 0,087	0,0446 ± 0,013	0,386 ± 0,121	0,098 ± 0,012	214,7 ± 140,1	42,6 ± 14,3	397,9 ± 62,2	32,1 ± 11,1	10,6 ± 5,8

Erpeldange	Bglu	LAP	ARS	Phos	NAG	BMC	BMN	HWC	HWN	N-NO_3
	nmoles h^{-1} g^{-1} sol					µg C g^{-1} sol	µg N g^{-1} sol	µg C g^{-1} sol	µg N g^{-1} sol	µg N g^{-1} sol
Témoin	0,675 ± 0,306	0,677 ± 0,268	0,186 ± 0,030	1,031 ± 0,074	0,223 ± 0,104	522,9 ± 157,8	68,5 ± 18,7	581,3 ± 145,5	67,8 ± 12,7	26,1 ± 9,1
Nitrate d'ammonium : 230 unités N	0,614 ± 0,064	0,561 ± 0,122	0,158 ± 0,009	0,949 ± 0,120	0,173 ± 0,026	465,6 ± 101,8	65,4 ± 11,0	538,2 ± 35,2	59,4 ± 1,9	21,7 ± 6,7
Lisier Brut local : 230 unités N	0,549 ± 0,140	0,595 ± 0,096	0,158 ± 0,027	0,862 ± 0,158	0,212 ± 0,035	492,7 ± 52,8	74,7 ± 11,6	560,4 ± 80,0	63,1 ± 10,1	24,6 ± 8,4
Digestat Brut local : 230 unités N	0,616 ± 0,156	0,606 ± 0,176	0,166 ± 0,027	0,936 ± 0,142	0,239 ± 0,145	602,1 ± 186,0	86,8 ± 33,1	597,5 ± 139,7	70,0 ± 16,1	23,7 ± 7,0
Digestat brut Faascht : 230 unités N	0,685 ± 0,141	0,601 ± 0,134	0,167 ± 0,036	0,957 ± 0,194	0,233 ± 0,083	479,0 ± 131,5	67,3 ± 16,8	614,5 ± 142,1	66,5 ± 15,5	24,6 ± 10,7

L'analyse en composantes principales (ACP) permet ici de regrouper toutes les variables mesurées sur les échantillons de sol des différents sites échantillonnés en mars 2019 (Tableau 4) afin de synthétiser les données. Cette représentation, avec les deux premières dimensions de l'ACP, explique environ 62 % de l'inertie du nuage de points (Figure 11). Le graphique B, permet de conclure que les variables HWC, HWN (pools extractibles à l'eau chaude de carbone et d'azote) BMN et BMC (carbone et azote d'origine microbienne) contribuent le plus à la construction de l'axe 1. Pour l'axe 2, ce sont les activités enzymatiques ARS et NAG respectivement en lien avec le cycle du soufre et de l'azote qui contribuent le plus à sa construction. Le graphique A qui met en évidence le positionnement des individus dans le plan factoriel déterminé par l'ensemble des variables mesurées, permet de voir que l'ensemble des individus ne sont pas situés selon les

mêmes coordonnées sur les deux axes du plan factoriel. Les cercles correspondent à l'intervalle de confiance des valeurs prises par les individus appartenant à chaque modalité de fertilisation. Ces cercles se chevauchent les uns les autres ce qui suggère qu'au bout de deux années de mise en place des essais, il n'est pas encore possible de distinguer d'effet des modalités de fertilisation sur le fonctionnement microbien du sol. Néanmoins si l'on considère les sites individuellement des différenciations se dessinent notamment sur le site de Steinborn entre les modalités fertilisées et les modalités non fertilisées.



Modalités à 230 uN : Digestat Brut de Faasch (DBF), Digestat Brut Local (DBL), Lisier Brut Local (LBL), Nitrate d'ammonium (NAmmo).

Figure 11 : Analyse en composantes principales (dimensions 1 et 2) effectuée sur les variables microbiennes mesurées sur les 5 modalités de fertilisation pour l'ensemble des sites en mars 2019. Les individus sont regroupés sur le graphique A selon la variable illustrative « modalité de fertilisation » et les variables de construction du plan factoriel sont représentées sur le cercle des corrélations sur le graphique B.

Néanmoins si l'on regroupe les individus non plus selon les modalités de fertilisation mais selon le site expérimental auxquels ils appartiennent, la Figure 12 met en évidence un regroupement significatif ce qui suggère un effet des conditions pédoclimatiques supérieures au régime de fertilisation.

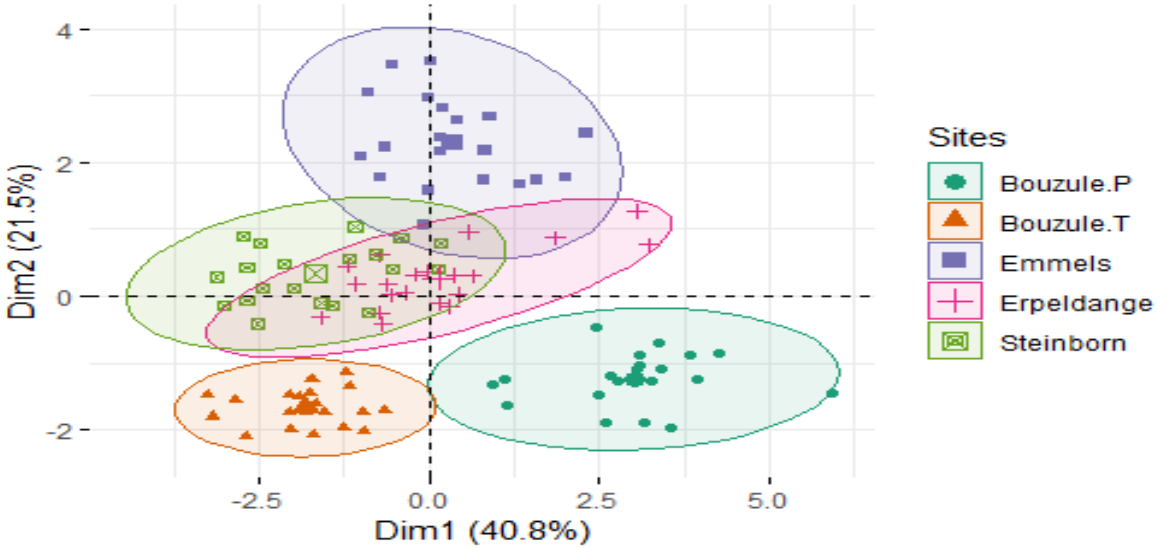


Figure 12 : Analyse en composantes principales (dimensions 1 et 2) effectuée sur les variables microbiennes mesurées sur les 5 modalités de fertilisation pour l'ensemble des sites en mars 2019. Les ellipses correspondent au regroupement des individus selon la variable illustrative « site expérimental ».

L'application des digestats au sol soulève la question de leurs impacts sur le fonctionnement biologique des sols. Dans de nombreuses études, les effets des digestats sur le fonctionnement du sol ont été appréhendés à court terme dans les semaines post-épandage en conditions contrôlées ou in situ. Dans les semaines suivant l'application de digestats au sol, certains auteurs ont mis en évidence une augmentation de la taille et de l'activité de minéralisation des micro-organismes du sol suggérant une utilisation rapide du C et de N des digestats (Odlare *et al.*, 2008) et potentiellement une immobilisation nette d'N d'autant plus élevée pour des digestats à faible ratio C/N (Alburquerque *et al.*, 2012 ; de la Fuente *et al.*, 2013). Dans des pots de cultures, Walsh *et al.* (2012) mettent en évidence que l'application de digestat stimule la communauté bactérienne au même titre que les engrais minéraux. Dans notre cas, les effets des digestats sur le fonctionnement microbien du sol sont appréhendées en sortie d'hiver 2019 soit plusieurs mois après les derniers épandages de fin 2018. Aucun effet des modalités de fertilisations n'est mis en évidence. Ces résultats sont cohérents avec d'autres études sur des essais longue durée pour lesquels l'application de digestats ne modifie pas significativement l'abondance de bactéries et de champignons du sol ni leur diversité (Coehlo *et al.*, 2019, 2020).

Conclusion et perspectives

Deux années après la mise en place de ce dispositif expérimental européen sur cinq sites de prairie permanente, dans des contextes pédoclimatiques différents, le constat est fait que les rendements en biomasse sont significativement plus élevés sur les parcelles fertilisées par 230 unités d'azote sous forme de nitrate d'ammonium en comparaison des parcelles non fertilisées. Les rendements en biomasse des parcelles fertilisées (230 unités) par du lisier brut ou du digestat sont intermédiaires.

Malgré cette différence de biomasse, les valeurs fourragères et les teneurs en éléments minéraux des fourrages récoltés ne permettent pas de discriminer les modalités de fertilisation. Les valeurs fourragères et les teneurs en éléments minéraux discriminent davantage les différents sites ou encore le numéro d'ordre de la fauche dans l'année. Par ailleurs, après deux années d'expérimentation, il n'est pas possible non plus de distinguer d'effet des modalités de fertilisation sur le fonctionnement microbien des sols. Le dispositif étudié ici est assez unique dans le

sens où il compare cinq modalités de fertilisation (dont du digestat de méthanisation, du lisier et de l'ammonitrate) sur cinq sites aux conditions pédoclimatiques différentes. Le changement de pratique de fertilisation ne permet pas, à nombre d'unités d'azote équivalent apporté, d'assurer la productivité des prairies permanentes, mais permettent en revanche de maintenir la qualité des fourrages récoltés. Deux ans après la mise en place des différents sites, les variables microbiennes suivies, bien que considérées comme des indicateurs de réponse aux changements de pratiques agricoles, ne permettent pas de mettre en évidence d'effets significatifs sur le fonctionnement microbien des sols. Un point d'étape à 5 ans sera réalisé sur ces mêmes dispositifs afin d'évaluer, à moyen terme, l'impact de ce changement de pratique sur l'évolution de la teneur en carbone des sols, les activités microbiennes de ces sols et la qualité des fourrages récoltés.

Références bibliographiques

Abbott, L. K., & Murphy, D. V. (Eds.). (2003). *Soil biological fertility: a key to sustainable land use in agriculture*. Springer Science & Business Media.

Alburquerque, J. A., de la Fuente, C., & Bernal, M. P. (2012). Chemical properties of anaerobic digestates affecting C and N dynamics in amended soils. *Agriculture, ecosystems & environment*, *160*, 15-22.

Coelho, J. J., Hennessy, A., Casey, I., Bragança, C. R. S., Woodcock, T., & Kennedy, N. (2020). Biofertilisation with anaerobic digestates: A field study of effects on soil microbial abundance and diversity. *Applied Soil Ecology*, *147*, 103403.

Coelho, J. J., Hennessy, A., Casey, I., Woodcock, T., & Kennedy, N. (2019). Responses of ryegrass, white clover, soil plant primary macronutrients and microbial abundance to application of anaerobic digestates, cattle slurry and inorganic N-fertiliser. *Applied Soil Ecology*, *144*, 112-122.

de la Fuente, C., Alburquerque, J. A., Clemente, R., & Bernal, M. P. (2013). Soil C and N mineralisation and agricultural value of the products of an anaerobic digestion system. *Biology and Fertility of Soils*, *49*(3), 313-322.

Guilayn, F., Jimenez, J., Martel, J. L., Rouez, M., Crest, M., & Patureau, D. (2019). First fertilizing-value typology of digestates: A decision-making tool for regulation. *Waste management*, *86*, 67-79.

Mäder, P., Fliessbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Fried, P., & Niggli, U. (2002). Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science*, *296*(5573), 1694-1697.

Manlay, R. J., Feller, C., & Swift, M. J. (2007). Historical evolution of soil organic matter concepts and their relationships with the fertility and sustainability of cropping systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *119*(3-4), 217-233.

Möller, K., & Müller, T. (2012). Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: a review. *Engineering in Life Sciences*, *12*(3), 242-257.

Nesheim, L., Boller, B. C., Lehmann, J., & Walther, U. (1990). The effects of nitrogen in cattle slurry and mineral fertilizer on nitrogen-fixation by white clover. *Grass and Forage Science*, *45*(1), 91–9.

Odlare, M., Pell, M., & Svensson, K. (2008). Changes in soil chemical and microbiological properties during 4 years of application of various organic residues. *Waste management*, *28*(7), 1246-1253.

Petitjean, C., Philibert, A., Manneville, V., Amiaud, B., Perrin, A. S., Charrier, X., et al. (2018). Systèmes de polyculture-élevage: quels effets des pratiques agricoles sur les teneurs en matières organiques et le fonctionnement microbien du sol? Fourrages, 236, 239-247

Sparling, G., Vojvodić-Vuković, M., & Schipper, L. A. (1998). Hot-water-soluble C as a simple measure of labile soil organic matter: the relationship with microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, *30*(10-11), 1469-1472.

Vance E.D., Brookes P.C., Jenkinson D.S. (1987). An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 19, 703-707.

Zhang, J. B., Zhu, T. B., Cai, Z. C., Qin, S. W., & Müller, C. (2012). Effects of long-term repeated mineral and organic fertilizer applications on soil nitrogen transformations. *European Journal of Soil Science*, *63*(1), 75-85.

Zhang, Q., Zhou, W., Liang, G., Sun, J., Wang, X., & He, P. (2015). Distribution of soil nutrients, extracellular enzyme activities and microbial communities across particle-size fractions in a long-term fertilizer experiment. *Applied Soil Ecology*, *94*, 59-71.

TÉMOIGNAGE

Synthèse d'essai d'épandage de digestat liquide sur sol argilo-calcaire de 2010 à 2016

*Grégory Vrignaud**

**SAS ABBT sas.abbt@gmail.com*

Un groupement d'agriculteurs et partenaires locaux du Nord Est des Deux-Sèvres (regroupés au sein de la SAS ABBT44) se sont lancés dans la réflexion d'un projet collectif de méthanisation en 2006. Après 5 années d'étude, la construction de ce site de 2 100 MWh en cogénération, avec 75.000 tonnes d'apport de biomasse, toutes sources confondues (effluents, IAA, matières végétales), a démarré, et l'injection d'électricité dans le réseau a commencé en septembre 2013. Pour anticiper la valorisation du digestat liquide et répondre aux premières questions des agriculteurs, le groupement s'est mobilisé en partenariat avec la Chambre d'Agriculture des Deux-Sèvres pour réaliser sur sept campagnes, des essais d'épandage sur blé tendre, prairie et maïs et dernièrement sur orge en agriculture biologique. Dans cet article, seuls les essais sur blé tendre sont repris afin de présenter une comparaison pluriannuelle lissant ainsi les effets climatiques d'une année sur l'autre. Les essais sur prairie ou maïs n'ont été réalisés que sur une ou deux campagnes.

1/ Protocole expérimental et objectifs à atteindre

Les essais sur blé tendre sont réalisés avec un dispositif expérimental en micro-parcelles avec trois à quatre répétitions (disposées en blocs, voir photos ci-dessous) selon les années. Dix à quinze modalités de pratiques d'épandages (appelées aussi traitements) sont comparées chaque année et ainsi répétées dans chaque bloc de l'essai. Une micro-parcelle récoltée fait 1.2 m de large (largeur de la moissonneuse) sur sept à 10 m de long selon les années. Les épandages sont faits manuellement à l'aide d'arrosoir pour le digestat liquide. Les modalités mises en place chaque année permettent ainsi de répondre à différentes questions :

- Efficacité de l'azote des digestats et courbe de réponses construite avec différentes doses
- Effet de la date d'apport du digestat
- Intérêt du fractionnement avec le digestat

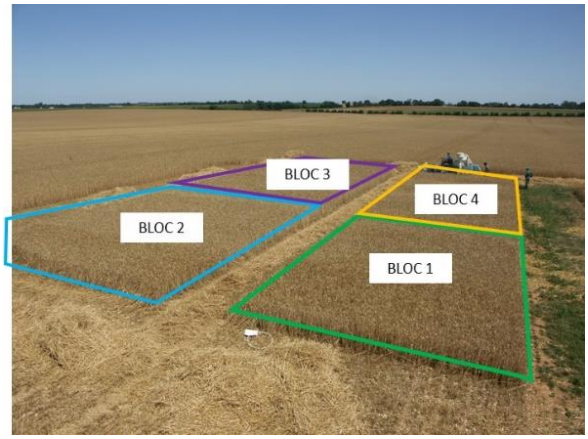


Figure 1 : du dispositif d'essai et de la mise en œuvre de la récolte

44 La SAS ABBT est une société qui regroupe l'ensemble des agriculteurs et partenaires (92 membres) du territoire apportant de la biomasse à l'unité de méthanisation et étant également actionnaire de celle-ci.

2/ Un tronc commun sur les 7 années d'essai sur blé

Afin d'estimer le coefficient d'efficacité azote d'une part et de comparer l'apport de digestat à référence ammonitrate d'autre part dans le contexte de sol argilo-calcaire, chaque année quatre modalités communes ont été reconduites :

- Témoin sans azote
- Apport de la dose d'azote X45 sous forme d'ammonitrate
- Apport de la même dose X sous forme de digestat liquide, apport calculé sur l'azote total du digestat liquide. Cette modalité, conjointement avec celle « témoin sans azote » permet de déterminer les coefficients apparents d'utilisation de l'azote (CAU)[46] de l'ammonitrate et du digestat
- Apport de la dose X sous forme de digestat liquide, apport calculé cette fois de façon à obtenir (en théorie) un rendement de la culture identique à la modalité « ammonitrate ». Pour cela, on fait l'hypothèse que le coefficient d'équivalence azote du digestat KeQ[47] par rapport à l'azote minéral, c'est-à-dire le rapport de leur CAU respectifs est de 75%.

En termes de pratiques d'épandage, les modalités ammonitrate ont été fractionnées en deux ou trois apports (tallage, épi 1 cm, 2 nœuds/épiaison de 120 à 160 Un/ha) et pour le digestat liquide, un seul apport a été réalisé de 25 à 35 m3/ha (selon les années et la concentration des digestats) entre le 20 février et le 10 mars soit 8 à 10 jours avant le stade épi 1 cm.

A partir de ces modalités communes sur les sept années, il est possible d'apporter des réponses aux deux questions suivantes :

- Quel est le coefficient d'équivalence azote (Keq) du digestat liquide, c'est-à-dire son efficacité comparée à l'engrais minéral ?
- En en faisant l'hypothèse d'une efficacité d'azote du digestat liquide de 60 % (valeur identique à lisier épandu sur blé au printemps) et d'un Keq de 75%, peut-on atteindre le même rendement que la pratique classique en engrais minéral ?

3/ Le choix du digestat liquide après presse à vis.

Le digestat liquide après séparation de phase a été privilégié du fait de ses caractéristiques agronomiques permettant à priori une efficacité meilleure que le digestat brut pour un épandage sur culture en place. Ce digestat est en effet « plus liquide » avec moins de fibre permettant ainsi une meilleure pénétration dans le sol tout en souillant moins la culture. Sa proportion d'azote ammoniacale est également plus importante permettant ainsi une assimilation rapide par la plante. Il faut donc veiller à réaliser les épandages en bonnes conditions pour limiter la volatilisation.

45 La dose X correspond à la dose d'azote efficace à apporter pour atteindre le rendement objectif de la parcelle. Cette dose est calculée selon la méthode des bilans.

46 Le Coefficient Apparent d'Utilisation de l'azote (CAU) est calculé de la manière suivante : (Azote absorbé par les plantes avec fertilisant - Azote absorbé par les plantes sans fertilisation)/azote apporté. C'est donc la fraction de l'azote apporté par un fertilisant qui est absorbée par les plantes.

47 Le coefficient d'équivalence azote (Keq) d'un fertilisant organique correspond à la quantité d'azote d'un engrais minéral (ammonitrate) qui a le même effet sur l'alimentation azotée des plantes que 1 kg d'azote apporté par le produit organique. Il représente donc l'efficacité de l'azote de l'engrais organique par rapport à un engrais minéral : Keq = CAU digestat/CAU engrais minéral. Pour la définition du coefficient apparent d'utilisation de l'azote (CAU).

Les quatre premières années, l'unité de méthanisation n'étant pas en place, la SAS ABBT a donc récupéré du digestat liquide sur d'autres installations de méthanisation. Le tableau ci-dessous reprend les principales caractéristiques des digestats liquides en fonction du substrat méthanisé dont il est issu.

Type de digestat	Année de l'essai	% de MS	Ntot	P2O5	K2O
Lisier + CIVE	2010	10	5,94	3,03	6,48
Effluent	2011	9,1	5,73	2,74	7,05
Effluent + IAA	2012	4,53	4,52	1,39	4,14
Effluent + IAA	2013	4,53	4,52	1,39	4,14
Effluent + IAA	2014	7,5	3,76	2,29	5,47
Effluent + IAA	2015	8,5	6,82	2,3	7,9
Effluent + IAA	2016	6,6	5,8	1,7	6,7

Effluent = lisier + fumier
CIVE = culture intermédiaire à vocation énergétique
IAA = Déchet et biomasse issus des industries agro-alimentaires

4/ Limites liées aux conditions expérimentales

Comme tous essais « azote » comparant de l'engrais minéral à un produit organique, un biais existe sur l'apport de digestat. Ce produit apporte en effet d'autres éléments que l'azote : phosphore, potasse, oligo-éléments, matière organique…

Concernant les épandages manuels, le déclenchement de nos interventions a été organisé avec les conditions météo optimales : sol humide, parfois sous la pluie. La pratiques d'épandage en conditions réelles seront un compromis entre conditions idéales d'application et contraintes logistiques.

5/ Résultat 1 : un coefficient d'équivalent azote > 70 % pour le digestat liquide

En 2010, peu de références existaient pour estimer le coefficient d'équivalence azote (Keq). Comme bon nombre de groupes de méthanisation, l'ABBT a utilisé les références étrangères sur ces valeurs, notamment celles du Danemark. Mais il était donc important d'acquérir des références pour conseiller la bonne dose d'autant plus que des épandages sont réalisées zone de captage.

Pour calculer ce Keq, les modalités témoin, ammonitrate dose X et digestat liquide dose X (apporté en prenant en compte l'azote total) ont été mises en place durant les sept ans. A partir de ces modalités, dans un premier temps les CAU [48]de l'ammonitrate et du digestat liquide sont calculés (à partir du témoin sans azote pour connaitre la fourniture du sol), puis le ratio de ces 2 CAU (CAU digestat/CAU ammonitrate) permet de calculer le Keq. Le graphique ci-dessous présent l'évolution de ce paramètre sur les sept années.

48 Le Coefficient Apparent d'Utilisation de l'azote (CAU) est calculé de la manière suivante : (Azote absorbé par les plantes avec fertilisant - Azote absorbé par les plantes sans fertilisation) / azote apporté. C'est donc la fraction de l'azote apporté par un fertilisant qui est absorbée par les plantes.

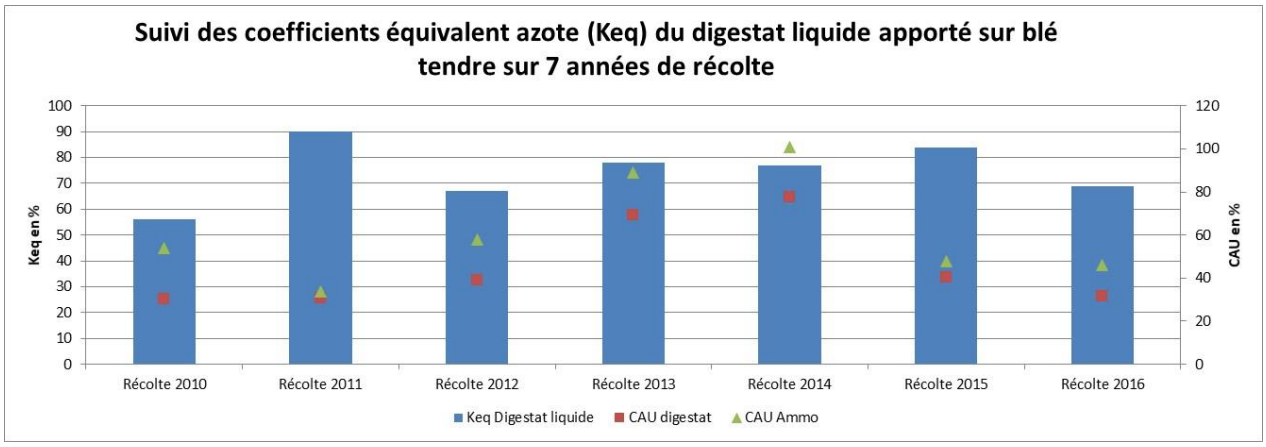


Figure 2 : comparaison des Keq

L'échelle de gauche reprend le Keq indiqué par les diagrammes. L'échelle de droite reprend le CAU de l'ammonitrate et du digestat liquide. Plus le triangle vert est éloigné du carré bordeaux, et plus le Keq du digestat liquide est faible, puisqu'il est le rapport des deux valeurs de CAU. Sur les sept années, la moyenne des CAU est de 45.5 % et 61.43 % respectivement pour le digestat et l'ammonitrate. Ces valeurs ne sont *a priori* pas impactées par la provenance des digestats. On observe ainsi que même sur une culture de blé tendre, le CAU de l'ammonitrate reste inférieur à 65 % (valeur moyenne de 61 %).

Nous en déduisons ainsi un Keq du digestat liquide moyen de 74 % sur ces sept années ce qui reste une valeur intéressante et proche des références prise dans les bilans de fertilisation (valeur de 70 %)[49]. Dans ces sept essais réalisés par la SAS ABBT, la valorisation de l'azote des digestats est maximisée puisqu'aucun complément d'azote minéral n'est apporté en complément, ce qui explique cette valeur de Keq élevée.

Le premier essai 2010, présente le Keq le plus faible. La valorisation de l'azote du digestat liquide n'a pas été bonne. A noter que ce digestat avait un pourcentage de matière sèche élevé avec beaucoup de matière en suspension limitant ainsi la pénétration du digestat dans le sol et donc une assimilation de l'azote par la plante. A l'inverse les années 2011 et 2015 avec une pluviométrie plus régulière et un digestat avec une fraction ammoniacale plus forte, présentent un Keq supérieur 80 %.

6/ Résultat 2 : Le digestat liquide est proche de la référence ammonitrate

Ce deuxième graphique permet de comparer chaque année la modalité témoin sans azote, la référence ammonitrate fractionnée et la modalité digestat liquide en un apport, pour une dose X apportée sur une base d'un Keq de 75% pour le digestat, c'est-à-dire qui en théorie devrait permettre d'obtenir le même rendement que la modalité ammonitrate.

49 Annexe n°545/2016/DRAFF- Référence régionale de mise en œuvre d l'équilibre de la fertilisation de la fertilisation azotée pour la région Pays de Loire

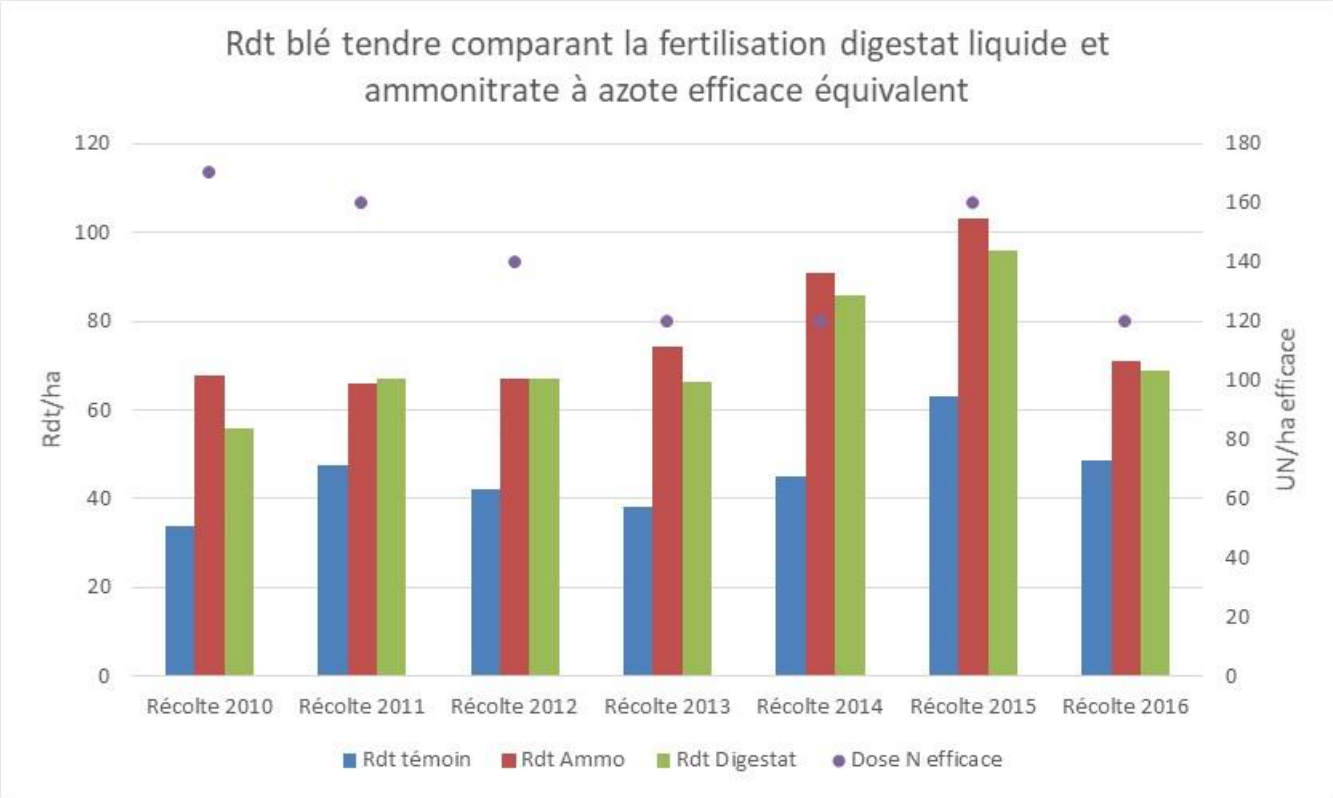


Figure 3 : Comparaison des rendements sur les 7 années d'essais

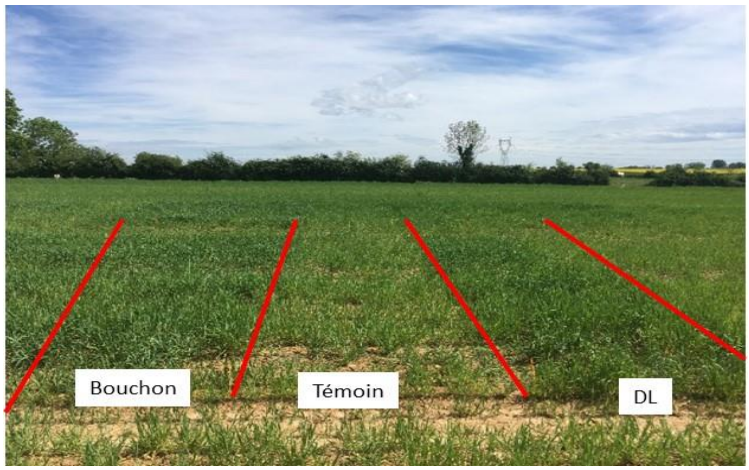
Sur les sept années d'essais, la modalité ammonitrate en 2 ou 3 apports est en moyenne supérieure à 5 qx à la modalité digestat liquide apporté en 1 apport pour une dose d'azote calculée en considérant un Keq de 75 %. Les écarts vont de + 12 qx en 2010 à – 1 qx en 2011. A noter que les rendements des témoins sont en moyen de 45 qx soit une fourniture du sol proche de 130 kg d'azote par hectare. Les parcelles choisies étaient en argilo-calcaire plus ou moins profond et avec des apports récurrents de matière organique (digestat et/ou fumier) dans les années précédentes, ce qui explique en partie le niveau élevé des rendements des témoins sans azote.

L'écart entre les deux modalités fertilisées est à nuancer par l'absence de fractionnement du digestat liquide. De même pour viser un blé avec un taux de protéine supérieur à un seuil minimum, un apport en fin de cycle est nécessaire, ce qui n'a pas été fait volontairement pour ces essais.

Finalement, on obtient une différence de rendement entre les deux modalités qui est faible, et probablement peu significative. Cela conforte l'hypothèse que l'on a faite sur l'efficacité de l'azote du digestat, estimée à 60 %

7/ Le digestat liquide testé sur céréale bio en 2020

Cette valorisation intéressante sur céréales conventionnelles, se développe également sur céréale bio où le digestat liquide est autorisé s'il provient de biomasses conformes aux cahiers des charges. De nouveaux essais réalisés par la Chambre d'agriculture des Deux-Sèvres et ACE méthanisation ont été récoltés en 2020 en triticale et orge bio. La parcelle d'orge a été mise en place avec un dispositif à trois répétitions alors que l'essai sur triticale était réalisé en bandes avec une seule pesée.



L'objectif de l'essai est de comparer la fertilisation du digestat liquide avec des produits organiques utilisables en agriculture biologique comme la fiente compostée ou la fiente sous forme de bouchon (fiente séchée puis mise sous forme de bouchons de 4.5 mm de diamètre).

Figure 4 : Modalité « bouchon » à gauche, témoin au milieu et digestat liquide à droite. Dose N tot = 130 UN/ha

Pour ces deux cultures, l'apport de digestat liquide et de fiente en bouchon (apport réalisé le 24 mars) permettent un gain significatif de rendement : + 10 à 15 qx pour le triticale et 15 à 18 qx pour l'orge. Comme pour les précédents essais, le calcul du CAU se fait en prenant en compte le témoin non fertilisé. Les CAU du bouchon de fiente sont de 27 % et 18 % respectivement pour l'essai orge et triticale et pour le digestat liquide de 30 % et 34 %.

Le digestat liquide de par sa texture liquide et sa proportion d'azote ammoniacal (35% dans le digestat utilisé pour l'essai) permet une efficacité rapide qui se distingue de celle du bouchon. Certes l'épandage nécessite un volume de 22 m3 contre 1.2 T pour les bouchons mais le gain de rendement et le plus faible cout du digestat en fait un fertilisant intéressant.

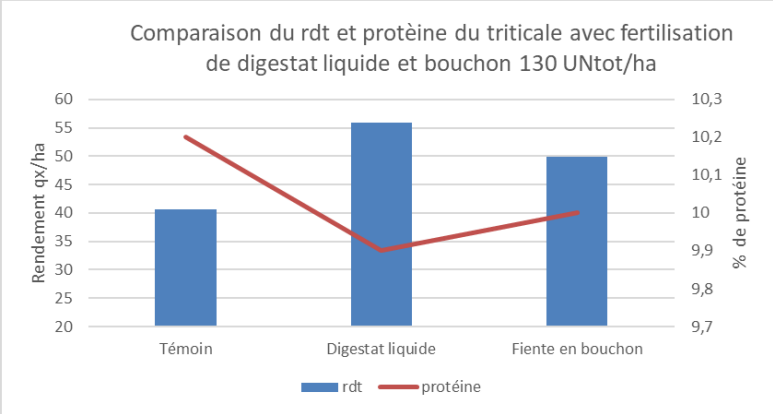


Figure 5: Résultats essai triticale

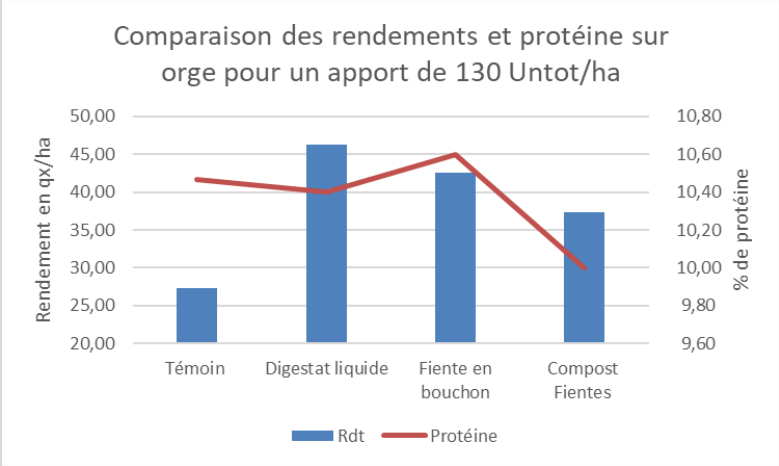


Figure 6 : Résultats essai orge d'hiver

Conclusion : utilisation du digestat liquide, les pratiques se calent

A partir de ces essais mis en place par le groupement d'agriculteurs durant plusieurs années, le conseil a pu être affiné dans le contexte pédo-climatique de la plaine de Thouars (79) notamment en termes de dose, de fractionnement mais également de complémentarité entre le digestat liquide et l'engrais minéral. Si le rendement reste plafonné par les faibles réserves utiles de ces sols, en contrepartie, ils sont très portants et permettent de réaliser des épandages en bonnes conditions sur sol humide mais ressuyés.

Les autres essais réalisés sur prairies ou maïs ont permis également de conforter les Keq utilisés en référence sur ces cultures. Sur l'unité de méthanisation, du digestat solide est également produit. Le liquide et le solide sont donc utilisés de manière complémentaire pour un effet fertilisant ou amendement. A raison d'environ 30 000 T de digestat liquide et 18 000 T de digestat solide produits annuellement, il est primordial de valoriser au maximum les éléments fertilisants contenus dans ces digestats.

Figure 7 : Récolte essai prairie à la motofaucheuse.

Figure 8 : Epandage pendillard sur blé– fin tallage

ARTICLE

Projets agro-énergétiques de territoire dans l'Ouest français : le rôle des agriculteurs-moteurs[1]

*Geneviève Pierre **

** UMR ESO 6590, Université d'Angers, France, genevieve.pierre@univ-angers.fr*

1 Cet article a eu une première parution dans la revue Cybergeo en 2015 : https://journals.openedition.org/cybergeo/27205

Résumé

Les projets agro-énergétiques en circuit local pensés pour l'autonomie énergétique et agricole, individuelle et collective, ou pour le territoire, se sont multipliés dans l'Ouest français depuis le milieu des années 2000. L'autonomie procède de la mobilisation des ressources locales et de l'inscription des exploitations dans des dynamiques territoriales. Co-construits entre des agriculteurs, leurs organisations professionnelles (chambres d'agriculture, CUMA, CIVAM), et des collectivités locales ou des Pays, ces projets s'appuient sur des dynamiques d'action publique de type Pôle d'excellence rurale ou programme Leader, dans l'Orne, le Calvados, la Mayenne et le Maine-et-Loire. Le passage de l'autonomie agricole individuelle à l'action collective territorialisée met en évidence le rôle de quelques agriculteurs-moteurs, initiateurs des outils techniques en CUMA. Autant par leur profil multi-actoriel (agriculteurs, élus locaux, responsables associatifs) que par leur ancrage socio-territorial, ils facilitent l'interconnection entre action de développement agricole et projet de territoire. La définition d'une agriculture multifonctionnelle assumant des missions de services au bénéfice des territoires met en tension les représentations habituelles de l'activité agricole.
Mots-clés : circuits courts non alimentaires, autonomie agricole, développement territorial, ancrage territorial, acteur-moteur, externalité

Abstract

The implementation of local projects for autonomy (energy and feed) and agricultural short circuits (pure vegetable oil and hedged-farmland wood energy) relies on farmer's and local official's initiatives. Autonomy can be considered in relation to the use of local resources and to the involvement of farmers in territorial projects. These projects are part of the European Union Leader program and of a French program for innovation in rural spaces: "centers for rural excellence" (pôles d'excellence rurale). These projects combine different networks of stakeholders answerable to local institutions or cooperatives such as CUMA (French cooperatives for collective use of agricultural equipment) and CIVAM (French organization for the promotion of initiatives in rural and agricultural local development) or others agricultural networks. However, the transition from individual agricultural autonomy to collective action, then to projects for territorial development, points out the role of some local stakeholders. Some farmers who initiated the use of technical tools in local cooperatives play an essential part in interconnecting the agricultural development action with the local territory project. This is due to their socio-territorial entrenchment and to their specific profile as farmers, elected officials or associate managers. The projects for agricultural and local autonomy lead to question the representations of agriculture in relation to its multifunctionality and its socio-territorial dimension.

Keywords: short circuits, agricultural autonomy, territorial development, stakeholder, farmers-initiators, territorial anchorage, environmental services, externality

Introduction

La recherche d'autonomie individuelle constitue un facteur de mobilisation au service d'une agriculture multifonctionnelle et de services dépassant la seule production alimentaire et dont les revenus sont ancrés localement. Les projets agro-énergétiques locaux et fermiers (huile végétale pure et tourteaux pour le bétail ; bois bocage énergie) développés dans l'Ouest français dans les années 2000 en sont une bonne illustration. Initiés par des agriculteurs expérimentant des outils au sein des Coopératives d'Utilisation du Matériel Agricole (CUMA), ils s'inscrivent dans les préoccupations de collectivités locales sur les économies d'énergie et la valorisation des ressources, mettant en tension les représentations traditionnelles de l'agriculture. D'agricole et individuelle au départ, la recherche d'autonomie rejoint les ambitions de développement durable des collectivités locales et des Pays. Aussi, le passage d'une volonté individuelle, puis collective, de développement agricole en autonomie, à la mise en place de projets pour le territoire, mérite-t-il d'être interrogé à deux titres.

En effet, dans un raisonnement de géographie sociale, l'entrée par les acteurs permet de pointer leurs motivations dans la co-construction des projets. Les acteurs-moteurs, des agriculteurs essentiellement, facilitent le glissement de la dynamique agricole interindividuelle, puis collective, au projet de territoire. Leurs représentations de la dimension territoriale et environnementale des projets agro énergétiques et de l'agriculture en général constituent une clé d'analyse. Par son ancrage local et par ses propres visions de la multifonctionnalité agricole, l'acteur-moteur est-il davantage enclin à impulser des projets à fort contenu socio-territorial et environnemental ? Comment une ambition personnelle se transforme-t-elle en réflexion collégiale, puis en projet territorialisé ?

Par ailleurs, dans les actions agro-énergétiques étudiées, l'ancrage du projet au territoire ne peut se faire par le produit car les potentiels exploitables sont, *a priori,* des matières premières banales (bois du bocage, colza), en dehors de toute typicité de terroir. Aussi, la spécification de la ressource repose-t-elle davantage sur la singularité des capitaux sociaux mobilisés, sur l'ancrage local des acteurs, pointant leur capacité à nourrir des processus d'apprentissage collectifs et à constituer des multipartenariats spécifiques au projet agro-énergétique de territoire. Comprendre comment ces coopérations s'organisent et le rôle qu'y jouent les agriculteurs initiateurs de la réflexion technique apparaît primordial. Or, la spécification des ressources agricoles et leur territorialisation ont surtout été étudiées pour des productions alimentaires de qualité référencées géographiquement (Rieutort, 2009).

Ainsi, la notion d'autonomie, diversement affirmée par les acteurs-moteurs selon leurs appartenances professionnelles et leurs représentations du métier et de l'agriculture, constitue une motivation fondatrice des projets agro-énergétiques (partie 1). Le contexte rural et agricole de l'Ouest français, le rôle des politiques publiques territorialisées et les référencements scientifiques explicitant les conditions de mise en place de circuits-courts énergétiques, sont présentés en partie 2. Des profils d'acteurs-moteurs se dégagent en fonction de leurs modalités d'insertion dans l'action collective ou de territoire (partie 3). Par leur capacité à l'interconnectivité, les acteurs-moteurs, essentiellement des agriculteurs, établissent des liens singuliers et territorialisés croisant réseaux professionnels agricoles, réseaux sociaux locaux et projets agro-énergétiques de territoire (partie 4).

L'autonomie agricole à la base d'actions agro-énergétiques locales

De l'autonomie agricole individuelle au projet territorial

La consommation sobre en intrants, tant pour l'alimentation du bétail que pour l'utilisation des énergies directes, est un critère *a minima* de définition de l'autonomie agricole (Rémy, 2010), partagé par différents réseaux professionnels, de l'agriculture raisonnée aux militants de l'agriculture durable autonome et économe (Réseau Agriculture Durable - RAD) ou Centres d'Initiatives pour Valoriser l'Agriculture et le Milieu rural (CIVAM). Ces derniers défendent une conception holiste de l'autonomie valorisant la mobilisation des ressources locales et leur usage en complémentarité. Les projets agro-énergétiques qui procèdent de la coproduction de potentiels locaux – production énergétique et aménités agricoles – élargissent les contours de la multifonctionnalité agricole au profit du développement territorial : "*Objectif global de penser et d'organiser le mieux vivre des gens vivant sur un territoire et qui relève d'un processus à la fois multisectoriel, territorialisé et géré par les acteurs locaux*" (Deffontaines et Prodhomme, 2001).

L'approche du lien entre agriculture, territoire et développement rural (Callois et Mocquay, 2008 ; Le Caro *et al.*, 2008) a été étudiée par la question de la territorialisation de l'agriculture (Rieutort, 2009, *op.cit.* ; Delfosse, 2010), de la relocalisation des circuits agricoles et alimentaires ou des ressources territoriales (Gumuchian et Pecqueur, 2007). Des réflexions menées par les socio-anthropologues portent également sur l'autonomie agricole (Deléage, 2004) et/ou au profit du territoire (Dobigny, 2012). Ancrer localement la valeur ajoutée à partir de la délimitation d'une zone d'Appellation d'Origine Contrôlée (AOC) ou réserver une partie de sa production agricole au projet de territoire au détriment de l'agro-industrie déterritorialisée, participent de la territorialisation agricole. La singularisation du territoire par les projets (Gumuchian *et al*, 2003) se traduit par la médiatisation[50] des actions d'intercommunalités (programmes de replantations bocagères) ou de Pays (Programmes Leader, Pôles d'Excellence Rurale – PER –) sur la valorisation des ressources locales, y compris dans un objectif de production énergétique.

Agriculture et projet pour le territoire : quelle place des acteurs-moteurs ?

Le terme "moteur" souligne le caractère volontariste de l'agriculteur qui introduit l'outil technique et/ou l'idée innovante à la base du processus d'activation de la ressource. Précurseur dans la découverte d'une nouvelle opportunité, il en popularise l'intérêt auprès de ses collègues de CUMA, au sein de son réseau agricole et/ou socio-territorial local. Son rôle peut se prolonger dans la structuration de filières locales selon la façon dont les collectivités locales ou les organisations agricoles s'emparent de l'idée. S'il n'expérimente pas lui-même les équipements, il en promeut l'utilité auprès des collectivités locales. Il peut même s'affirmer comme un leader agricole ou pour le territoire en assurant le portage du projet de circuit-court local ou en acceptant la présidence des structures juridiques pérennisant l'action de développement (CUMA, associations, coopératives locales…)

Par les projets collectifs d'autonomie agricole, l'agriculteur assume des missions diversifiées, au-delà de la seule production alimentaire humaine. À partir de ressources mobilisées et/ou mobilisables dans des stratégies d'évolution de l'activité, Mohamed Gafsi (2006) montre que, dans les pratiques de transformation à la ferme, de vente directe, l'ancrage local de l'agriculteur se réalise par accumulation progressive de capitaux, notamment sociaux, qui reflètent son implication dans des réseaux professionnels et extra-professionnels. Par ailleurs, les dimensions d'ancrage territorial portées par les agriculteurs-moteurs tiennent compte de la représentation que ceux-ci se font de leur métier (multifonctionnalité agricole revendiquée ou non) et de la façon

50 Le bois bocage énergie est publicisé par des fêtes, des salons ou par une communication ciblée. Le Pays de Haute-Mayenne organise chaque année un salon de l'Environnement et du Développement Durable. L'association Horizon bocage, créée en 2004, mène des actions de sensibilisation du public. Dans le Pays du Bocage Ornais, la commune de Chanu organise depuis 2006 un salon bois énergie.

dont ils le pratiquent : relocalisation de la valeur ajoutée, entretien des haies, transformation à la ferme, circuits courts, désintensification du système de production, contrats agro-environnementaux, production d'énergies renouvelables, appartenance aux réseaux militants de l'agriculture autonome et économe. Deux logiques de représentations professionnelles sont distinguées : l'une fondée sur l'identification de ressources territoriales localisées, intégrant des dynamiques sociales et naturelles au-delà de l'activité agricole, l'autre préférant l'insertion dans la filière agro-industrielle (Van Thilbeurgh *et al.*, 2008). L'ancrage est également fonction de l'appartenance à des réseaux sociaux hors cadre professionnel et peut s'accomplir par le profil multi-actoriel (Lévy et Lussault, 2003) d'agriculteurs à la fois élus locaux et responsables associatifs qui nouent des relations avec des parties-prenantes diversifiées.

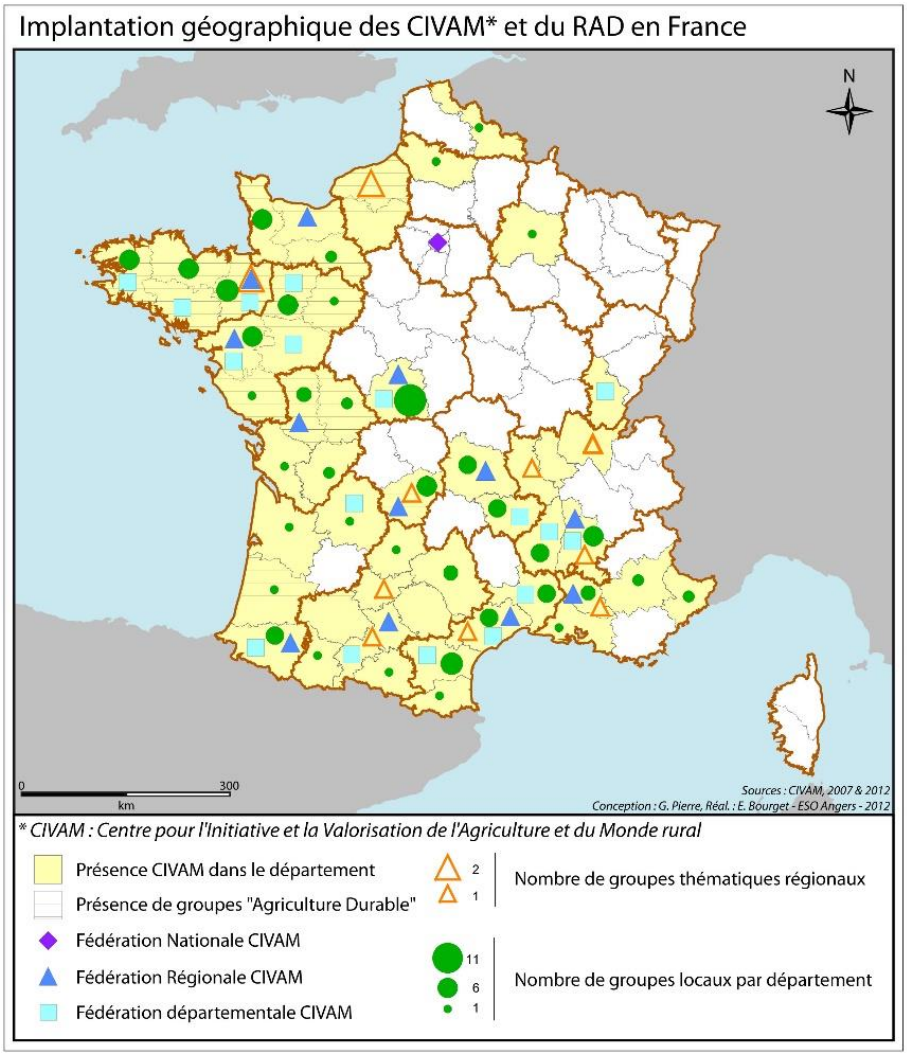
Les actions entrepreneuriales étudiées ont été guidées par la recherche d'autonomie. La notion d'entrepreneuriat intègre les diverses fonctions assumées par les exploitants : création de richesses, valorisation du site, transformation de la production, commercialisation (circuits courts), innovation, gestion, relations sociales (Cordelier et Le Guen, 2010). Séverine Saleilles (2006) et Cédric Verbeck (*et al.*, 2011) mettent ainsi en évidence un triptyque de co-création de l'activité articulant le projet de vie de l'agriculteur, le projet entrepreneurial et le projet de territoire. Comment l'agriculteur-moteur assure-t-il la transformation d'une ambition entrepreneuriale personnelle, puis collective, en projet territorialisé ? Dans quelle mesure son ancrage au territoire le rend-il plus enclin à impulser des projets sortant de la stricte sphère productive en alimentation humaine ?

Projets, contexte et méthodes : des agro-énergies en circuits courts et locaux

Les actions étudiées s'inscrivent dans le contexte de promotion des énergies renouvelables et de diminution des gaz à effet de serre des années 2000 et 2010, entre la loi POPE[51] de 2005, la Loi d'Orientation Agricole de 2006 qui promeut la production de biomasse et de carburants agricoles, le Grenelle de l'environnement (2010) et la loi française sur la transition écologique (2015). Parallèlement, des dispositifs d'action publique français (PER, plans climat territoire) ou européens (actions Leader sur la valorisation des ressources naturelles et culturelles) dessinent un cadre propice aux projets de territoire et aux dispositifs subventionnés.

La forte représentation de l'élevage dans l'Ouest français est propre à favoriser la recherche d'autonomie en alimentation animale. Le réseau bocager, emblématique des paysages agricoles de l'Ouest, abrite également la matière première des filières bois déchiqueté. Cet espace « Ouest », référence de la réussite puis des dérives du productivisme, a inventé des contre-modèles agricoles (Pierre *et al.*, 2008) dont témoignent la constitution du RAD (Deléage, 2004, *op.cit.*) et la forte représentation du réseau CIVAM (carte 1) ; il a également suscité l'émergence d'une agriculture de groupe très bien organisée. La densité du réseau CUMA et sa structuration en fédération interrégionale très active ont facilité la diffusion des informations techniques sur des outils encore expérimentaux au début des années 2000.

51 POPE : Loi de Programme fixant les Orientations de la Politique Energétique



Carte 1 : Civam et RAD en France

Des circuits courts et locaux hors alimentation humaine

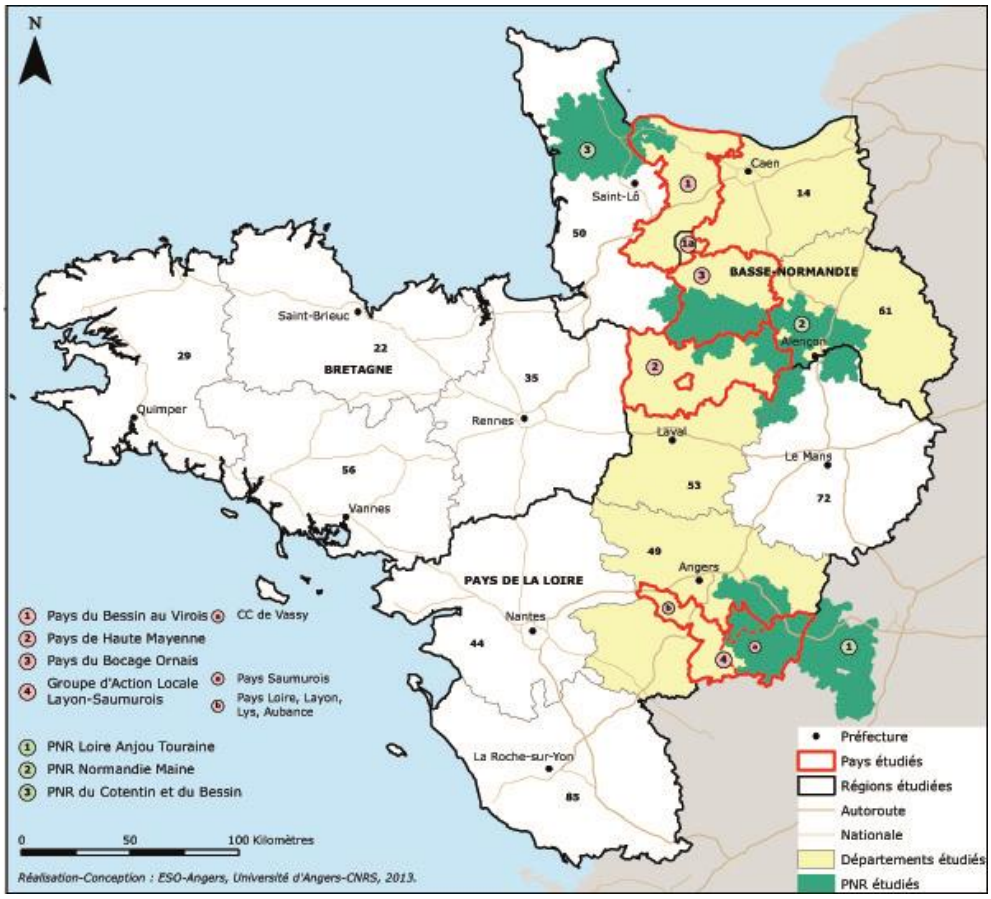
La recherche porte sur les filières locales et d'origine agricole en bois déchiqueté permettant une alimentation automatique des chaudières (tableau 1, situations 1 à 5 ; cartes 2 et 3) dans l'Orne (situation n° 5 ; carte 3a), en Mayenne (situation n° 3, carte 3b) et dans le Calvados (CC de Vassy, situation n° 4), régions bocagères d'élevage. Dans le Maine-et-Loire et en Layon-Saumurois (situations n° 1 et 2 ; carte 3c), la fabrication d'huile végétale pure et de tourteaux fermiers s'appuie sur la production oléagineuse réalisée en systèmes de polyculture-élevage.

Les projets, particulièrement publicisés au sein du réseau CUMA de l'Ouest, ont constitué des modèles innovants pour d'autres collectifs d'acteurs. Aux dimensions multiples d'actions valorisant la multifonctionnalité agricole et les services environnementaux (Valette *et al.*, 2012) sont associées la recherche d'autonomie locale (Dobigny, 2012) et l'implication de territoires de projets dans l'élaboration des circuits courts.

Tableau 1 : Présentation des projets étudiés

	Maine-et-Loire 1	Layon-Saumurois 2	Pays de Haute-Mayenne (SCIC[a]) 3	CC de Vassy (Calvados) 4	SCIC B2E (Orne) 5
Territoire	Périmètre départemental de la CUMA « Innov-Expé »	Pays de Loire-en-Layon GAL Leader Layon-Saumurois	Territoire du Pays et du GAL Leader « Haute-Mayenne » Elargissement au département en 2013	Canton de Vassy (et CC)	CC du Bocage Athisien et commune de Chanu ; Pays du Bocage élargissement au département
Dates	2006	2010	SCIC en 2008	2010	SCIC en 2006
Action	Presse HVP semi-mobile huile et tourteau « fermiers »	Station fixe de pressage HVP	Filière bois bocage énergie au bois déchiqueté	Réseau de chaleur bois et plate-forme de stockage au niveau intercommunal	Filière bois bocage énergie au bois déchiqueté
Programme d'actions publiques liés aux agro-énergies	Programme Leader + Layon-Saumurois (2000-2006)	PER Layon-Saumurois (2006-2009)	Leader 2000-2006 (Pays) Leader 2008-2013 (Pays) PER 2006-2008 (Pays) Contrats ATENéE (2004) et COT[b]	PER 2006-2008 du Pays du Bessin au Virois Leader 2009-2013 du GAL du pays du Bessin au Virois	PER 2006-2008 Plan climat-territoire du Pays et Leader 2007-2013 : aides aux replantations bocagères
Nature du produit	HVP et tourteau alimentaire fermier	Tourteau autoconsommé HVP revendue à l'extérieur	Bois déchiqueté de triple origine : bocage, déchetterie/scieries et forestier	Bois des haies locales	Bois bocager exclusivement
Initiateurs	Eleveurs en CUMA Layon-Saumurois Éleveurs	Agriculteurs en Layon-Saumurois	Élus locaux, collectivités locales et élus-agriculteurs ou agriculteurs-leaders	Pdt de la commission agricole de la CC, leader agricole local et départemental	Élus locaux, élus agriculteurs et agriculteurs-leaders ; technicien Paysage de Chambre d'agriculture
Réseaux agricoles	CUMA Chambre d'agriculture	Chambre d'agriculture et CUMA locale	CUMA ; CIVAM Mayenne Réseau d'agriculture durable Chambre d'agriculture	Agriculteurs locaux ; proximité géographique et de travail Agriculteurs conventionnels	CUMA (départementale) Agriculteurs du RAD ou en Bio Chambre en retrait sauf aide à l'entretien du paysage
Acteurs	Agriculteurs en CUMA locale et départementale Chambre d'agriculture (techniciens et agriculteurs) Pays de Loire-en-Layon	CUMA locales CC du Gennois antenne locale Chambre d'agriculture Pays de Loire-en-Layon	CUMA départementale ; FD CUMA CIVAM Chambre d'agriculture Agriculteurs locaux Collectivités locales / élus locaux, Pays	FD CUMA Elus et agriculteurs locaux CC de Vassy (techniciens dédiés)	Elus locaux ; collectivités locales Pays du Bocage Ornais FD CUMA et Chambre d'agriculture (technicien paysage) Associations environnementales
Structuration juridique	CUMA départementale pour le pressage du colza	CUMA locale H2L pour pressage huile et tourteau SAS pour revente de l'huile	SCIC (Coopérative et Sarl)	Vente directe à la CC et à deux communes	SCIC (Coopérative et SA)
Perspectives	Outil en fin d'activité. Désintérêt pour l'huile-carburant	Problématique de vente de l'huile	Élargissement au département Demande croissante (collectivités locales et particuliers)	Interrogations sur la structuration juridique	Développement de succursales dans et hors département de l'Orne Demande des collectivités locales et des particuliers
Statistiques	Capacité de production est de 350 000 l/an ; 73 adhérents en 2007 ; beaucoup moins d'utilisateurs depuis 2008	2010-2011 : CUMA H_2L : 70 adhérents 1500 tonnes d'huile et 2400 tonnes de tourteaux Tourteau repris à 75 % par les adhérents de la CUMA surtout localisés en Layon-Saumurois Huile vendue à 99 % à l'extérieur (700 à 900 €/ tonne).	28 agriculteurs Tonnage bois sec : 3626 tonnes (2011) (436 tonnes en 2008) Bois payé 55 euros/tonne verte à l'agriculteur ; vendue 92 € la tonne sèche livrée	Dès 1997-98 : replantations bocagères 2009 : besoins de 200 tonnes de bois sec/an ; entretien de 4 à 6 km de haies (10 agriculteurs suffisent). 62 €/t verte payée au producteur 94 €/t sèche revendue communes	21 adhérents en 2006, dont 10 agriculteurs En 2011, 150 adhérents dont 90 agriculteurs 2000 tonnes de plaquettes de bois sec bocager livrées (à 86 % aux collectivités) 48 euros/tonne bois vert ; vendue sèche livrée à 98 €/tonne[c]

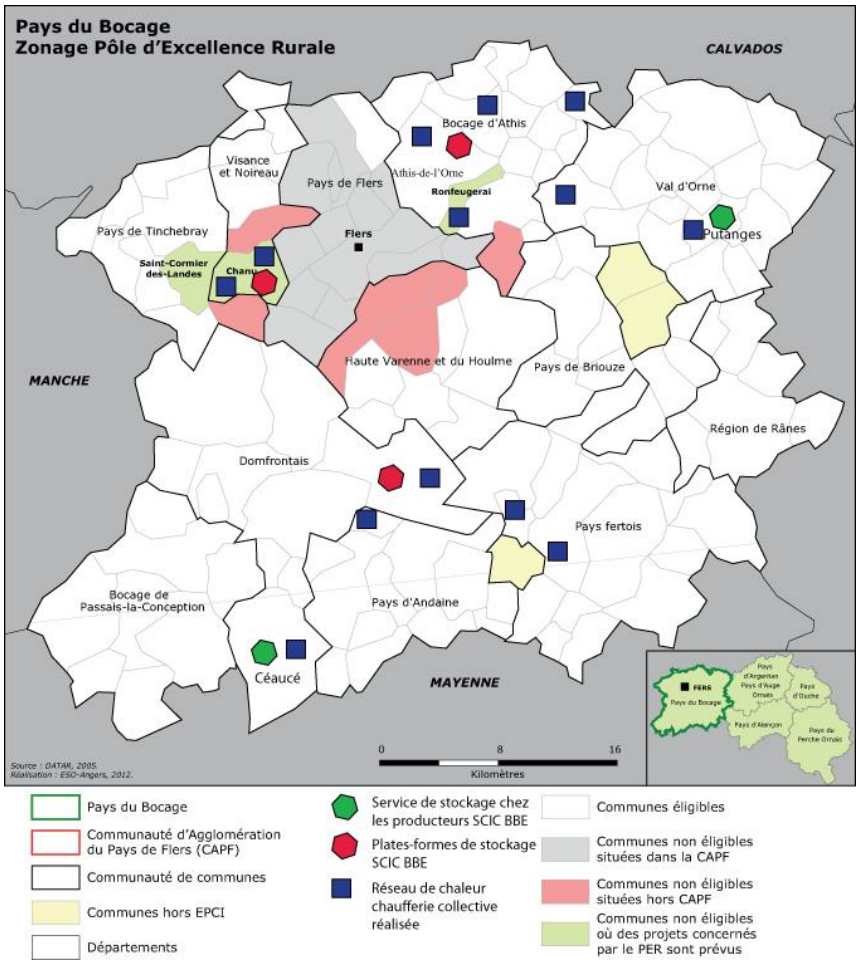
a. SCIC (Société Coopérative d'Intérêt Collectif) HMBE (Haute-Mayenne Bois Énergie)
b. ATENéE et COT (Contrat d'Objectif Territorial), contrats Ademe, préparatoires au plan climat territorial.
c. 100 €/tonne de bois sec = 2,8 cts €/kWh ; l'électricité est à 12 cts d'euros le kWh (2012 ; source Ministère de l'Agriculture).



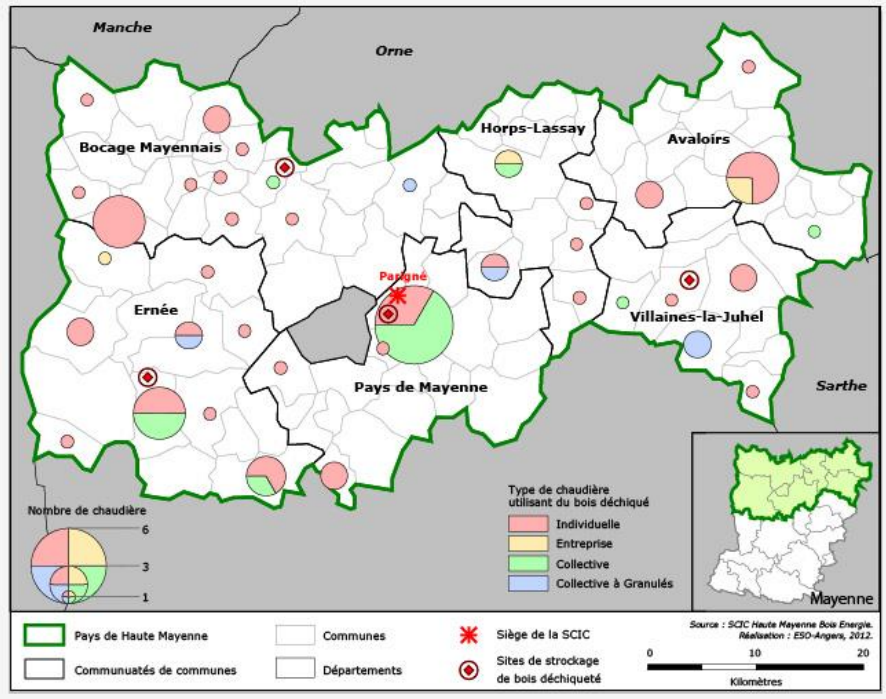
Carte 2 : Localisation des terrains étudiés dans l'Ouest français

Les circuits-courts agro-énergétiques ont encore peu suscité l'intérêt des géographes ou des sciences sociales (Tritz, 2013). Ainsi, nous devons emprunter aux définitions des circuits courts alimentaires qui insistent sur trois critères : un intermédiaire maximum, des échanges monétisés et la proximité (relationnelle, géographique) entre producteurs et consommateurs (Hérault-Fournier *et al.*, 2012). En quoi les projets étudiés s'en distinguent-ils ? La distance producteur/consommateur est plutôt faible : de 20 à 30 km maximum pour le bois déchiqueté, c'est-à-dire 1h30 de trajet en tracteur (cartes 3a-b). Cependant, c'est la part élevée d'autoconsommation agricole qui singularise le mieux les projets agro-énergétiques (75% des produits au minimum) ; dans ce cas, la recherche d'autonomie individuelle relève plus du circuit local que du circuit court. Pour autant, des interfaces (coopérative, société) s'imposent pour la distribution du produit et pour la mutualisation des équipements, souvent des prototypes en CUMA[52]. La dimension technique touche au cœur de l'activation de la ressource permettant la transformation de déchets en potentiels, par la réduction de la pénibilité du travail et par la commodité d'usage du produit obtenu. La pratique de l'énergie-bois en est renouvelée puisque les branches d'émondage des arbres, habituellement brûlées en bout de champ, trouvent une nouvelle utilité. Une codépendance technique locale s'établit entre des outils agricoles et non agricoles associant des parties prenantes diversifiées : agriculteurs, collectivités locales, particuliers, chauffagistes.

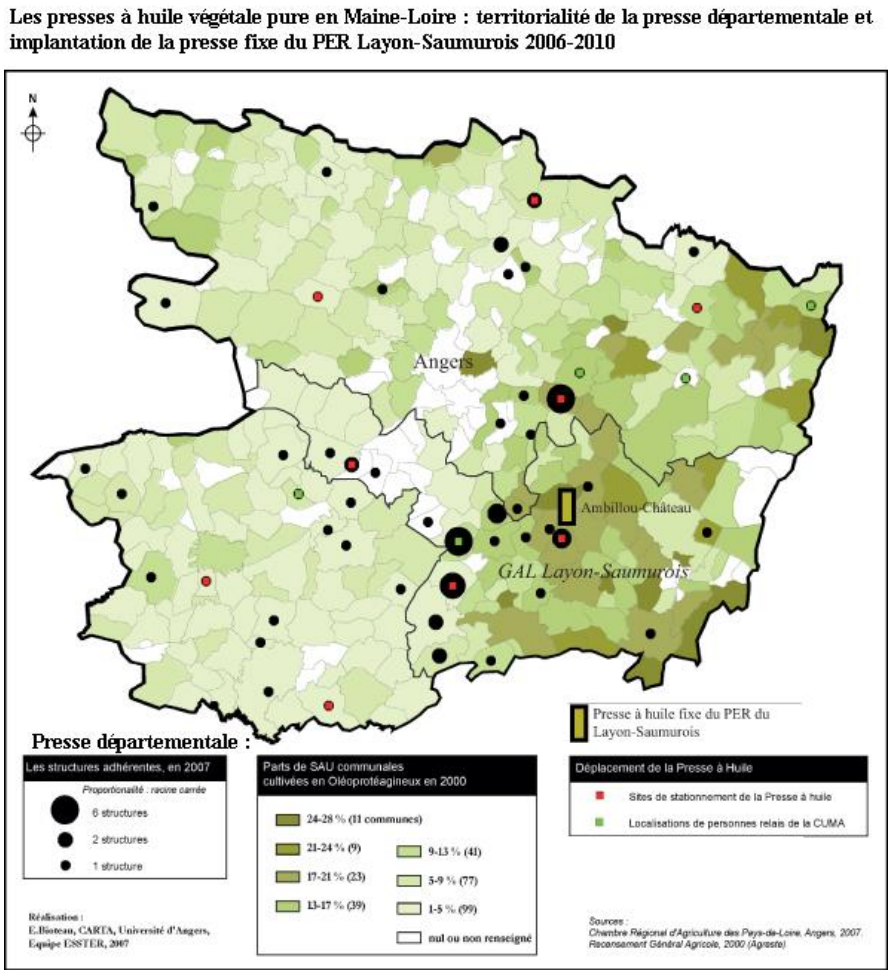
52 Jusqu'à 400 000 euros pour une presse HVP ; 150 000 euros pour une déchiqueteuse à grappin qui saisit le bois par un bras mécanique. Le bois déchiqueté est utilisé dans des chaudières à alimentation automatique, facilitant l'usage de l'énergie bois.



Carte 3-a : Circuit local bois déchiqueté : Pays du bocage Ornais



Carte 3-b : circuit local bois déchiqueté Pays de Haute-Mayenne



Carte 3-c : Presses à hvp en Maine-et-Loire

Des agriculteurs moteurs

Partir des acteurs et de leurs motivations s'inscrit dans un raisonnement de géographie sociale par "*inversion de l'ordre des facteurs*" (Rochefort, 1983). 57 personnes ont été interrogées au cours d'entretiens semi-directifs, d'abord informatifs et de contexte (techniciens, élus, agents), menés en 2008 et 2011-2012 au sein des CUMA, auprès des chargés de mission énergie et environnement des Conseil Généraux, des chambres d'agriculture, des CIVAM, des intercommunalités, des Pays (techniciens et élus) et de deux Sociétés Coopératives d'Intérêt Collectif (SCIC[53] ; Orne et Mayenne). 18 agriculteurs moteurs ont été ainsi identifiés. Ils ont fait l'objet d'entretiens à forte dimension biographique inspirés des méthodes du GERDAL (Groupe d'Expérimentation et de Recherche : Développement et Actions Localisées) sur les évolutions des pratiques en agriculture, qui ciblent les raisons des pratiques plutôt que l'énoncé des changements (Darré *et al.*, 2007, 77-84). Après une présentation contextuelle, personnelle, familiale et de l'activité agricole, l'entretien a également porté sur les responsabilités professionnelles, les engagements politiques, syndicaux, citoyens, l'inscription dans des groupes techniques agricoles de l'acteur-moteur. Les pratiques agricoles, la commercialisation des productions, le degré de mutualisation du matériel en CUMA sont également envisagés. La multidimensionnalité de projets relevant d'organisations partenariales spécifiques est inégalement appropriée par les acteurs-moteurs ; elle dépend en partie de leurs propres représentations de l'agriculture.

53 Statut défini par l'art. 36 de la loi du 17/07/2001 modifiant la loi du 10/09/1947 sur la coopération

Profils d'agriculteurs-moteurs intervenant au service du projet collectif

Selon les enquêtes menées, les agriculteurs-moteurs relèvent de deux modes d'identification qui peuvent se combiner ou se succéder. Les « *initiateurs directs* » des nouvelles opportunités techniques, auto-désignés, ne sont pas forcément des responsables agricoles mais leur capital social les rend aptes à solliciter les bons relais, professionnels ou locaux. Les « *responsables professionnels ou locaux* », très proches des premiers par les réseaux de travail quotidiens, sont initiateurs par délégation de responsabilité. Ils ont été parfois missionnés par les collectivités locales, les Pays, les organisations agricoles, pour concrétiser l'action de développement. Les deux catégories d'acteurs-moteurs se rejoignent dans les points suivants : la réflexion sur l'autonomie, la capacité à l'interconnectivité entre réseaux d'acteurs, leur rôle dans la mutualisation des outils techniques.

Du projet individuel à l'action territoriale

L'agriculteur-moteur peut être considéré comme un acteur territorialisé (Gumuchian *et al.*, 2003, *op.cit.)* si ses projets sont intentionnellement initiés et pensés "pour le territoire". Son rôle doit aussi être considéré à l'aune du réseau social/local/professionnel dont il relève, des responsabilités qu'il y exerce et de son échelon d'action (figure 1) :

- agriculteur initiateur des outils techniques ;
- élu local (commune, représentant d'intercommunalité, de Pays…) ;
- membre des CUMA à différents échelons et responsabilités exercées.

Avec une diversité de configurations :

- selon que l'acteur est territorialisé ou non ;
- selon le caractère plus ou moins diversifié de son profil ;
- selon le niveau de responsabilité dans l'action projetée.

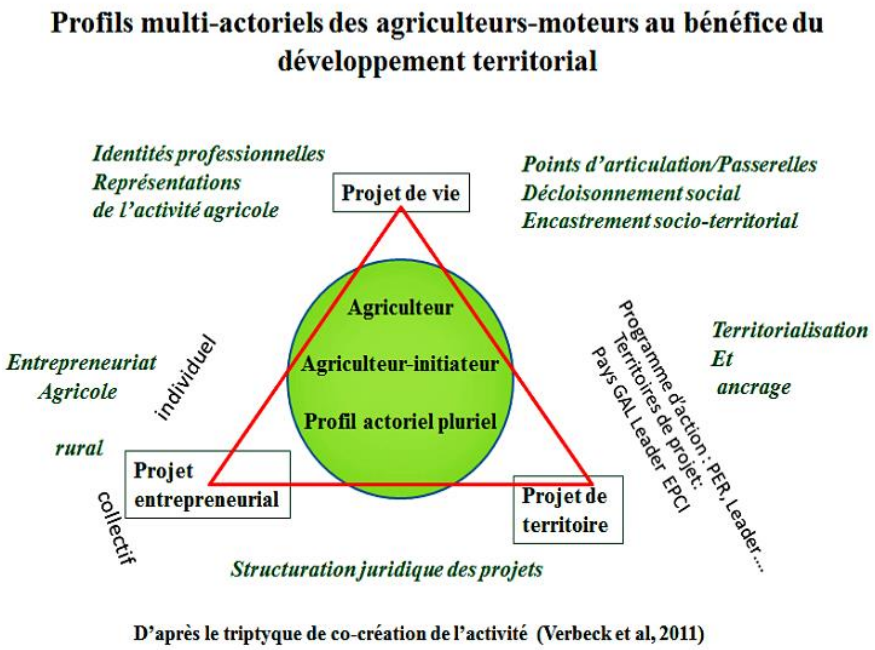


Figure 1 : du projet individuel à l'action territoriale

Les profils d'agriculteurs-moteurs présentés sont emblématiques des modalités d'insertion dans l'action collective et/ou de territoire. Soit par une entrée privilégiant les responsabilités au sein d'un réseau professionnel agricole porteur d'innovations techniques au profit de l'activation de la ressource. Soit parce que, par ses fonctions d'élu local, l'agriculteur-moteur a les moyens de proposer un débouché à la ressource agro énergétique qu'il promeut. Soit parce qu'il

représente la profession agricole au sein d'un territoire (Pays, GAL, PNR) et s'en sert pour développer un projet collectif prolongeant un intérêt personnel.

D'expérimentateur technique à responsable de CUMA : une démarche peu territorialisée (acteur A)

Cet agriculteur initie la mutualisation d'un outil collectif en agissant par délégation de responsabilités (tableau 1, situation 3). Dès 1992, il devient administrateur de la FD CUMA de la Mayenne, puis président (1995-2010) de la CUMA départementale d'innovation qui abrite les déchiqueteuses à bois et les presses HVP. Son action relève de la capacité à mobiliser le réseau coopératif par l'acquisition d'outils dont la crédibilité technique peut cristalliser la motivation des agriculteurs. En tant qu'exploitant agricole, il a été un précurseur des techniques liées au bois déchiqueté au début des années 1990. Les motivations qu'il affiche comme responsable de la CUMA départementale, centrées sur la praticité des outils et la valorisation économique de la haie, sont à distinguer clairement de ses engagements syndicaux (Confédération Paysanne) et de ses représentations personnelles d'une agriculture multifonctionnelle offrant des services environnementaux. Ainsi, il participe à un réseau local de vente directe et le fait qu'il soit chasseur renforce son intérêt pour les utilités faunistiques de la haie et, partant, pour leur entretien. Toutefois, il n'a pas eu de rôle décisionnel dans la mise en place de la filière bois déchiqueté de Haute-Mayenne et son action, inscrite dans le réseau CUMA, apparait, de fait, peu ancrée au territoire.

Un acteur territorialisé au triple profil d'agriculteur, de maire et de Président d'une intercommunalité (acteur B)

Cet agriculteur-moteur, co-porteur du projet de la Société Coopérative d'intérêt Collectif (SCIC) B2E de l'Orne, agit essentiellement comme Maire d'une commune et Président d'une intercommunalité (Bocage Athisien). Son ancrage est à relier à sa connaissance fine des problématiques et des enjeux locaux de développement (tableau 1, situation 5). Il est à même de convaincre les élus du territoire qu'un équipement en chaudières automatiques à bois, alimentées localement, est possible. Installé en 1970 en élevage laitier au sein d'un GAEC à trois associés, il a évolué vers des pratiques agricoles de moins en moins intensives. La prise de conscience des dimensions environnementales et territoriales de l'agriculture lui est venue avec le militantisme syndical (Confédération Paysanne). S'il a toujours entretenu ses haies pour "faire du bois-bûche", il n'a pas initié techniquement les outils de déchiquetage du bois et ne les utilise pas. Il agit par conviction d'élu, attestée par son engagement dans le remembrement et le document d'urbanisme communal. Dès la fin des années 1990, il a porté le souci de l'entretien des sentiers de randonnée, de la promotion des replantations bocagères, au niveau de l'intercommunalité dont il est le Président. Par son profil multiple, cet acteur soucieux de défendre une vision multifonctionnelle de l'agriculture interconnecte différents réseaux professionnels et locaux, de la commune au Pays, pour promouvoir une action territorialisée d'autonomie énergétique à l'échelon intercommunal.

Un leader agricole local, acteur territorialisé contrarié (acteur C)

Fortement impliqué au sein de son Pays, cet éleveur bovin relie des réseaux d'acteurs agricoles (CUMA, antenne locale de la Chambre d'agriculture) et territoriaux. En tant que Président de la commission agricole du Pays, il affiche des ambitions d'autonomie agricole, puis énergétique (presses HVP ; tableau 1, situations n° 1 et 2) pour le Pays et il obtient un soutien par le biais du programme Leader[54]. Il associe ses responsabilités locales – Président d'une commission locale de l'eau – à la certification en agriculture raisonnée de son exploitation. Ses motivations procèdent d'une exigence d'autonomie agricole redéfinissant les formes de coopérations dans l'es-

54 GAL Leader Plus Layon-Saumurois

pace rural grâce à l'entrepreneuriat en groupe et à l'apprentissage en CUMA. Il est personnellement intéressé par l'outil qu'il contribue à construire. Bien qu'il reconnaisse de multiples fonctions à l'activité agricole, il ne va pas jusqu'à promouvoir une agriculture de services. L'outil qu'il initie reste d'usage agricole même si ses motivations premières ont relevé d'une recherche d'autonomie énergétique pour le territoire, en lien avec les collectivités locales.

Les agriculteurs-moteurs : entre réseaux professionnels agricoles, réseaux locaux et projets de territoire

La capacité à l'interconnectivité des agriculteurs-moteurs dans l'activation des ressources

Les filières locales n'ont pu se mettre en place sans le soutien des réseaux professionnels agricoles et sans l'investissement d'élus locaux à partir de programmes d'actions publique au sein du territoire. Certes, les agriculteurs-moteurs ont initié les outils techniques indispensables à l'activation de la ressource. Cependant, leur qualité essentielle réside dans l'interconnectivité qu'ils peuvent établir entre l'individuel et le collectif, entre l'agricole et le territoire. Les diverses modalités d'intervention des agriculteurs-moteurs articulent :

- l'implication dans certains réseaux professionnels agricoles et l'inscription dans des réseaux socio-territoriaux, à moduler selon les responsabilités exercées ;
- avec la représentation affichée, ou non, d'une vision multifonctionnelle de l'agriculture assumant des missions territoriales au-delà de la seule production alimentaire ;
- et le rôle d'usager et/ou d'expérimentateur des outils prototypes.

L'agriculteur-moteur peut être investi en tant qu'acteur territorialisé, en tant qu'entrepreneur agricole, en tant que citoyen préoccupé des impacts socio-territoriaux de ses activités. L'acteur A, sensible aux dimensions environnementales et de services de l'agriculture, intervient surtout au titre de sa délégation de responsabilités CUMA, au niveau départemental, sur un objet technique qu'il a "initié". La territorialisation de l'action agro-énergétique n'est pas sa préoccupation première. Dans le cas de l'acteur B, l'élu local prend le pas sur l'agriculteur. La représentation d'une dimension socio-territoriale et de service de l'agriculture, confortée par l'appartenance syndicale, se concrétise dans un projet intentionnellement pensé pour le territoire, rejoignant une sensibilisation plus ancienne sur la préservation du paysage. L'acteur C, leader agricole local, relais vers les institutions du Pays, affiche une intention de développement territorial motivée par une définition entrepreneuriale et collective de l'autonomie. Il a expérimenté les outils prototypes. Il promeut une agriculture conventionnelle raisonnée, soucieuse de l'image qu'elle renvoie. Son souhait initial de territorialiser l'action de développement se heurte aux limites d'un projet qui n'obtient pas l'autorisation de vendre du carburant aux collectivités locales, du fait des contraintes juridiques et fiscales de l'HVP en France[55].

Les modalités d'intervention de ces acteurs s'inscrivent dans une combinatoire d'activation de la ressource (schéma 2). La présence d'un leader influent – un agriculteur-moteur, ici – ne suffit pas à développer une action si celle-ci n'est pas relayée par une dynamique de territoire (Callois et Mocquay, 2008, *op.cit.*).

55 La Loi d'Orientation Agricole (2006) autorise la vente d'HVP entre agriculteurs et collectivités locales, après protocole entre le Préfet et les douanes et la création d'un entrepôt fiscal. Des collectivités locales (Villeneuve-sur-Lot) en bénéficient. Les aspects fiscaux rendent l'HVP-carburant peu intéressant pour les agriculteurs, comparativement au fuel détaxé.

Processus d'activation de la ressource : 4 éléments	**Rôle des agriculteurs-moteurs**	**De l'action individuelle au projet collectif**
Découverte et invention d'un potentiel à activer par le projet	Initiative Prise en charge personnelle	Action interindividuelle en lien avec le technicien agricole ou l'élu
Appropriation locale de nouvelles techniques et leur diffusion	Ils inscrivent la question technique à l'ordre du jour de la CUMA locale, puis départementale	Action collective agricole en CUMA Locale puis Départementale
Diversité des profils d'acteurs dans des structurations partenariales localisées	Responsables de CUMA (locale / départementale ; CUMA déchiquetage ; CUMA HVP), Responsable agricole local, porteur de projet agro-énergétique	Du collectif agricole Au projet de territoire (intercommunalité ou Pays)
Implication des territoires de projets et des projets de territoire dans l'élaboration des circuits locaux	Importance des profils actoriels interconnectant les responsabilités agricoles et celles d'élu local Présidents des coopératives locales	Projet collectif agricole et local ↓ HVP Projet territorialisé ↓ CC Pays Coopératives locales bois énergie

Tableau 2 : le rôle des agriculteurs-moteurs dans l'activation de la ressource

De fait, l'ancrage au territoire des acteurs-moteurs se joue de différentes manières : par les responsabilités électives (ou représentatives) locales, de la commune au Pays ; par la représentation personnelle des missions environnementales, territoriales de l'agriculture, parfois renforcée par l'insertion dans les réseaux de l'agriculture autonome, économe et durable. Dans quelle mesure l'appartenance à un réseau professionnel plus ou moins "militant" de l'autonomie agricole (RAD, CIVAM, CUMA), a-t-elle motivé l'agriculteur-moteur à impulser une action collective agro-énergétique ?

<u>Les acteurs-moteurs relèvent de différents réseaux professionnels agricoles</u>

Ces projets n'ont pu émerger sans le soutien de réseaux professionnels agricoles qui promeuvent des formes d'autonomie et d'économie dans la conduite des exploitations. L'implication des FD CUMA, relais-bois-énergie de l'Ademe en Mayenne, dans l'Orne et dans le Calvados, a permis aux agriculteurs-moteurs d'expérimenter en groupe et d'assurer la mutualisation d'outils auprès d'adhérents relevant de référencements sociotechniques diversifiés. Les Chambres d'agriculture des 4 départements sont apparues plus réactives sur les presses HVP, dont l'utilisation peut s'inscrire dans la représentation dominante d'une agriculture de production. Six des sept agriculteurs interrogés sur les actions HVP sont impliqués dans les groupes techniques des Chambres d'agriculture, quelle que soit par ailleurs l'évolution de leurs pratiques agricoles, de l'élevage bovin à l'herbe aux techniques culturales simplifiées ou à l'agriculture raisonnée. Ils privilégient l'affiliation au syndicat dominant. Sur le bois énergie, les manifestations d'intérêt

des Chambres, plus récentes, sont fonction de l'engouement suscité chez leurs membres par les nouvelles techniques. Les Chambres restent cependant réticentes à un affichage environnemental et de services de l'activité agricole.

Dans les projets de bois-énergie, 8 agriculteurs-moteurs sur 11 associent des responsabilités en CUMA à l'affiliation aux réseaux CIVAM et RAD, ou à la Confédération Paysanne. La FD CIVAM de la Mayenne, relais info énergie de l'Ademe[56], a eu une influence particulière dans le Pays de Haute Mayenne du fait de la mission énergie qu'elle y a assumée dès 2003 et par laquelle elle a pu toucher plus largement les agriculteurs locaux. De fait, un agriculteur-moteur qui avait sollicité les CIVAM sur un projet énergétique collectif s'est ensuite rapproché du réseau en confortant l'évolution de ses pratiques agricoles vers l'autonomie.

Si des fractures apparaissent entre les agriculteurs-moteurs militants des systèmes autonomes et économes et ceux qui cherchent seulement quelques marges d'autonomisation, les référencements peuvent procéder d'hybridations techniques, observées par ailleurs (Ansaloni et Fouilleux, 2006). Ainsi, un agriculteur moteur, représentant le syndicat dominant à la Chambre d'agriculture, promoteur du bois déchiqueté pour l'énergie, a désintensifié son système d'élevage, tout en maintenant deux hectares de maïs-fourrage, pour "ne pas passer pour un écolo". Toutefois, dans la mise en place des actions agro-énergétiques étudiées, la mobilisation de réseaux agricoles différents s'exerce sur des segments secondaires de l'activité agricole ou relevant, de fait, d'innovations assez peu transformatrices pour le système de production.

L'activation de la ressource interroge également la capacité des acteurs-moteurs à sensibiliser localement sur la valorisation d'un potentiel latent, au-delà du cercle des initiés ou des militants. Les ressources argumentaires utilisées constituent un enjeu de mobilisation locale et collective.

Pérenniser les actions en mobilisant au-delà des acteurs-moteurs

Les actions agro-énergétiques sont publicisées par les agriculteurs-moteurs, par les élus locaux porteurs des projets, par les institutions agricoles (FD CUMA, CIVAM, Chambres) à partir d'arguments considérés comme étant facilement appropriables par les agriculteurs, les habitants, les élus. En direction des agriculteurs, le caractère multidimensionnel des actions étudiées – entrepreneuriat agricole, expérimentation en machinisme, mutualisation de moyens, diversification, aménités agricoles, valorisation des ressources locales – devrait faciliter la tâche. Les agriculteurs-moteurs, responsables de CUMA ou des coopératives locales abritant les actions agro-énergétiques, communiquent sur la praticité des outils et l'aspect économique, aspects qu'ils supposent adaptés aux représentations agricoles dominantes. En direction du territoire, les élus investis (Pays de Haute-Mayenne, Intercommunalité d'Athis de l'Orne) relient ces projets à d'autres réalisations énergétiques locales et en publicisent les co-services attendus (entretien du paysage, par exemple).

Or, si les dimensions sociales, environnementales et territoriales sont indéniables, tant pour le bois-énergie que pour les presses HVP – qualité sanitaire et nutritionnelle sans OGM, traçabilité, stockage du carbone, lutte contre les gaz à effet de serre, entretien du paysage –, elles ne conduisent pas toujours à une territorialisation de l'action de développement. Les dimensions territoriales et environnementales des projets – qui tiennent à la nature des actions pensées pour l'autonomie agricole – et leur inscription dans des projets de territoire – qui dépend des politiques locales – sont à distinguer. Dans la filière locale bois-bocage énergie (tableau 1, situations 3 à 5), l'équipement des communes en réseaux de chaleur assure le passage de l'autoconsommation agricole à la construction d'un projet de territoire ; le caractère stratégique du profil actoriel diversifié d'agriculteur-initiateur des agro-énergies, membre des CUMA et élu local, s'en

56 Ademe : Agence de l'environnement et de la maitrise de l'énergie.

trouve valorisé. La structuration multipartenariale en coopérative permet à une diversité d'acteurs d'affirmer localement le caractère intégré d'un projet associant la promotion des énergies renouvelables à l'entretien de la haie. En revanche, les projets HVP relèvent d'un fonctionnement agricolo-centré entre les agriculteurs, les CUMA et la Chambre d'agriculture. Le PER du Layon-Saumurois (tableau 1, situation n° 2), initialement conçu pour l'huile-carburant en direction des collectivités locales, a été réorienté sous l'autorité du Préfet vers la seule production d'aliments du bétail. Les acteurs au profil-actoriel d'agriculteurs-moteurs / élus ou représentants locaux (acteur C) ont été empêchés, de fait, de concrétiser leur intentionnalité initiale de territorialiser un projet en lien avec les besoins des collectivités locales.

Conclusion

La recherche d'autonomie individuelle, puis collective, en agriculture est une motivation par laquelle deux modalités d'ancrage des acteurs-moteurs au territoire se rejoignent : la sensibilisation personnelle aux dimensions multifonctionnelles, environnementales, paysagères et de services de l'agriculture, jusqu'à l'inscription dans des réseaux professionnels défendant cette vision de l'activité ; et/ou les fonctions d'élu local, de représentant du Pays, prédisposant l'acteur-moteur à la dynamique entrepreneuriale collective. Dans le processus de territorialisation des actions agro-énergétiques, la capacité des agriculteurs-moteurs à interconnecter les réseaux socio-territoriaux et de développement agricole aux collectivités locales et aux Pays est d'autant plus opérante que l'initiative multipartenariale s'impose. De plus, elle permet à ces acteurs d'afficher, auprès des élus locaux, une image de l'agriculture davantage ouverte sur ses missions de service en direction du territoire ; la portée du message est aussi liée à la capacité d'action dont dispose l'acteur grâce à ses responsabilités. Le fait que certains acteurs présentent un profil multiple d'agriculteur en CUMA et d'élu local et/ou de représentant au sein du Pays, facilite le glissement de l'action agricole au projet de territoire. Cette qualité, particulièrement recherchée par les élus locaux, techniciens agricoles, agents de développement, promoteurs des circuits-courts agro-énergétiques permet de mobiliser des collectifs d'acteurs singuliers, critère fondamental de spécification de la ressource.

Pour l'agriculteur-moteur, les actions collectives agricoles ou de développement territorial relèvent de temporalités diverses, entre le cycle de vie de l'exploitation, son inscription dans le vécu local et l'historique de l'action publique locale impliquant l'agriculture, la valorisation des ressources et le développement durable. Parallèlement, le profil multi-actoriel de l'agriculteur-moteur est, lui aussi, évolutif. La façon dont les activités de l'exploitation agricole interfèrent avec la vie familiale et le projet professionnel peut remettre en cause l'implication de l'agriculteur-moteur dans des projets de territoire. Trois formes d'engagements des agriculteurs ont été définies (Purseigle, 2004) : un engagement-instrument de défense professionnelle ; un engagement-apprentissage au sein de réseaux techniques agricoles ; un engagement-projet qui permet d'intégrer une action située à l'interface famille-métier-société-territoire. Les projets étudiés relèvent, de façon inégale, de ces deux dernières formes d'engagements, les co-constructions liées au bois énergie ayant, plus que les projets HVP, pu s'inscrire dans des processus de territorialisation.

Bibliographie

Ansaloni M. et Fouilleux E., "Changement de pratiques agricoles. Acteurs et modalités d'hybridation technique des exploitations laitières", *Économie Rurale*, n° 292, Mars-Avril 2006, p. 3-17.
Callois J-M. et Mocquay P., 2008, "La territorialisation des politiques de développement rural, acquis des expériences antérieures et perspectives", *Ingénieries, Eau, Agriculture, territoire*, n° spécial, p. 155-163.

Cordelier S. et Le Guen R., "Élections professionnelles et conception de l'entrepreneuriat (1983-2007)", in Hervieu B. *et al*. (dir.), *Les mondes agricoles en politique*, Presses de Sciences Po, Paris, p 145-191

Darré J-P., Mathieu A. et Lasseur J. (coord.), 2007, *Le sens des pratiques. Conceptions d'agriculteurs et modèles d'agronomes*, INRA Éditions, 320 p.

Deffontaines J-P. et Prodhomme J-P., 2001, *Territoires et acteurs du développement local*, DATAR, Éditions de l'Aube, 179 p.

Deléage E., 2004, *Paysans, de la parcelle à la planète, Socio-anthropologie du RAD*, Paris, Syllepse, 245 p.

Delfosse C, 2010, « La France et ses Terroirs. Un siècle de débats sur les produits et leurs liens à l'espace », in Delfosse C. *et al*, *Pour, Alimentation et territoires*, p. 63-74. DOI : 10.3917/pour.215.0061

Dobigny L., 2012, "Produire et échanger localement son énergie. Dynamiques et solidarités dans les communes rurales", in Papy F., Mathieu N. et Férault C. (dir.), *Nouveaux rapports à la nature dans les campagnes*, Quae Éditions, Paris, p. 139-152.

Gafsi M., 2006, "Exploitation agricole et agriculture durable". *Cahiers Agricultures,* 15 (6), p. 491-497. DOI : 10.1684/agr.2006.0035

Gumuchian H., Grasset É, Lajarge R. et Roux É., 2003, *Les acteurs, ces oubliés du territoire,* Anthropos, 186 p.

Gumuchian H. et Pecqueur B., (dir.), 2007, *La ressource territoriale*, Économica-Anthropos, 252 p.

Hérault-Fournier C., Merle A. et Prigent-Simonin Anne-Hélène, 2012, "Comment les consommateurs perçoivent-ils la proximité à l'égard d'un circuit court alimentaire ? ", *Management et Avenir*, 2012/3, p. 16-33. DOI : 10.3917/mav.053.0016

Le Caro Y., Madeline P. et Pierre G. (dir.), 2008, *Agriculteurs et territoires, entre productivisme et exigences territoriales*, PUR, 268 p.

Lévy J. et Lussault M. (dir.), 2003, "Acteur", *Dictionnaire de géographie et de l'espace des sociétés*, Belin, 2003, 1033 p. : 39-42.

Pierre G., Madeline P., Margétic C., Croix N., Bermond M. et Peltier C., 2008, Durabilité, agricultures et territoires : quels questionnements pour les ruralistes d'universités de l'Ouest, *Géocarrefour*, vol 83, n° 3, p 245-250. DOI : 10.4000/geocarrefour.6957

Purseigle F., 2004, *Les Sillons de l'engagement : jeunes agriculteurs et action collective*, Paris, L'Harmattan-Institut national de la jeunesse et de l'éducation populaire, Débats jeunesses, 262p.

Rémy J., 2010, "Un métier en transformation : introduction", in Bertrand Hervieu *et al*, (dir.), *Les Mondes agricoles en politique*, Presses de Sciences Po, Paris, p. 41-50.

Rieutort L., 2009, "Dynamiques rurales françaises et reterritorialisation de l'agriculture", *L'Information Géographique*, n° 1, p. 30-48.

Rochefort R., 1983, "*Réflexions liminaires sur la géographie sociale*", Actes du colloque de Lyon sur la géographie sociale du 14-16 octobre 1982, Éditions Daniel Noin, p. 11-15.

Saleilles S., 2006, "Le faible encastrement territorial : handicap ou opportunité pour la création d'entreprise en milieu rural ? ", Cinquièmes journées de la proximité, Bordeaux, 16 p.

Tritz Y., 2012, Le système énergétique agri-territorial (SEAT) : les bioénergies comme outil de développement local, *Géographie, Économie, Société*, 2012/1 – Volume 14, p. 31-52.

Valette É, Aznar O., Hrabanski M., Maury Ca., Caron A. et Decamps M., 2012, "Émergence de la notion de service environnemental dans les politiques agricoles en France : l'ébauche d'un changement de paradigme ? ", *VertigO*, vol 12, n° 3, décembre 2012, 19 p. DOI : 10.4000/vertigo.12925

Van Thilbeurgh V., Le Clozier Y. et Disenhaus C., 2008, "La durabilité des exploitations laitières : rôle du territoire dans leur fonctionnement en Ille-et-Vilaine", *Géocarrefour*, Vol 83, n° 3, p. 235-243. DOI : 10.4000/geocarrefour.6976

Verbeck C., Lenain M-A. et Blasquet-Revol H., 2011, "Vers un nouveau modèle systémique dans l'analyse de la création d'activités et d'emplois en espace rural", *RERU*, n° 2, p. 369-388. DOI : 10.3917/reru.112.0369

TÉMOIGNAGE

Déploiement de la méthanisation agricole en France : quel cadre de durabilité ?

*Isabelle Marx**

**Chargée de projet Agriculture-Alimentation, WWF France*

Face aux enjeux de développement de la filière, une nécessaire réflexion sur sa compatibilité avec la transition agroécologique (et de sa durabilité)

La méthanisation a suivi différents schémas de développement depuis les premières installations des années 1970-1980 en France. Ce n'est qu'en 2010 que le Plan d'action national en faveur des énergies renouvelables et la Loi de modernisation de l'agriculture donnent de nouvelles opportunités de développement à la filière en valorisant l'injection du biométhane dans les réseaux de gaz. D'un modèle de valorisation de déchets adossé à l'élevage, les nouvelles unités qui se construisent actuellement semblent plus répondre à une logique énergétique. Une mutation qui pourrait occulter les intérêts agronomiques de la méthanisation, que SOLAGRO a notamment soulignés au travers de son projet MéthaLAE[57].

Représentant aujourd'hui une faible part du mix énergétique renouvelable, les trajectoires actuelles placent le biométhane comme une filière importante pour atteindre la neutralité carbone en 2050. Différents gisements de biomasse sont nécessaires pour atteindre les objectifs et potentiels visés, et la viabilité de leur mobilisation peut être interrogée d'un point de vue environnemental. Les Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique (CIVE) prennent ainsi une place significative dans les scénarios de développement de la filière[58]. La gestion de l'interculture, au travers des CIPAN ou engrais verts a pu montrer ses bénéfices agronomiques[59], et peut constituer une alternative intéressante aux cultures dédiées pour l'apport de matière végétale dans les méthaniseurs[60]. Le devenir des digestats, résidus des matières organiques ayant réagi, est, à l'instar des fumiers ou lisiers, d'être épandus sur les terres agricoles, auxquelles ils peuvent apporter des nutriments et la matière organique résiduelle[61]. L'intégration de ces nouvelles pratiques peut modifier, de manière positive comme négative, les systèmes de production.

Afin de mieux identifier les conditions au travers desquelles la méthanisation agricole peut être une filière durable, le WWF France et GRDF ont conduit sur l'année 2019 un cycle d'ateliers rassemblant les différentes parties prenantes de la filière méthanisation : instituts de recherche, acteurs institutionnels, associations œuvrant pour l'environnement ou actives sur la thématique des énergies renouvelables, représentants du monde agricole. En confrontant, grâce aux interventions d'experts thématiques et aux retours terrain d'agriculteurs méthaniseurs, l'état des lieux des connaissances existantes et les pratiques agricoles actuelles, les ateliers ont permis de partager les enjeux de durabilité de la filière, d'objectiver ses impacts agronomiques et environnementaux, et d'identifier les questionnements restants. Le présent texte propose de capitaliser sur ce cycle d'ateliers en présentant le cadre de durabilité qui en est issu, et de l'illustrer au

57 MéthaLAE est un programme CASDAR de recherche appliquée coordonné par Solagro. Consulter les résultats du programme ici

58 ADEME, 2018. Un mix de gaz 100% renouvelable en 2050 ? / Arvalis, 2016. *Pérenniser la filière avec les cultures intermédiaires.* Les innovations – Perspectives agricoles – N°430

59 E. Justes, G. Richard. Contexte, concepts et définition des cultures intermédiaires multi-services, ADEME, 2015. *Introduire des cultures intermédiaires pour protéger le milieu et mieux valoriser l'azote*

60 ADEME, 2013. *Etude au champ des potentiels agronomiques, méthanogènes et environnementaux des cultures intermédiaires à vocation énergétique – Projet Expécive 2012*

61 GERES, 2018. *Valorisation agricole des digestats : quels impacts sur les cultures, le sol et l'environnement ?* Revue de littérature

travers de deux pratiques : l'interculture par les cultures intermédiaires à vocation énergétique et le retour au sol des digestats. En conclusion, il s'ouvre sur les moyens à mettre en œuvre pour que le développement de la filière prenne une orientation agroécologique, et respecte les conditions de durabilité ainsi exposées.

Trois conditions de durabilité de la filière biométhane

La méthanisation constitue une « brique » supplémentaire au fonctionnement classique des systèmes agricoles. Etape intermédiaire entre la production de matière organique et sa restitution aux sols, elle accélère le processus de transformation de la matière tout en produisant un gaz renouvelable faisant l'objet d'une valorisation énergétique.

La définition de la durabilité de la filière présentée ci-dessous s'articule autour de trois conditions qui intègrent les trois dimensions de la durabilité (environnementale, sociétale et économique), à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation, du territoire, et de la France (voire l'international).

Si le cadre présenté à la suite s'efforce d'intégrer tous les enjeux environnementaux, sociétaux ou économiques soulevés dans le cadre du cycle d'ateliers, il ne prétend pas être exhaustif. A l'attention de l'ensemble des parties prenantes de la filière, ces conditions sont une proposition de grille de lecture commune pour accompagner le développement de la filière. Elles sont appelées à être enrichies, par les projets de recherche et autres démarches en cours ou futurs.

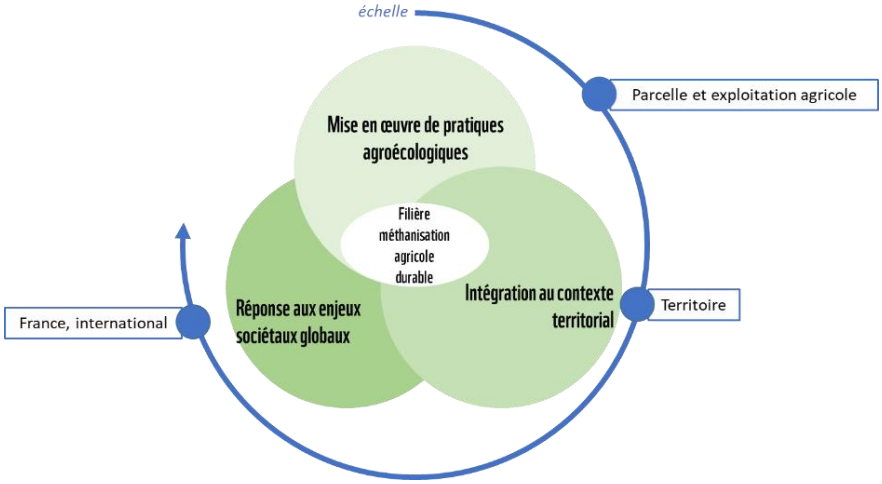


Figure 16. Les conditions de durabilité de la méthanisation agricole

En premier lieu, puisqu'elle déplace le retour au sol des matières organiques, la méthanisation doit être compatible avec le fonctionnement des cycles biogéochimiques dont dépend la stabilité des écosystèmes. A l'échelle de la parcelle et de l'exploitation, les pratiques liées à la méthanisation doivent donc permettent d'optimiser le stockage de carbone, de stimuler l'activité biologique et d'équilibrer l'utilisation d'azote dans les sols – en s'adaptant notamment au contexte pédoclimatique propre au territoire. Le recyclage des éléments doit ainsi garantir le bon état écologique des eaux, la qualité de l'air, et la qualité des sols. Se faisant, l'agriculteur doit gagner en autonomie azotée et énergétique, sans compromettre la faisabilité technico-économique de son activité. A l'échelle de l'exploitation, la méthanisation doit représenter une opportunité économique pour l'agriculture, et ne doit pas perturber sa transmissibilité.

Bien que l'exploitation agricole constitue le niveau décisionnel de l'agriculteur, l'impact des pratiques agricoles sur l'environnement impose son insertion à l'échelle du territoire[62]. De fait, la

62 Meriem Trabelsi, 2017. Comment mesurer la performance agroécologique d'une exploitation agricole pour l'accompagner dans son processus de décision

méthanisation doit intégrer l'enjeu de réintégration de l'agriculture dans son territoire, en contribuant à déspécialiser les régions agricoles qui avaient répondu à une logique de globalisation et de compétitivité. En termes d'approvisionnement, elle ne doit pas déstabiliser les filières de valorisation de biomasse existantes, que cette biomasse soit issue de la ferme ou de l'extérieur, ni menacer la sécurité alimentaire. Cette mobilisation de biomasse ne doit par ailleurs pas engendrer un coût environnemental supplémentaire (émissions de gaz à effet de serre, pollutions diffuses, etc.) par les actions mises en place pour son acheminement (transport, stockage, etc.). En intégrant la dimension territoriale, où les composantes spatiale et sociale sont fortes, la méthanisation doit enfin s'appuyer sur les synergies entre acteurs de même type, ou de type différent. En s'insérant par ailleurs dans une dynamique d'économie circulaire, elle doit favoriser l'économie locale et permettre la création d'emplois. L'enjeu est d'adapter chaque projet aux spécificités environnementales, sociales et économiques locales et de gagner l'adhésion et l'implication des parties prenantes par l'assurance et le partage des bénéfices induits par la méthanisation.

Enfin, en se plaçant à l'interface entre transitions agricole et énergétique, la méthanisation doit pouvoir, à une échelle plus macroscopique, montrer qu'elle apporte une réponse aux défis sociétaux globaux. En portant les objectifs nationaux liés à l'énergie, aux déchets, à l'agriculture ou à l'économie circulaire, elle doit contribuer à :

- Limiter les émissions de gaz à effet de serre et favoriser le stockage de carbone, pour lutter contre le changement climatique ;
- Favoriser la biodiversité, source des biens et services nécessaires à la vie sur terre ;
- Améliorer la résilience au changement climatique des systèmes agricoles ;
- Ne pas mettre en danger la sécurité alimentaire par l'épuisement des sols ou les effets de changements d'affectation des sols
- Contribuer à la transition énergétique en substitution des énergies fossiles.

CIVE et retour au sol des digestats : quelles pratiques pour remplir les conditions de durabilité ?

Cultures intermédiaires à vocation énergétique

Pratique encore récente, les CIVE font l'objet de nombreux travaux de recherche&développement et d'expérimentation en cours. Les connaissances scientifiques actuelles sur les CIVE démontrent que les services écosystémiques qu'elles rendent, bien qu'elles soient exportées avant l'implantation de la culture principale suivante, sont maintenus voire maximisés[63]. Les avantages qu'elles présentent sont toutefois tributaires d'un changement de pratiques (succession culturale, fertilisation, irrigation, organisation de la récolte) avec des effets sur les milieux à anticiper (tassement des sols, allongement de l'interculture et rendement de la culture suivante, disponibilité de la ressource eau[64] entre autres). C'est de plus une charge de travail supplémentaire pour l'agriculteur, qui doit être équilibrée avec la diversification des revenus et la sécurisation de l'approvisionnement qu'elles peuvent offrir. Les rendements des CIVE peuvent être de plus très variables selon les territoires, d'où la nécessité d'une adaptation des espèces choisies aux conditions pédoclimatiques. L'analyse et bilan de leurs effets à l'échelle de la rotation est un paramètre essentiel pour identifier l'itinéraire le plus bénéfique pour les compartiments eau- air - sol.

63 Par rapport à une culture intermédiaire « classique », type CIPAN

64 Projet OPTICIVE mené par le GIE GAO (Arvalis, Terres Univia, et Terres Inovia) avec Euralis, soutenu par l'ADEME

Tout en contribuant à limiter l'érosion des sols, la pollution des eaux ou encore le développement d'adventices, elles remodèlent les paysages pendant les périodes d'hiver ou d'été où le sol est nu, et pourraient constituer un refuge intéressant pour la macro et microfaune. La récolte des CIVE peut toutefois concurrencer la valorisation potentielle en fourrage (cultures dérobées) de l'interculture. Par le revenu qu'elles permettent de dégager et les flux de matières organiques qu'elles génèrent, les CIVE participent au renforcement des liens entre les acteurs agricoles.

Aujourd'hui, la définition d'itinéraires techniques régionalisés est en cours. L'introduction des CIVE dans les pratiques de production doit pouvoir suivre une logique de production de biomasse sans avoir un impact sur le rendement des cultures suivantes, et sans compromettre la santé des sols. D'un point de vue carbone, l'exportation des CIVE ne perturberait pas l'augmentation des stocks de carbone du sol identifiée par l'initiative 4 pour 1000[65], selon les modélisations réalisées par Arvalis pour certains systèmes de production. L'impact de l'intégration des CIVE sur la biodiversité, et notamment celle du sol, reste au contraire un enjeu encore peu étudié.

Retour au sol des digestats

Qualifier la qualité agronomique des digestats qui sont retournés au sol nécessite d'en étudier les trois composantes : la valeur fertilisante, la valeur amendante, et leur innocuité environnementale et sanitaire. Liés directement à l'origine de la biomasse entrante, aux conditions de *process* (température, temps de séjour notamment) et des post-traitements éventuels, les paramètres qui les définissent sont relativement faciles à contrôler. Les connaissances acquises sur les propriétés des digestats ont pu montrer leur pouvoir fertilisant[66]. Les conditions influençant les pertes d'azote liées à leur stockage et l'épandage des digestats sont ainsi bien identifiées (conditions climatiques, porosité du sol en particulier), et les bonnes pratiques les limitant connues.

En rendant les exploitations agricoles moins dépendantes d'intrants externes, les digestats peuvent participer à la résilience des exploitations et au maintien d'une activité agricole dans les territoires.

Les recherches sur leur capacité à entretenir les stocks de carbone du sol ont été moins appliquées. De même, leur impact sur la qualité biologique des sols reste peu connu, mais plusieurs projets pourront toutefois répondre à ce questionnement dans les années futures.

Les deux pratiques étudiées ici sont intimement liées : les CIVE peuvent équilibrer la matière réagissant dans les méthaniseurs, et influencer les caractéristiques du digestat. En retour, le digestat peut être utilisé comme fertilisant pour leur croissance, avec des effets sur le stockage du carbone au sol satisfaisants *a priori*[67].

Quelle réponse envisager pour un développement vertueux de la filière ?

La méthanisation est un outil présentant différentes opportunités : agronomiques, environnementales, énergétiques ou encore économiques, à condition de respecter *a minima* les pré-requis énoncés précédemment.

Le cadre actuel de la filière réglemente certaines pratiques, comme l'utilisation de cultures dédiées notamment, mais reste encore peut-être trop flou sur d'autres (qualification des CIVE par

65 https://www.4p1000.org/fr

66 GERES, 2018. Valorisation agricole des digestats : quels impacts sur les cultures, le sol et l'environnement ? / ADEME, 2011. Qualité agronomique et sanitaire des digestats.

67 Ce résultat se base sur une modélisation, mais aucun essai au champ de long terme n'a encore permis de le confirmer.

exemple). Le manque de référentiel commun définissant sa durabilité reste ainsi réel et souligné par les parties prenantes de la filière. La variété des types de méthanisation, des acteurs impliqués, et le contexte politique de révision des textes encadrant la production d'énergie peuvent avoir une influence positive et négative sur l'orientation agro-écologique de la filière et plus globalement l'orientation agroécologique des projets et rendent ce cadrage prioritaire. Si certains acteurs ont mis en place des initiatives (*Méthascope, charte des Agriculteurs Méthaniseurs de France, Charte Energie Partagée, Qualimétha® etc.*) pour une meilleure prise en compte des enjeux transversaux qu'elle porte, des conditions économiques et politiques doivent être définies à l'échelle nationale.

Parmi les premières actions à mettre en place, la capitalisation des connaissances, la montée en compétences des acteurs de la filière, le renforcement d'un socle commun de durabilité qui soit cohérent avec les politiques énergétiques, agricoles ou liées à l'économie circulaire et à la bioéconomie sont prioritaires. L'intégration territoriale des projets, les synergies pouvant être créées parmi les acteurs concernés sont par ailleurs identifiés comme clés de réussite, avec des exemples d'application multiples.

TÉMOIGNAGE

Sécalia méthanisation : Un projet d'énergie positive pour les exploitations de notre territoire de Côte d'Or

*Pascal Demay**

** Directeur Terrain, Dijon Céréales*

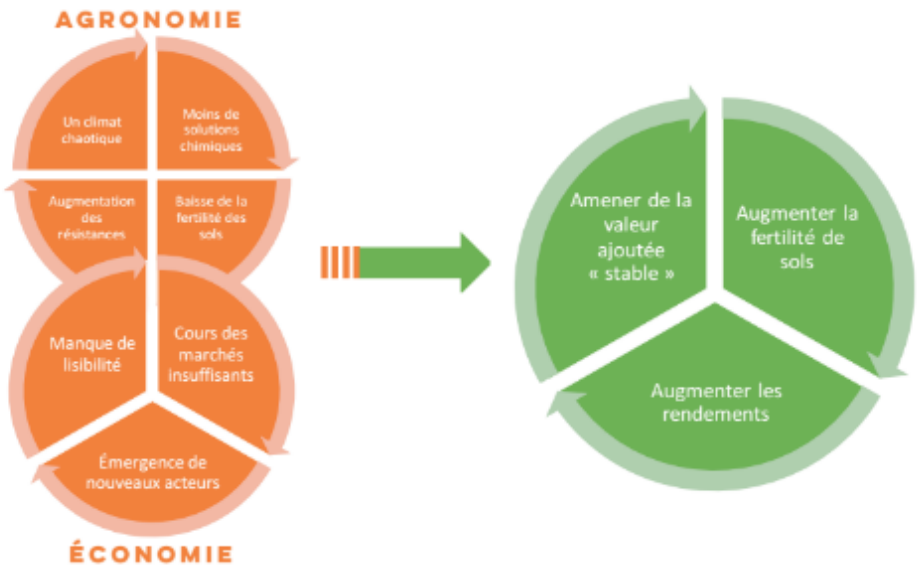
Acteur dynamique de la Côte-d'Or où elle représente 65 % de la collecte céréalière, Alliance BFC et Cérévia union de commercialisation des céréales ont toujours initié des partenariats et des projets à l'échelle interrégionale, notamment avec les autres coopératives de la grande région Bourgogne, Franche-Comté et Rhône-Alpes. Mais malgré ces innovations, force est de constater que l'économie des exploitations agricoles de ce secteur notamment sur les zones de plateau d'argilo-calcaire superficiel est en berne. Ces difficultés économiques ont deux explications principales : des produits de récolte en baisse (concurrence mondiale, baisse des prix, accident climatique) et des problèmes agronomiques récurrents.

La rotation colza/blé/orge en bout de course

Depuis quelques années, cette rotation de 3 ans adaptée aux sols à faible réserve utile montre de nombreuses limites : impasse concernant le désherbage des céréales, pression des ravageurs sur les colzas, fertilité des sols. A titre d'exemple, en trois campagnes, la surface de colza est passée de 12 000 ha sur ces zones à 1 000 ha sur la zone dite du Chatillonnais au Nord de la Côte-d'Or. Le rallongement des rotations est le levier agronomique le plus efficace pour faciliter cette gestion du désherbage, dans un contexte réglementaire où l'interdiction des molécules se durcit.

Faire évoluer les pratiques pour entrer dans un cercle vertueux

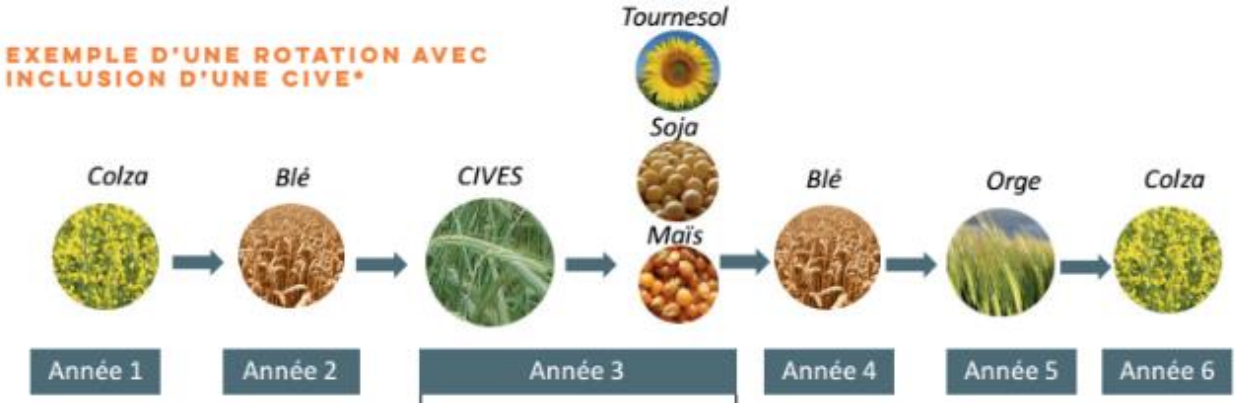
La situation actuelle incite fortement la coopérative à faire évoluer ce modèle, voire à le transformer, pour retrouver de la valeur ajoutée pour les exploitations agricoles et une dynamique positive de rendements. Les solutions recherchées depuis 10 ans comme l'agriculture de conservation, l'agriculture de précision, la baisse des coûts de production, sont des moyens intéressants mais pas suffisants pour changer de modèle. De même la production en agriculture biologique pour 15 à 20 % des exploitations offre une alternative technique et économique mais est difficilement transposable pour l'ensemble des agriculteurs.



(Illustration Dijon Céréales)

L'idée d'un projet de territoire avec le développement de la Méthanisation pour le plus grand nombre afin de bousculer les rotations avec rallongement et introduction de nouvelles cultures est alors devenue une évidence. L'intégration de CIVE notamment permettra de concilier agronomie et économie circulaire tout en répondant aux objectifs de la transition énergétique.

L'introduction de CIVE permet d'allonger la rotation et ainsi de réduire sensiblement, voire de s'exonérer du désherbage (=réduction de l'usage des produits phytosanitaires). En effet, la diversification des familles de plantes au sein d'une rotation permet de rompre le cycle des adventices et ainsi de limiter les phénomènes de résistances observables dans les systèmes de cultures à rotation courte.



Exemple de rotation à mettre en place avec l'intégration de CIVE (illustration Dijon Céréales)

L'introduction de CIVE permettra également de mettre en place des cultures de printemps pour lesquelles le potentiel restera limité mais où les charges sont modérées. Ces mêmes CIVEs pourront également s'intégrer en sur-semis dans une luzerne en place pour améliorer également le bilan azoté des exploitations. Ces mêmes cultures recevront le digestat issu du processus de méthanisation et participera à l'amélioration du fonctionnement des sols qui ont souffert de cette rotation courte, souvent associée à l'exportation de paille. Enfin le digestat issu de ce type d'unité de méthanisation pour également être valorisé sur des terres en agriculture biologique (selon la réglementation actuelle). Cet apport de fertilisation azotée rapidement disponible permettra de produire des céréales de qualités notamment en protéine. A l'échelle d'une rotation de 5 ans seuls 1 ou 2 apports de digestat pourront être réalisés sur la même parcelle ce qui évite tout apport en quantité importante avec une fréquence d'apport élevé et reste cohérent avec l'usage raisonné du digestat.

Sursemis en luzerne 14 octobre 2020

Seigle/luzerne et épeautre/luzerne
Même parcelle au 14 mai 2020

Epandage digestat liquide sur blé tendre bio 21 avril 2020

Crédit photos ACEM.

Donner accès à la méthanisation au plus grand nombre

Dijon céréales propose ainsi plusieurs projets collectifs et collaboratifs (sans concurrence avec d'autres projets individuels) pour mailler le territoire en lien avec le réseau de gaz existant. Ce modèle permettra de donner accès au plus grand nombre d'agriculteurs tout en leur demandant une forte implication dans la définition de ce projet.

TÉMOIGNAGE

Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique : la biomasse au service de l'Environnement et de l'Agriculture

*Laureline Bes de Berc**

** Animatrice technique en charge du groupe de travail CIVE au sein de l'AAMF (Association des Agriculteurs Méthaniseurs de France)*

Introduction

La Culture Intermédiaire à Vocation Energétique (CIVE) est implantée entre deux cultures à vocation alimentaire et récoltée en vue de produire de l'énergie, essentiellement en méthanisation. Selon la rotation de l'agriculteur et le contexte pédoclimatique, on distingue les CIVE d'été, semées au plus tard au début de l'été et récoltées à l'automne, des CIVE d'hiver, semées à l'automne et récoltées avant l'implantation d'une culture de printemps. La mise en place d'une CIVE permet de cultiver trois cultures en deux ans **sans venir remplacer la vocation alimentaire des parcelles**.

Selon le décret du 7 juillet 2016[68], contrairement aux cultures principales implantées en vue d'une valorisation énergétique (cultures dédiées), la biomasse issue d'une culture intermédiaire n'est pas comprise dans ce volume de biomasse dédiée, qui est limitée à 15% du tonnage total d'approvisionnement d'un méthaniseur.

Le rôle de la CIVE est avant tout de produire de l'énergie renouvelable, soit en tant qu'intrant principal d'un méthaniseur, soit en tant que complément permettant de sécuriser le plan d'approvisionnement d'un méthaniseur. La conduite de CIVE nécessite rigueur et technicité en vue de produire suffisamment de biomasse pour être exportée et valorisée. Mais l'optimisation de la culture intermédiaire n'est pas un frein aux autres services environnementaux que celle-ci peut rendre. Par ailleurs, le développement des CIVE n'est pas incompatible avec le développement ou le maintien des autres filières agricoles et notamment l'élevage.

1/ Produire de l'énergie avec des CIVE

1-1/ Un itinéraire technique complexe

La culture de CIVE ne s'improvise pas : En termes de conduite, la CIVE est à gérer comme une culture à part entière. Elle n'est pas comparable à une CIPAN (culture intermédiaire piège à nitrate) ou une SIE (surface d'intérêt écologique). Il est généralement considéré qu'en deçà d'un rendement de 4-5 tMS/ha, il n'est pas rentable de récolter une CIVE.

Le choix de l'itinéraire technique de la CIVE dépend du contexte pédoclimatique local : Il n'existe pas un itinéraire technique type applicable sur tous les territoires. Il dépend également de la conduite globale de la parcelle d'implantation : l'introduction d'une CIVE ne doit pas gêner la conduite des cultures alimentaires pour leur permettre d'assurer leur potentiel de production, tout en visant un rendement suffisant pour la CIVE elle-même.

Le **choix de l'espèce ou du mélange d'espèces** est essentiel et doit tenir compte des cycles des cultures précédentes et suivantes afin d'optimiser les dates de semis et de récolte de la CIVE par

68 Décret n° 2016-929 du 7 juillet 2016 pris pour l'application de l'article L. 541-39 du code de l'environnement https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000032855125&categorieLien=id

rapport à la récolte de la culture alimentaire précédente, au semis de la culture alimentaire suivante.

La réalisation du semis est également cruciale : par définition, une CIVE ne bénéficie pas des conditions climatiques optimales. Son implantation doit donc être particulièrement soignée pour un démarrage rapide et une production de biomasse suffisante.

L'apport d'intrants (digestat ou engrais, produits phytosanitaires) n'est pas à négliger mais doit être réfléchi de manière à optimiser l'apport agronomique à la culture, tout en tenant compte des contraintes climatiques. Par exemple : la portance des sols en hiver, les risques de volatilisation de l'azote en été.

D'une manière générale, la conduite de la parcelle doit être raisonnée selon une approche globale de trois ou quatre cultures en deux ans, et pas sous le prisme de la seule CIVE prise indépendamment.

1-2/ Etat des lieux des pratiques actuelles : Enquête dans le réseau AAMF

En décembre 2019, une enquête a été réalisée dans le réseau de l'AAMF afin de faire un premier état des lieux des types de CIVE pratiquées par ses adhérents. Au total, 100 personnes ont répondu à l'enquête, en provenance de toutes les régions de France métropolitaine hors PACA et Corse (toutes les régions où l'AAMF est implantée à ce jour).

Les sites en cogénération représentent 66% des répondants à l'enquête. La puissance électrique des sites concernés va de 30 à 2 800 kWé, pour une puissance moyenne de 407 kWé.

Les sites en injection représentent 34% des répondants à l'enquête. Le débit d'injection des sites concernés va de 45 à 300 Nm3/h, pour un débit moyen de 148 Nm3/h.

Les CIVE représentent en moyenne **29% du tonnage entrant** et **37% de l'énergie produite** par le méthaniseur, et la répartition CIVE d'été / CIVE d'hiver (en tonnage) est la suivante : **55% CIVE d'été / 45 % CIVE d'hiver.**

1-2-1/ CIVE d'été

79% des répondants produisent des CIVE d'été. La surface moyenne de CIVE d'été produites ou achetées pour alimenter un méthaniseur est de 78 ha.

Dans le questionnaire il a été distingué les espèces utilisées par tous les répondants, sans notion d'importance de leur usage respectif (Figure 1), ni de l'espèce ou mélange majoritairement utilisé par les répondants pour produire leurs CIVE d'été (Figure 2).

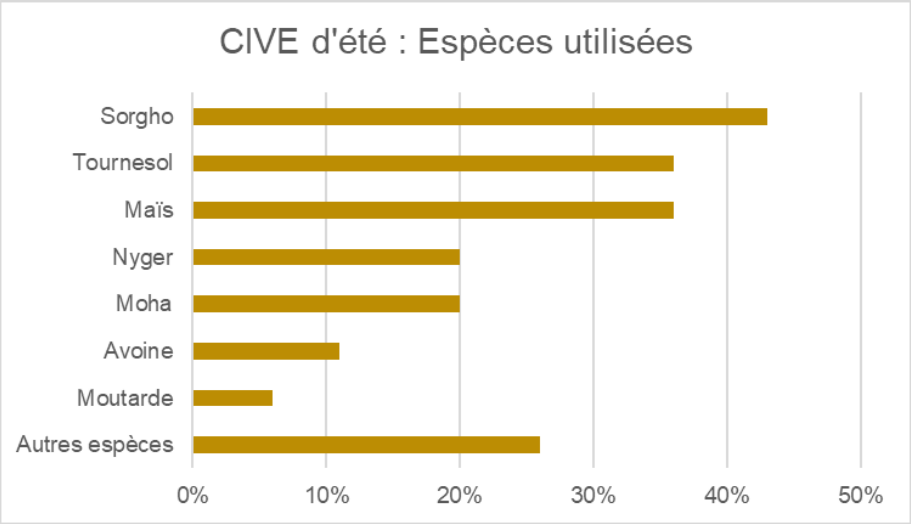


Figure 17 : Espèces utilisées pour produire des CIVE d'été

Les espèces utilisées sont nombreuses et variées. Au-delà des espèces les plus courantes, on peut citer la moutarde, le pois, le radis, le seigle, le sarrasin, la vesce, l'orge, l'avoine brésilienne…

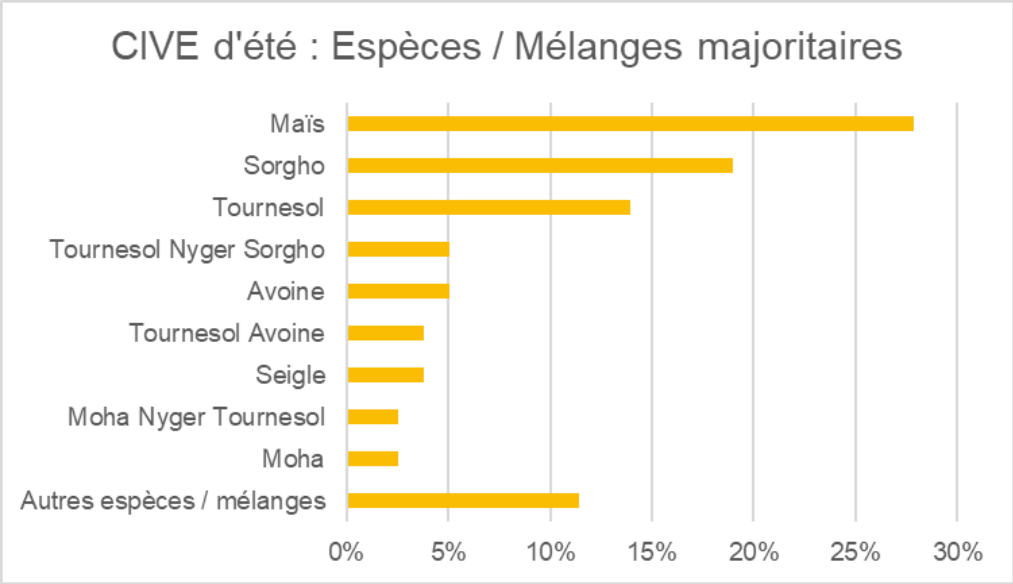


Figure 18 : Espèces ou mélanges d'espèces utilisés majoritairement pour produire des CIVE d'été

1-2-2/ CIVE d'hiver

84% des répondants produisent des CIVE d'hiver. La surface moyenne de CIVE d'hiver produites ou achetées pour alimenter un méthaniseur est de 86 ha.

De nombreuses espèces différentes sont utilisées, seules ou en mélange (

Figure 3). Le seigle est l'espèce la plus utilisée en CIVE d'hiver, seule ou en mélange, par la plupart des répondants et de manière majoritaire (Figure 4). Seuls 13% des producteurs de CIVE d'hiver déclare ne pas du tout utiliser de seigle.

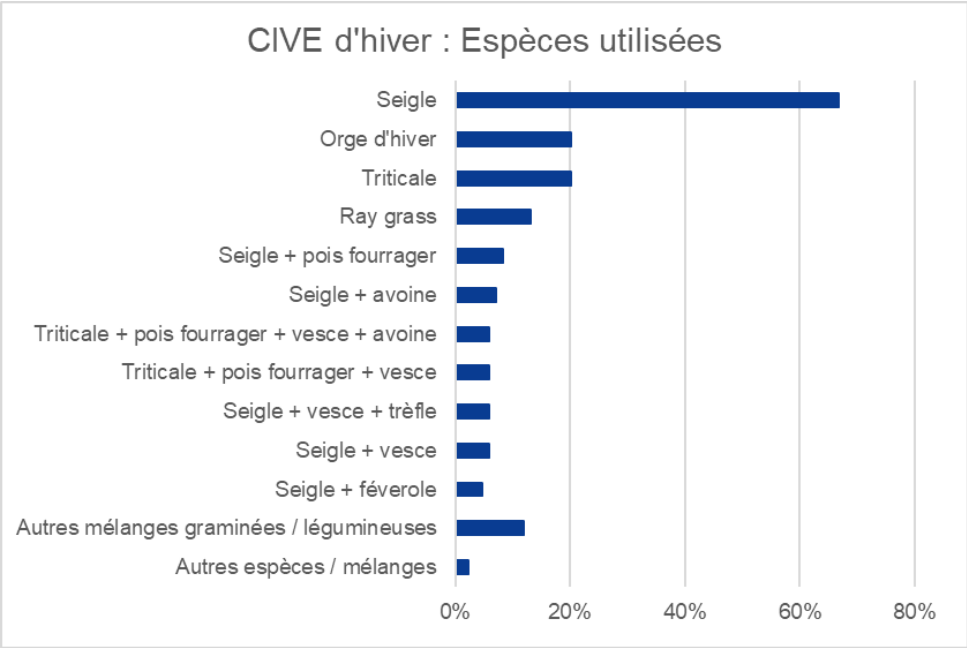


Figure 19 : Espèces ou mélanges d'espèces utilisés pour produire des CIVE d'hiver

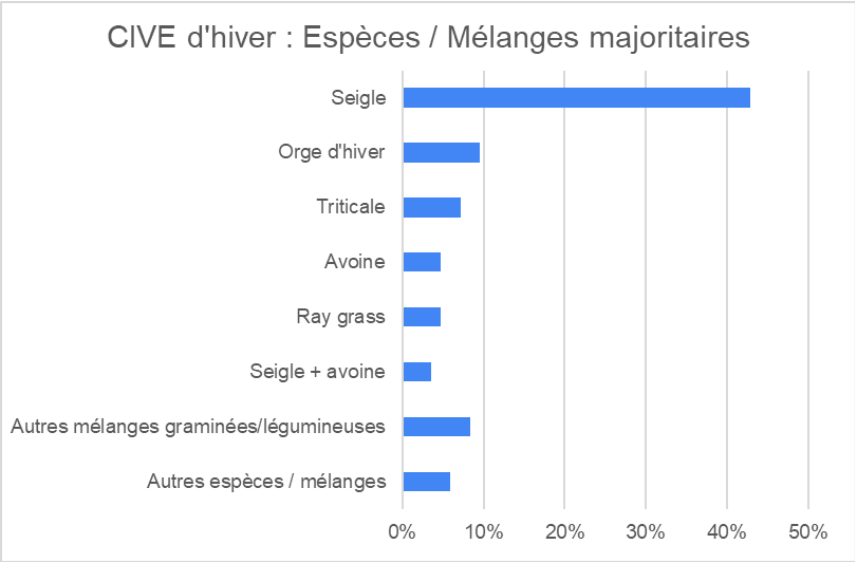


Figure 20 : Espèces ou mélanges d'espèces utilisés majoritairement pour produire des CIVE d'hiver

1-3/ Synthèse des coûts de production en 2019

Les coûts de production de la CIVE ne doivent pas être sous-estimés. L'AAMF a réalisé en décembre 2019 une analyse des coûts de production des CIVE en se basant sur une compilation de chiffres régionalisés. Ces données sont issues de nombreux travaux et essais réalisés et suivis localement par des agriculteurs, des techniciens et des conseillers qui présentent un véritable recul sur la production de CIVE et les coûts engendrés. La cohérence de l'ensemble des valeurs collectées démontre une certaine unité des coûts de production des CIVE en France.

Les éléments communs suivants ont été mis en évidence :

- Le principal facteur de variation des coûts de production est le volume produit. Plus le rendement est élevé, plus les coûts à l'unité produite sont faibles. A l'inverse, un rendement faible ou une CIVE non récoltée (échec de levée, aléas météorologiques…) génèrent des coûts très important pour l'agriculteur.
- Le rendement, et donc le coût de la CIVE, est également déterminé par la date de récolte, qui n'est pas choisie uniquement sur un critère de production de biomasse de la CIVE, mais dépend aussi de l'implantation de la culture suivante.
- Les deux dernières années de sécheresse ont montré que les rendements de CIVE devaient être revus à la baisse, en particulier sur les CIVE d'été. Les rendements moyens présentés ci-dessous peuvent donc être inférieurs à des rendements moyens faisant référence il y a deux ou trois ans.

Le tableau ci-dessous présente des moyennes de données collectées sur 8 régions de France :

	Rendement		Coût de production RENDU SILO		Coût de revient global			
	tMS/ha	tMB/ha	€/tMS	€/tMB	€/tMS	€/tMB	€/Nm³ CH_4	€/MWh PCS
CIVE d'été	5	24	119	26	158	35	0,554	44
CIVE d'hiver	6	28	100	23	136	31	0,487	38

Tableau 12 : Moyenne des coûts de production régionalisés

Il peut donc être considéré que produire une CIVE coûte en moyenne **135 à 160 €/tMS**, ou **30 à 35 €/tMB**.

Ces coûts prennent en compte :

- Les intrants : semences, engrais / digestat, produits phytosanitaires;
- Les charges de mécanisation : amortissement, entretien, réparations & assurances, pour l'implantation, la fertilisation / traitements, la récolte, le transport et le tassage ;
- La main d'œuvre ;
- Les pertes au silo : 5% ;
- L'amortissement des ouvrages de stockage : 13,20 €/tMS/an, sur la base d'un coût de construction de 60€/m² amorti sur 10 ans ;
- L'absence de récolte 1 année sur 5 : Echec de levée de la CIVE / CIVE non récoltée.

Ils ne tiennent pas compte :

- Du fermage ;
- Des charges sociales ;
- De la rémunération des capitaux.

Le coût de la biomasse produite a ensuite été converti en énergie sur la base des hypothèses suivantes :

- Potentiel méthanogène (Nm^3 CH_4/tMS) : 280 (CIVE d'hiver) à 285 Nm^3 CH_4/tMS (CIVE d'été)
- PCS Gaz H : 12,67 kWh/Nm^3 (pouvoir calorifique supérieur)

Ces coûts de revient sont élevés en raison de la nature même de la culture, qui est conduite en tant que culture intermédiaire et non en tant que culture principale : elle est implantée et conduite sur les périodes les plus défavorables.

En résumé, afin de produire la quantité d'énergie renouvelable attendue, la conduite de la CIVE doit être optimisée, raisonnée d'un point de vue agronomique et bien intégrée dans la rotation. Ainsi, la CIVE sera rentabilisée par une production de biomasse suffisante, tout en rendant à son environnement un ensemble de services annexes.

2/ Les autres services environnementaux rendus par les CIVE

Implantée entre deux cultures à vocation alimentaire, la CIVE ne crée pas de compétition d'usage et du fait de la couverture des sols, présente les intérêts agronomiques et environnementaux communs à toute culture intermédiaire, dérobée ou non.

2-1/ Captation de l'azote et limitation du lessivage

L'étude OPTICIVE[69] réalisée sur les années 2017-2018 a présenté les résultats suivants :

- En 2017, La mesure de reliquats azotés en entrée d'hiver et après la récolte de CIVE d'hiver démontre que les CIVE prélèvent une partie de l'azote, là où un sol nu ne présente pas de variation de ses reliquats azotés (et donc un risque de lessivage plus important au printemps) ;
- En 2018, les reliquats azotés mesurés après récoltes de CIVE d'hiver sont tous nettement inférieurs aux reliquats azotés mesurés en fin d'hiver sur un sol nu.

Ainsi, les CIVE, comme toutes cultures intermédiaires, **captent l'azote du sol et évitent leur lessivage,** ce qui limite la pollution des cours d'eau et des nappes phréatiques. Cet azote est ainsi valorisé en produisant de la biomasse énergétique.

69 https://www.ademe.fr/opticive

2-2/ Effets sur la structure du sol

La couverture des sols lors des périodes d'interculture permet de limiter le phénomène d'érosion et l'effet de battance que subissent les sols nus.

Par ailleurs, les cultures intermédiaires améliorent la structure des sols par un volume racinaire important. Ce phénomène est d'autant plus important avec l'implantation d'espèces dont le système racinaire est différent de celui des cultures alimentaires de la rotation. Cet impact est particulièrement intéressant en agriculture de conservation, pour limiter le travail du sol.

2-3/ Réduction de la pression adventice et parasitaire

Le couvert dense mis en place sur la parcelle **lutte contre les adventices par étouffement** avant leur période de grenaison : avec le temps et la pratique de cultures intermédiaires, le stock de graines dans le sol diminue. De plus, l'usage d'espèces de familles différentes des cultures alimentaires de la rotation permet de **diminuer la pression parasitaire** en cassant le cycle des ravageurs.

L'introduction d'une CIVE dans une rotation permet d'observer, à terme, une réduction de l'usage des intrants de 30 à 40 %, et ce même en considérant l'usage d'intrants pour produire la CIVE : La réduction d'intrants n'est donc pas un moyen de produire des CIVE, mais un résultat constaté par la généralisation de l'usage de CIVE.

Cet effet est particulièrement marqué dans des territoires où des rotations courtes sont pratiquées (type Blé-Orge ou Blé-Colza).

2-4/ Effets sur le stockage du carbone dans les sols

Différentes simulations ont été effectuées pour comparer les usages potentiels de fourrage sur le carbone du sol à long terme : broyage sur place (engrais verts), restitution après méthanisation, (digestat issu des fourrages), utilisation en alimentation animale (épandage de fumier), restitution du fumier digéré. **Quelle que soit la voie choisie, la quantité de carbone stable dans le sol reste proche.**

En réalité, chaque système (système digestif des animaux, des méthaniseurs ou des organismes du sol) dégrade la même fraction de la matière organique et **laisse intacte la fraction la plus stable**. Le passage par le stade méthanisation – soit directement des fourrages, soit des fourrages déjà partiellement digérés par les ruminants – ne change le bilan qu'à la marge[70].

L'étude plus récente OPTICIVE réalisée par Arvalis et présentée en juin 2019 confirme que **les rotations de cultures intégrant des cultures intermédiaires augmentent le stock carbone dans le sol[71].** Il y est démontré que si la proportion azote organique / azote minéral du sol évolue avec la méthanisation, la part de carbone du sol n'est pas affectée. De plus, la méthanisation permet le captage du méthane qui se diffuserait dans l'atmosphère sans méthanisation.

2-5/ Intérêts pour la biodiversité

L'implantation d'un couvert d'interculture présente de nombreux intérêts pour la biodiversité :

- Le couvert sert de refuge à la petite faune de plaine (perdrix, faisan, lièvre...) tout en lui apportant de la nourriture ;
- Selon les espèces ou mélanges implantés, un couvert fleuri augmente la quantité et la diversité des ressources pour les insectes pollinisateurs et permettra leur développement.

70 Thomsen **I.** Carbon dynamics and retention in soil after anaerobic digestion of dairy cattle feed and faeces. Soil Biology and Biochemistry, Nov. 2012.

71 Lagrange H., Arvalis. Projet OPTICIVE – Impact des CIVE sur le stockage du carbone dans les sols, Présentation Expo Biogaz, Juin 2019

3/ Le rôle des CIVE dans la complémentarité élevage / méthanisation

L'introduction de la méthanisation sur une exploitation agricole ou un territoire induit souvent une modification des pratiques de la ou des exploitations agricoles concernées, qui introduisent des cultures intermédiaires dans leurs rotations ou transforment leurs CIPAN en CIVE. **La CIVE est un moyen efficace d'augmenter sa production de biomasse énergétique sans affecter les réserves fourragères dédiées aux animaux.**

Par ailleurs, pour les éleveurs, les CIVE peuvent être une variable d'ajustement en cas de pénurie de fourrage en produisant des cultures intermédiaires « double performance » : le choix des espèces est réfléchi pour un usage soit en élevage, soit en méthanisation, selon les besoins. Dans l'enquête AAMF « Etat des lieux CIVE » de décembre 2019, 47% des répondants déclarent produire des CIVE « double performance ».

Paroles d'agriculteurs-méthaniseurs Enquête AAMF « Etat des lieux CIVE », décembre 2019

« Les CIVE sont indispensables à la méthanisation en France. Car nous gagnons en autonomie dans l'approvisionnement de nos unités et nous diminuons la concurrence avec l'alimentation animale. »

« Mes CIVE sont en priorité destinées à l'élevage [...] et viennent dans la méthanisation soit par surplus ou par récolte des résidus »

Conclusion

L'introduction de CIVE dans une rotation permet d'assurer la production de biomasse énergétique sans venir remplacer la vocation alimentaire des parcelles, à condition de la considérer comme une culture à part entière, avec son itinéraire technique propre et des coûts de production à ne pas sous-estimer. Mais l'optimisation de la culture intermédiaire ne l'empêche pas de rendre à son environnement un ensemble de services annexes, au-delà de la production d'une énergie renouvelable, maitrisable et non délocalisable : captation de l'azote, structuration du sol et maintien voire augmentation du stock de carbone, réduction du recours aux engrais minéraux, réduction des IFT, intérêts pour la biodiversité…

L'usage de cultures intermédiaires en méthanisation ne s'oppose pas aux autres filières agricoles. Le développement des CIVE est parfaitement compatible avec le développement ou le maintien des autres filières, et notamment l'élevage, en ne faisant pas directement concurrence aux cultures fourragères et en offrant aux éleveurs la possibilité de disposer d'un fourrage d'appoint.

La CIVE n'est pas une culture dédiée. Il est de la responsabilité individuelle de chaque producteur et chaque exploitant d'un site de méthanisation de se montrer transparent sur les intrants déclarés, afin de ne pas discréditer une culture qui présente de nombreux intérêts et qui vient s'insérer dans un modèle global d'économie circulaire.

Paroles d'agriculteurs-méthaniseurs Enquête AAMF « Etat des lieux CIVE », décembre 2019

« En agriculture de conservation, le couvert est un incontournable pour son système racinaire. Mais sa biomasse aérienne pose problème pour le semis suivant, la gestion des ravageurs (souris, limaces...) donc son évacuation de la parcelle est indispensable : la méthanisation est un cercle vertueux car le digestat aide à stimuler la croissance aérienne et racinaire des CIVE »

TÉMOIGNAGE

Mieux connaître les digestats pour mieux les valoriser

*Adeline Haumont**

**Association AILE, en charge de l'animation du GT retour au sol et agronomie de l'AAMF*

On le sait, les digestats regroupent des produits divers et variés. Si l'on veut bien les valoriser, il est nécessaire de bien connaître leur composition. Un travail d'enquête réalisé dans le cadre du projet Concept-dig[72] et d'analyses des digestats chez les adhérents a permis d'étudier l'importance de l'impact de plusieurs facteurs : intrants, procédés et post-traitements dans la nature des digestats. Des enquêtes annuelles sont également réalisées chez les adhérents sur la valorisation de ces digestats. Parallèlement à ces enquêtes, un groupe de travail « agronomie et retour au sol » s'est constitué au sein de l'association pour faire avancer la réflexion sur l'utilisation des digestats.

Enquête 2018

L'enquête réalisée en 2018 sur les digestats des adhérents AAMF rentrait dans le cadre du projet **Conceptdig** : projet financé par l'ADEME (GRAINE) coordonné par l'INRA LBE de Narbonne et associant l'INRA Ecosys Grignon, l'IRSTEA de Rennes, le CIRAD biomasse et bioénergie Montpellier. 72 sites de méthanisation ont participé en fournissant des échantillons. Le travail d'analyse, avec l'appui d'une stagiaire, a ensuite consisté à regrouper les digestats en plusieurs catégories en fonction de leurs intrants et des procédés.

Sans trop de surprise, les digestats bruts issus de rations majoritairement fibreuses (fumiers, végétaux, lisiers de ruminants) ont un rapport C/N élevé et un effet amendant plus important que les digestats issus de rations avec lisiers de non ruminants et de graisses. A l'inverse l'effet fertilisant (concentration azotée et taux de NH4/N) est plus marqué pour les rations non fibreuses. Cela rappelle les essais menés par la Chambre d'agriculture de Bretagne qui montraient que l'efficacité azotée du digestat pouvait être corrélée à son rapport C/N (Decoopman et al, 2017)

Concernant les **digestat solides**, le principal facteur qui explique la composition est le process : les digestats issus de process en voie solide (Digestat solide mais avec une concentration d'azote plus élevée que la fraction solide de la presse à vis)) contiennent tous les éléments fertilisants (N,P,K) et ont donc un effet fertilisant plus marqué que les fraction solides issues de séparateur de phase. Les fractions solides issues de séparateur de phase ont des teneurs en MO et des rapport C/N plus élevés. A noter que l'échantillon regroupait principalement des fraction solides issues de presse à vis et très peu de centrifugeuses.

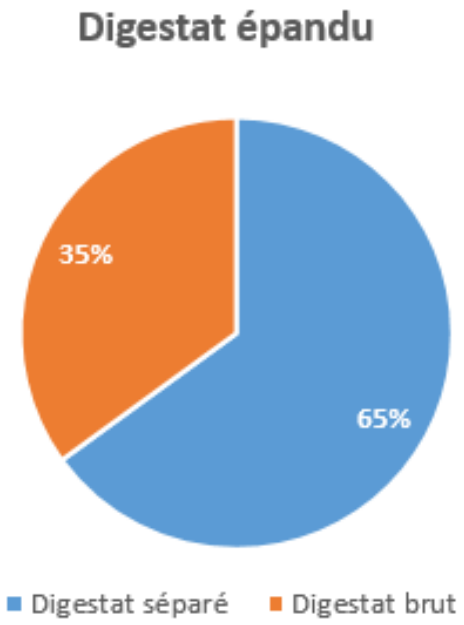
Cette typologie met en lumière la différence importante entre les effluents issus de bovins et les effluents issus de porcs sur la qualité finale du digestat. Les effluents bovins donnant un digestat principalement organique alors que les effluents porcins donnant un digestat principalement composé d'azote, de phosphore et de potassium.

A partir de ces caractérisations, un outil d'aide à la décision a été élaboré et est en cours de calage pour prédire le type de digestat en fonction de sa ration. Cela permettra, dès le stade projet de pouvoir réfléchir à ses pratiques en fonction de la typologie du digestat qui sera produit sur l'installation de méthanisation.

72 https://www.ademe.fr/content/concept-dig-outil-daide-a-conception-filiere-valorisation-agronomique-digestats

Enquête ferme AAMF 2019

Chaque année, l'association réalise une enquête chez ses adhérents pour connaitre les typologies des installations de méthanisation qui sont exploitées par ses adhérents. Avec 60 à 80 réponses suivant les questions, l'enquête 2019 a permis d'observer des tendances représentant la méthanisation en France :



- 65% des adhérents sont équipés d'un séparateur de phase, c'est un chiffre que l'on retrouve dans d'autres enquêtes (Données ADEME-SINOE, Enquêtes PRODIGE, Plan Biogaz Bretagne Pays de la Loire). C'est donc majoritairement des phases liquides et solides qui sont épandues en France ;
- La surface moyenne d'un plan d'épandage fait 668 ha, certains gros sites étant largement au-dessus (surface médiane 450 ha). Ce critère est dépendant de la typologie des unités de méthanisation. Les très grosses unités portées par les industriels ne faisant pas partie de l'association, ils pourraient faire augmenter cette moyenne sur un échantillonnage national.
- En moyenne, les unités épandent le digestat sur 6 exploitations agricoles, là aussi cela dépend de la typologie des installations.
- L'épandage du digestat liquide se fait majoritairement avec tracteur + tonne (équipé de pendillards ou d'injecteur) mais l'utilisation de système sans tonne (type ombilic ou quadraferti) se généralise, il est utilisé par 25 adhérents (sur 62 réponses à cette question)

Le groupe de travail « agronomie et retour au sol »

Le groupe de travail agronomie et retour au sol souhaite contribuer aux côtés des chercheurs à l'amélioration des connaissances sur les digestats par des retours directs du terrain, afin de diffuser les bonnes pratiques d'épandage. Pour ce faire, le GT participe ou contribue à différents programmes de recherche, en cours ou à venir.

Les axes de travail sont les suivants :

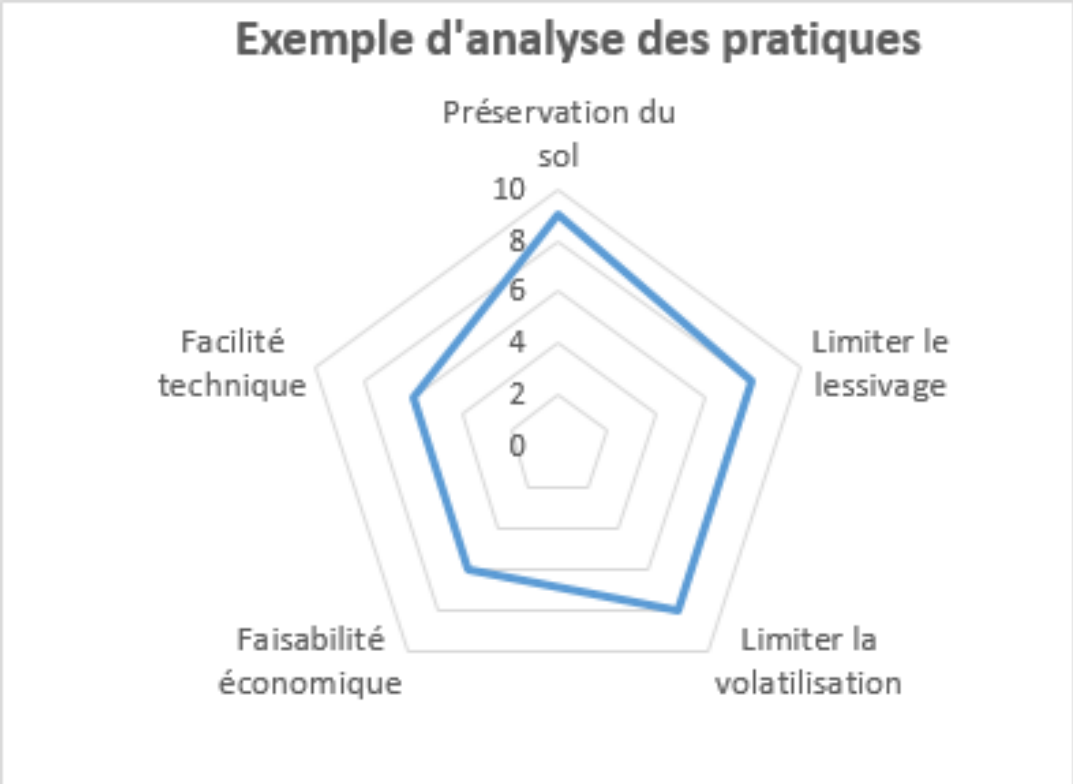
- Sur la qualité des sols : comment améliorer le bilan humique des fermes impliquées dans les projets de méthanisation et utilisant du digestat ? Un travail de réflexion sur l'ensemble des pratiques agricoles (non-travail du sol, couverture permanente et place des CIVE, type de rotations…) s'engage au sein du groupe de travail.

- Sur la qualité de l'air : un des atouts du digestat, sa forte teneur en azote ammoniacal, peut se révéler un de ses principaux défauts si les bonnes pratiques pour limiter sa volatilisation ne sont pas appliquées : couverture des fosses, épandage par temps humides et en absence de vent, favoriser les techniques d'épandages qui limitent la volatilisation…

- Sur la qualité de l'eau : au-delà des questions de dosage et d'équilibre du bilan, il convient de réfléchir aux meilleures stratégies (rotations, couverts végétaux…) qui permettent de limiter les pertes d'azote par lessivage.

Le groupe de travail a alors constaté que l'on ne peut pas gagner sur tous les tableaux en même temps : on est tenté de privilégier les épandages d'hiver pour la qualité de l'air mais en fonction du contexte ce ne sera pas possible si l'on souhaite limiter le lessivage. Par ailleurs les calendriers réglementaires ne le permettent pas toujours. On est tenté de déployer des méthodes d'épandage par injection pour limiter la volatilisation et les risques sanitaires mais cela peut être néfaste pour la préservation de son sol.

L'enjeu du groupe de travail va donc être de déterminer les meilleures solutions qui permettraient d'optimiser les pratiques sur les différents impacts :



Pour démarrer cette réflexion, un travail de compilation des données existantes est en cours. L'idée est de rassembler les données d'épandages des digestats sur plusieurs années sur des parcelles données (types et modalités des épandages, analyses des digestats, analyse de reliquats azotés, analyses de sols, …)

Deuxième étape, l'analyse des bilans humiques d'un groupe restreint de fermes. Ce travail va permettre d'élargir le champ de vision de l'épandage des digestats à l'ensemble des pratiques de la ferme qui ont un impact sur les sols.

Un énorme chantier s'ouvre ensuite qui sera (on l'espère) nourri par les programmes de recherche et les collaborations avec les agronomes de différents réseaux pour mettre en synthèse les différents enjeux évoqués

TÉMOIGNAGE

Diversifier en produisant du biométhane : une innovation maîtrisée, inscrite dans le territoire

Denis LEFEVRE, Thomas GONTIER** et François KOCKMANN****

**Journaliste, sollicité par l'Afa*
***Ingénieur en Energies Renouvelables, service Territoires, Chambre d'agriculture de Saône et Loire*
tgontier@sl.chambagri.fr
****Agronome retraité, membre de l'Association française d'agronomie (Afa)*

Près de 3 000 visiteurs pour la journée Portes Ouvertes en septembre 2019 consacrant l'inauguration du site de production de biométhane de Ciel, un bourg d'un millier d'habitants en Bresse. C'est le premier projet en injection agricole à voir le jour en Saône-et-Loire, le 17ème en France pour l'injection de biométhane dans le réseau : un retour d'expérience de Jean Louis Moratin, agriculteur, cheville ouvrière de cette innovation

Une orientation résolue de l'exploitation vers la diversification énergétique

Jean-Louis Moratin, 58 ans, en EARL, exploite 220 hectares de céréales et élève environ 300 bovins. En 2010, il réfléchit à une potentielle diversification d'activité pour insérer dans l'exploitation son frère, alors au chômage. Les deux frères s'orientent vers la filière énergétique et créent une SARL « Objectif lumière » qui exploite 1 500 m2 de panneaux solaires. Mais ils ont d'autres idées en tête. « *Innover cela me plaît beaucoup, reconnaît Jean-Louis Moratin. Et de toute évidence, on ne peut plus travailler aujourd'hui comme on le faisait il y a vingt ans. Désormais il faut savoir se remettre en question* ». La présence sur la commune de l'usine d'Aucy, spécialisée dans la conservation de légumes et la fabrication de plats cuisinés, et donc grosse consommatrice de chaleur, les incite à aller plus loin et à réfléchir à un projet de cogénération d'électricité et de chaleur, consommée par l'usine, l'approvisionnement du méthaniseur reposant sur les effluents de l'exploitation et les déchets de l'usine. Ils présentent leur projet à la direction de l'entreprise qui se montre, dans un premier temps, intéressée, mais tarde à donner une réponse. Et pour cause, l'usine fermera ses portes en octobre 2012. Pour autant Jean-Louis Moratin ne baisse pas les bras. Membre de la commission des énergies renouvelables de la Chambre d'agriculture de Saône-et-Loire, il s'intéresse alors à l'injection de biométhane dans les réseaux que promeut la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte (LTEVC), promulguée en 2015, qui prévoit un objectif de 10 % de biométhane à l'horizon 2030.

Du projet à la construction de l'unité de méthanisation, inscrite dans le territoire

Une étude de la faisabilité est engagée, dimensionnée autour d'une production annuelle prévisionnelle de biométhane de 10 600 MWh, soit l'équivalent de la consommation de 530 foyers. La présence dans le village voisin du réseau GRDF privilégie l'insertion de biométhane dans le réseau. L'unité envisagée se conçoit à côté de l'ancienne usine d'Aucy, à 800 mètres des premières habitations, évitant ainsi d'éventuels conflits avec le voisinage ; le projet se veut collectif, associant les agriculteurs locaux et inscrit dans le territoire, valorisant les co-produits potentiels.

La dynamique de maturation du projet conduit à la création d'une société SAS « Méthanergie Ciel », reposant sur la fratrie Moratin élargie à un neveu et associant onze autres agriculteurs locaux. Mais ces derniers souhaitent limiter leur apport à 20 % de l'investissement, la famille Moratin en assumant 80 %.

La plus grande difficulté aura été de convaincre les banques : « *Les banques étaient frileuses et il a fallu beaucoup de temps pour les convaincre de la faisabilité du projet* », souligne Jean-Louis Moratin. Finalement le Crédit agricole acceptera de financer ce projet qui représente un investissement de 5,5 millions d'euros, subventionné à hauteur de 28 % par l'ADEME et la Région Bourgogne-Franche Comté. La première pierre de l'unité de méthanisation est posée en octobre 2017 ; un an plus tard, elle s'étend sur 2,7 ha et comprend : 2 digesteurs de 3 640 m3 chacun chauffés à 45°C ; 1 stockage avec gazomètre de 3 331 m3 ; 1 hangar de stockage couvert pour partie par une centrale photovoltaïque de 100 kWc ; 1 hangar de stockage matériel et digestat solide ; 2 silos de stockage pour CIVE ; un bâtiment pour bureau et atelier. Le site a été aménagé pour permettre une évolution de l'installation de méthanisation.

La gestion de l'approvisionnement en intrants : un sujet complexe et permanent

L'unité collecte les fumiers (7200 tonnes) et lisiers (8600 tonnes) des exploitations associées, ainsi que des Couverts Intermédiaires à Vocation Energétique (600 tonnes) et des déchets de céréales (2500 tonnes) de la coopérative Bourgogne du Sud ; outre ces déchets agricoles, dominants, des coproduits industriels (1800 tonnes) fournis par la société SEDE. Toutes les matières sont pesées sur pont bascule soit 21 000 tonnes au total, initialement.

Les fermes associées, - un éleveur porcin, un aviculteur, trois producteurs de bovins et trois laitiers, ainsi qu'un producteur de veaux, apportent le fumier à l'unité, une prime de « bon apporteur » a été mise en place pour favoriser le respect des calendriers d'approvisionnement et la qualité de la matière ; quant aux lisiers, ils sont transportés par la SARL « objectif Lumière ». Adhérer à la méthanisation, c'est aussi limiter les investissements pour stocker les effluents sur chacune des exploitations.

Le méthaniseur, approvisionné à plus de 85 % par des déchets agricoles, doit être alimenté 7 jours sur 7 et 365 jours par an à hauteur de 60 tonnes par jour : « *La gestion de l'approvisionnement est complexe, précise Jean-Louis Moratin. Il faut trouver un équilibre subtil entre les différentes substances afin de ne pas dépasser 11% de matières sèches* ». Un biologiste gère cet équilibre rigoureux de l'approvisionnement ; les intrants sont préparés et broyés avant leur stockage, ce qui permet de limiter le volume et le risque d'échauffement, et procure un rendement plus performant. Puis les intrants sont introduits dans un premier digesteur, chauffés à 45 °C pendant 40 jours, avant d'être transférés dans un second digesteur, toujours chauffés à 45 °C pendant à nouveau 40 jours. « *Depuis, que nous avons investi dans un broyeur, précise Jean-Louis Moratin, nous avons réduit le temps de séjour dans les digesteurs à 56 jours. Ce qui nous a permis d'accroître la production d'environ un tiers.* ».

La valorisation énergétique : un très bon démarrage

Durant le process, les bactéries transforment ces matières en biogaz, épuré sur le site en biométhane, injecté dans le réseau GRDF ; les résidus ou digestats se retrouvent dans une cuve où les parties liquide et solide seront séparées ; la partie liquide passera une seconde fois dans le process. Le remplissage des fosses a démarré en novembre 2017 et l'injection du gaz dans le réseau GRDF est effective depuis février 2019, dans le cadre d'un contrat sur 15 ans. L'unité atteint son objectif initial de production dès la fin de la période de rodage : 135 Nm^3 (Normo m3 = m3 en conditions normalisées) de CH4/heure soit l'équivalent de la consommation de 680 foyers (chauffage et eau-chaude et 15 000 kWh par foyer). En 2020, du fait de l'achat précité du broyeur et d'une diminution du temps de séjour des matières dans le digesteur, la production est passée à 200 Normo m3 de gaz par heure, les approvisionnements se situant à 25 000 tonnes ; le retour sur investissement est désormais prévu dès la sixième année.

La gestion du digestat au niveau du collectif, objet d'un plan d'épandage et d'une logistique très performante

En fin de parcours, les agriculteurs associés au projet récupèrent le digestat, liquide, épandu sur les 1 748 ha engagés dans le plan d'épandage, préalable agronomique obligatoire, sur un rayon de 7 kilomètres. L'unité de méthanisation qui s'est équipée de deux cuves de transfert de 24 000 l pour les épandages de digestat liquide assure un rendu racine avec une rampe à pendillards ou un enfouisseur. Un point fort du dispositif concerne donc l'importance du parc de matériel acquis pour gérer de façon performante les différents flux de matière : « *Nous avons la capacité d'épandre 1500m3 par jour, sous forme liquide ; ainsi nous arrivons à satisfaire les exigences de chacun, sans problème d'arbitrage ; au demeurant, aujourd'hui, les éleveurs associés souhaitent accroître leurs apports en intrants, notamment ceux qui ont initialement opté pour un apport partiel ; le process permet de fournir un digestat comprenant en moyenne 6 unités d'azote et 4 unités en phosphore par tonne , l'azote est à 50 % sous forme ammoniacale et à 50% sous forme organique* » explique Jean-Louis Moratin.

Les adaptations au niveau agronomique sur l'exploitation

L'assolement initial à grands traits, reposait sur quatre cultures, blé (30%), maïs (30%), soja (20%) et orge d'hiver (20%), les terrains sont homogènes, en limons battants drainés. La méthanisation a induit la mise en place de CIVE d'été, sur 40 hectares environ : après la récolte de l'orge d'hiver, semis de maïs, puis, après récolte des colzas ou blés, semis d'une association sorgho et tournesol, avec un apport de digestat ; les CIVE sont fauchées en novembre. « *Toutefois, avec les sécheresses à répétition, nous allons introduire des CIVE d'hiver, à base d'une association seigle-vesce-pois, ensilées en mai en céréales immatures, puis semis de maïs ou soja, récoltés soit pour approvisionner la méthanisation soit pour la vente. En 2021, nous aurons environ 2 à 3 % de l'assolement en CIVE d'hiver* », précise Jean-Louis Moratin, agriculteur passionné par les questions en agronomie. Il fût l'un des pionniers à mettre en pratique un plan de fumure global de l'exploitation finalisé sur la gestion optimisée des ressources organiques et minérales, proposé par la Chambre d'Agriculture dès la fin des années 80. « *Aujourd'hui, avec la méthanisation, sur mon exploitation, cela représente une économie de 70 % sur l'achat d'engrais minéraux : il faut intégrer les apports fertilisants issus des déchets des céréales de la Coopérative et des co-produits industriels, en plus des fumiers et lisiers. Les épandages se font surtout au printemps, sur céréales et maïs, puis en début d'automne, lors des semis de colza, ray-grass et blé. Nous suivons nos sols avec les autres agriculteurs impliqués, par des analyses avec la Coopérative, car nous n'avons pas de recul.* »

Pour conclure cet entretien, quelles évolutions du métier ?

En choisissant de diversifier avec la filière énergétique par le photovoltaïque par solidarité avec la situation alors difficile de son frère, puis par la méthanisation, JL Moratin a consenti un investissement conséquent, même si soutenu en parti. Aujourd'hui, il semble exercer presque deux métiers : entrepreneur et agriculteur ? « *En fait, être entrepreneur producteur d'énergie implique l'agriculture, source première pour les approvisionnements en intrants puis pour les épandages de digestat ; donc pour moi, les deux métiers sont liés, je me sens toujours agriculteur, même si la diversification énergétique est aujourd'hui largement prédominante dans le revenu global des trois entités imbriquées (EARL, SARL, SAS). En dix ans, les ressources humaines ont singulièrement évolué : j'étais en 2010 seul à la tête de l'EARL ; aujourd'hui nous sommes 4, avec mon frère, mon neveu et mon épouse, pour gérer le tout. Quant aux perspectives, le contexte agricole est vraiment peu porteur au niveau économique ! Nous allons abandonner l'atelier de bovins viande déjà ; c'est plutôt vers un développement croissant de la méthanisation que nous nous orientons résolument* ».

Par ailleurs, il faut intégrer le fait que le tri à la source, qui s'applique aujourd'hui aux gros producteurs de déchets, sera généralisé aux particuliers en 2024 en vue d'une valorisation par compostage ou méthanisation : l'enjeu est d'organiser la filière à l'échelle des territoires entre les entreprises spécialisées de collecte des déchets et les exploitants des unités de méthanisation ; en ce sens, la réalisation de Ciel , intégrée dans le territoire, est exemplaire , comme le mentionne C.Munier, chargé de mission à l'Ademe Bourgogne-Franche Comté*.

**Source : Le Journal des Energies Renouvelables n°251-252 -2020 -pp 46-47.*

La dynamique des projets et leur accompagnement en Saône et Loire

Dans le cadre de la transition énergétique, la Chambre d'agriculture a recruté un ingénieur en Energies Renouvelables, en 2015, pour accompagner les agriculteurs intéressés par une diversification du revenu de leur exploitation.

Au niveau de la filière de la méthanisation, l'unité de JL Moratin constitue en fait la troisième installation en Saône et Loire : la première concerne la méthanisation de déchets ménagers à Chagny près de Châlon, avec injection de 300 Nm3 gaz dans le réseau GRT ; la seconde est une installation en cogénération à La Chapelle Thècle de 64 kWe.

Une quatrième installation a été mise en service en 2019 dans le Charolais (100 kWe) ; un cinquième projet est en construction à Simard ; il résulte d'un projet maturé par un collectif issu d'une Cuma, associant 6 fermes, avec l'ambition de produire 125 Nm3/h de biométhane injecté dans le réseau GRDF (http://agrimethabresse.info/).

En conséquence la filière de méthanisation s'inscrit dans le paysage, en particulier en région de polyculture-élevage avec des projets assez diversifiés. La méthanisation permet d'assurer une diversification de revenu, de valoriser les effluents et de réduire les odeurs des épandages. Il y a un potentiel important en Bresse en cogénération et en injection : le nouveau schéma de zonage de raccordement biométhane sur ce territoire prévoit de la place pour de nouveaux projets en injection. Toutefois, la baisse récente des tarifs de vente du biogaz risque de changer les équilibres ; sans parler de la remise en cause de certains contrats photovoltaïques, qui font perdre de la visibilité sur les contrats actuels ou futurs …

En qualité d'ingénieur-conseil, l'accompagnement en amont vise à structurer des collectifs, réfléchir rigoureusement aux ressources pour rechercher un approvisionnement stabilisé et dimensionner correctement chaque projet. Quant aux questions agronomiques, en particulier pour comparer les systèmes de gestion entre fumier-lisier et digestat, au niveau des valeurs fertilisantes et amendements organiques, elles ont fait l'objet d'une note technique mobilisant les connaissances acquises et identifiant les incertitudes. (tgontier@sl.chambagri.fr)

Sommaire

Avant-Propos

P-7- Avant-propos
Antoine MESSÉAN Président de l'AFA et Philippe PREVOST Rédacteur en chef
P-9- Éditorial
Olivier RÉCHAUCHÈRE et les coordonnateurs du numéro

Premiere partie : etat des lieux de la filiere et perspectives d'evolution

P-13- Emergence, état actuel et enjeux pour la filière méthanisation en France : le point de vue de l'ADEME
Julien THUAL
P-17- Une forte dynamique de la méthanisation en Bretagne, boostée par le secteur agricole
Adeline HAUMONT, Armelle DAMIANO, Jeanne LENCAUCHEZ
P-21- Accompagnement de la filière de méthanisation en Nouvelle Aquitaine : Focus sur MéthaN-Action
Juliette CHENEL, Sarahlynn RIZARD
P-27- Les formes d'unités de méthanisation en France : typologies et scénarios d'avenir de la filière
Alexandre BERTHE, Mathilde FAUTRAS, Pascal GROUIEZ, Sabina ISSEHNANE

Deuxieme partie : effets du developpement de la methanisation sur les exploitations agricoles

P-45- L'agronomie au service de la méthanisation ou la méthanisation au service de l'agronomie ?
Grégory VRIGNAUD
P-55- Diversité de fonctionnement des méthaniseurs : quels impacts sur les exploitations ?
Etienne PAILLARD
P-63- La méthanisation, outil favorable à la transition agroécologique
Christian COUTURIER, Céline LABOUBEE, Sylvain DOUBLET
P-71- Optimiser les services de l'interculture avec les CIVE
S. MARSAC, H LAGRANGE, C. QUOD, M. HEREDIA, N. DELAYE, F. LABALETTE, V, M. BAZET, EA. SANNER
P-93- De l'évaluation technico-économique et environnementale des CIVE à la co-construction des axes de recherche Optimiser les services de l'interculture avec les CIVE
S. MARSAC, M. HEREDIA, N. DELAYE, F. LABALETTE, V. LECOMTE, M. BAZET
P-107- La méthanisation est-elle compatible avec l'agriculture de conservation ?
Interview de Frédéric THOMAS - Propos recueillis par Grégory VRIGNAUD

Troisieme partie : enjeux de l'utilisation des digestats comme amendement et fertilisant

P-111- Que sait-on vraiment de l'impact des digestats de méthanisation sur la qualité biologique des sols agricoles ?
Sophie SADET-BOURGETEAU, Pierre-Alain MARON et Lionel RANJARD
P-115- Effets à court terme des digestats bruts de méthanisation sur la productivité et la qualité fourragère ainsi que sur le fonctionnement microbien sous prairies
LAFLOTTE Alexandre, PACAUD Stéphane, DAIGNEUX Benjamin, POIRRIER Fanny, GENESTIER Julie, RAVARD Benjamin, LE ROUX Yves, PIUTTI Séverine
P-129- Synthèse d'essai d'épandage de digestat liquide sur sol argilo-calcaire de 2010 à 2016
Grégory VRIGNAUD

Quatrieme partie : developpement de la methanisation, questions de politiques publiques et de gouvernance

P-137- Projets agro-énergétiques de territoire dans l'Ouest français : le rôle des agriculteurs-moteurs
Geneviève PIERRE (première parution dans la revue Cybergeo journals.openedition.org/cybergeo/27205)
P-153- Déploiement de la méthanisation agricole en France : quel cadre de durabilité ?
Isabelle MARX

Cinquieme partie : retours d'experience de divers acteurs sur des projets de methanisation

P-159- Sécalia méthanisation : Un projet d'énergie positive pour les exploitations de notre territoire de Côte d'Or
Pascal DEMAY
P-163- Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique : La biomasse au service de l'Environnement et de l'Agriculture
Laureline BES DE BERC
P-171- Mieux connaître les digestats pour mieux les valoriser
Adeline HAUMONT
P-175- Diversifier en produisant du biométhane : une innovation maîtrisée, inscrite dans le territoire
Denis LEFEVRE, Thomas GONTIER, François KOCKMANN