



Nouveaux Systèmes Énergétiques

Comité stratégique de filière



REALISATION NVX SYSTEMES ENERGETIQUES

GROUPE DE TRAVAIL : Méthanisation

SOUS-GROUPE DE TRAVAIL : Externalités

Impact des digestats de méthanisation sur la qualité de l'eau

DATE : 07 avril 2021

Le présent document a été produit dans le cadre des travaux du Comité Stratégique de la Filière (CSF) biogaz sur les externalités de la méthanisation. Il s'inscrit ainsi dans une série de travaux complémentaires ayant vocation à qualifier les externalités générées par la filière biogaz, les quantifier lorsque possible, et en déduire une valeur monétisée. L'ensemble des rapports sera mis à disposition sur le site internet du Comité Stratégique de Filière au gré des publications.

Table des matières

Synthèse introductive

Présentation du CSF « Industrie des Nouveaux Systèmes Energétiques »	3
Présentation du GT « Méthanisation »	3
Présentation de la démarche « Externalités »	4

Rapport "Impact des digestats de méthanisation sur la qualité de l'eau"

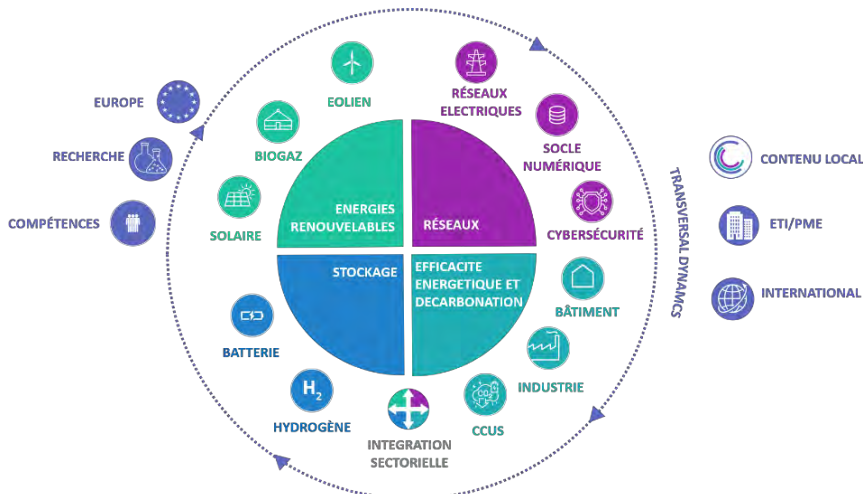
Synthèse exécutive.....	12
Introduction.....	13
PARTIE 1 : Synthèse des connaissances sur la pollution azotée	15
THEME 1 : Impact du type de Produit Résiduaire Organique (PRO) sur la lixiviation de l'azote	16
THEME 2 : Influence des pratiques d'épandage.....	19
THEME 3 : Evolution du bilan azoté	22
THEME 4 : Les couverts d'inter-culture comme pièges à Nitrates.....	24
PARTIE 2 : Autres impacts sur l'eau.....	28
Conclusion	29
Annexe 1 : Phénomène de volatilisation.....	30
Liste des abréviations	31
Bibliographie.....	32

Annexes

Annexe : Liste des membres du Comité de Pilotage du GT Externalités	35
Annexe : Avis du comité scientifique sur le Rapport.....	36

Présentation du CSF « Industrie des Nouveaux Systèmes Énergétiques »

La raison d'être des Nvx Systèmes Énergétiques est de transformer la transition énergétique en opportunité de réindustrialiser la France. Organisé autour de défis structurants, il fédère l'ensemble des instances qui travaillent, quotidiennement, à les relever : état, industriels de la transition énergétique, organisations syndicales, collectivités et associations. Il est organisé par groupe de travail autour de 4 thématiques : énergies renouvelables, réseaux, stockage et efficacité énergétique et décarbonation. Ces groupes sont soutenus et stimulés par 6 dynamiques transverses : Europe, recherche, compétences, contenu local, ETI/PME et international.



L'ensemble des travaux des NSE suivent les lignes directrices suivantes :

- Développer une offre compétitive d'énergie renouvelable...
- tout en choisissant la réindustrialisation plutôt que la dépendance technologique...
- et tout en construisant une industrie de l'efficacité énergétique et des smart grid permettant l'auto-financement de la transition énergétique.

Le comité stratégique de filière est structuré par le contrat de filière, il est sa boussole et fixe le cap des années à venir. Il est la feuille de route commune, sur un temps court, de l'ensemble des acteurs de la filière. L'ensemble des signataires du contrat de filière s'accordent sur la réalisation de projets ambitieux et à mettre tout en œuvre pour convertir la transition énergétique en opportunité de réindustrialiser la France.

Présentation du GT Méthanisation

Caractérisé par un fort potentiel industriel, innovant et exportateur, le biogaz représente une filière clé de la transition énergétique. C'est avec cette certitude que les acteurs de la filière se sont fortement investis dès le lancement du CSF en novembre 2018.

Pour répondre aux engagements que la filière et l'État se sont fixés dans le contrat, plusieurs groupes de travail se sont ainsi constitués. Portés et alimentés par une grande diversité d'acteurs (développeurs, fédérations professionnelles, constructeurs, bureaux d'études, opérateurs de réseau, pôles de compétitivité, etc.), ces travaux doivent dresser une vision globale de la compétitivité du biogaz, sans se limiter au seul coût l'énergie, et visent notamment à :

- accélérer l'industrialisation et améliorer la compétitivité de la méthanisation
- préserver et augmenter le contenu local industriel
- et mettre en avant, de manière objective et chiffrée, les nombreuses retombées positives de la méthanisation.

Présentation de la démarche « Externalités »

L'ambition : reconnaître la diversité et la valeur des services rendus par la méthanisation

Située à la croisée des mondes de l'énergie, de l'agriculture et des déchets, la méthanisation offre une solution vertueuse de traitement des déchets organiques, tout en permettant en parallèle la production d'un gaz renouvelable et local. Profondément ancrée dans les territoires et regroupant une large diversité d'acteurs, elle constitue ainsi une mise en application concrète et réussie des principes de l'économie circulaire. Sur l'ensemble de sa chaîne de valeur, la méthanisation est également à l'origine de nombreuses externalités.

Définition

Les **externalités** représentent les effets produits par une activité, affectant des acteurs extérieurs à cette activité et ne faisant l'objet d'aucune contrepartie marchande. Une externalité peut ainsi être **positive** (et donc représenter un bénéfice) **ou négative** (et donc représenter un coût).

Dans le présent rapport, le terme « externalités » sera plus largement utilisé pour évoquer les **services rendus** par la méthanisation à divers acteurs, ou ses **potentiels impacts négatifs**.

Par le nombre, la diversité et l'importance de ces externalités, la filière biogaz se distingue des autres énergies renouvelables. La filière biogaz est créatrice d'une valeur allant au-delà de la seule composante « énergétique » du gaz produit, qui peut être assimilée à celle du gaz naturel. Les coûts de production devraient de fait être mis en regard de la valeur de l'ensemble des services rendus, de manière à refléter les opportunités découlant du développement de la filière méthanisation sur le territoire français. La reconnaissance des externalités et de leur valeur constitue ainsi un exercice nécessaire, permettant d'offrir un regard objectif et complet pour définir la place de la méthanisation dans la transition énergétique, environnementale et sociale.

Une telle démarche s'inscrit également dans une logique de meilleure prise en compte des impacts environnementaux et sociétaux des projets, au-delà de la seule performance financière. Tout projet, qu'il soit agricole, énergétique ou autre, présente de manière inhérente des risques et des impacts, positifs comme négatifs, qu'il s'agit de maîtriser. En particulier, une compréhension fine des externalités de la filière ouvre la voie à la mise en place de stratégies et pratiques visant à maximiser les externalités positives, tout en atténuant les négatives. Cette approche constitue un ingrédient indispensable à une transition énergétique équilibrée et répondant aux attentes de la société civile.

Par ailleurs, l'approfondissement des connaissances sur les externalités permet d'éclairer les réflexions sur le juste niveau de soutien à accorder à cette filière en plein développement. En 2020, 91 unités de production de biométhane ont ainsi été mises en service, portant à 214 le nombre total d'installations en opération (+75%). Avec un très large portefeuille de projets en file d'attente, la filière biométhane est en ordre de marche pour opérer, et même accélérer, la nécessaire transition énergétique du secteur gazier. Les 1 100 projets inscrits au registre de capacités fin 2020 représentaient un potentiel de production annuel de 26 TWh¹, excédant dès à présent largement les objectifs fixés par la PPE² pour 2028 (14 à 22 TWh/an).

¹ Ministère de la Transition Ecologique, Tableau de bord : biométhane injecté dans les réseaux – Troisième trimestre 2020

² PPE : programmation pluriannuelle de l'énergie

De premiers travaux ont mis en évidence l'importance et la variété de ces externalités. Dans son rapport « *Renforcer la compétitivité de la filière biométhane française* » réalisé pour le compte de GRDF, GRTgaz, l'ATEE et le Syndicat des Énergies Renouvelables, Enea Consulting a notamment effectué une évaluation préliminaire de la valeur associée à certaines externalités de la filière, qui pourraient ainsi représenter de 55 à 85€ par MWh de biométhane produit³.

Si certaines des externalités (émissions de gaz à effet de serre, propriétés agronomiques des digestats) ont d'ores et déjà fait l'objet de nombreux travaux, plusieurs d'entre elles sont toutefois encore aujourd'hui peu caractérisées, mettant en évidence un besoin de synthèse et d'approfondissement des connaissances. De plus, certaines externalités sont directement dépendantes du contexte des projets et de leur environnement direct, renforçant la complexité liée à leur évaluation.

Signataires du Contrat Stratégique de la Filière Biogaz en mai 2019, les membres de la filière et les pouvoirs publics ont unanimement reconnu l'importance d'une évaluation rigoureuse des externalités et ont acté le lancement d'une réflexion collective sur le sujet. Conduits sous l'égide d'un large comité de pilotage, les travaux ont été animés conjointement par France gaz renouvelables et l'Association des Agriculteurs Méthaniseurs de France, de 2019 à 2021.

Membres du Comité de pilotage



Cette collaboration a donné lieu à la réalisation d'une première phase de travaux, ayant permis de recenser et qualifier l'ensemble des externalités, positives comme négatives, pouvant être générées par des projets de méthanisation.

Dans un second temps, trois thématiques prioritaires ont été retenues pour faire l'objet d'un approfondissement dans le cadre des travaux du comité stratégique de filière : l'eau, les émissions de gaz à effet de serre, et le traitement des déchets. Des groupes de travail regroupant des acteurs industriels, institutionnels et académiques ont ainsi été mis sur pieds avec pour objectifs de qualifier, et si possible, quantifier et évaluer la possibilité de monétiser ces externalités. Des travaux sur la contribution de la méthanisation à la résilience des exploitations agricoles ont également été enclenchés, mais s'inscriront dans une temporalité plus longue.

Afin de répondre aux impératifs de rigueur et d'objectivité nécessaires à une telle démarche, un comité scientifique a été chargé de conseiller les groupes de travail et d'émettre un avis sur les résultats produits par ces derniers.

Si les acteurs de la filière se sont pleinement emparés du sujet des externalités, d'autres institutions ont depuis souligné l'importance d'une juste prise en compte des services rendus par les unités de méthanisation. Le comité de prospective de la Commission de Régulation de l'Énergie a notamment mis en évidence en 2019 la nécessité d'une intégration des externalités dans le modèle économique de la méthanisation⁴, afin d'en asseoir la pertinence économique et environnementale. L'année suivante, l'office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST) a plaidé pour un rehaussement des objectifs de développement de la filière, en remettant en avant l'importance des externalités⁵.

³ Enea Consulting, Renforcer la compétitivité de la filière biométhane française, 2018

⁴ Comité de prospective de la Commission de Régulation de l'Énergie, Verdissement du Gaz, 2019

⁵ Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, L'agriculture face au défi de la production d'énergie, 2020

Le constat : Les projets de méthanisation sont à l'origine d'une multitude d'externalités

Depuis l'émergence des premières unités modernes dans les années 2000, la méthanisation et ses divers impacts ont fait l'objet de nombreux travaux. La France présente en particulier une riche littérature scientifique sur certains volets agronomiques et environnementaux des activités de méthanisation.

Bien qu'étudiés, les impacts de la filière n'avaient jusqu'alors été que très succinctement envisagés comme des externalités, c'est-à-dire comme des bénéfices ou des coûts perçus par des acteurs extérieurs. En particulier, peu de travaux, présentant une vision systémique et qualifiée des externalités de la filière méthanisation, avaient été produits. Permettant d'approcher l'ampleur et la valeur des externalités, les démarches de quantification et de monétisation restent également largement marginales.

En s'appuyant sur une large revue de littérature et la réalisation d'entretiens avec des experts de la filière, un panorama des connaissances actuelles sur les externalités générées par les projets de méthanisation a été dressé. Au total, ce sont ainsi plus de 15 thématiques qui ont été identifiées, qualifiées et réparties selon leur nature : agronomique, environnementale, socioéconomique ou énergétique (voir schéma présenté sur la page suivante).

Les externalités sont la résultante d'une multitude de causes, pouvant survenir sur l'ensemble de la chaîne de valeur des projets. Leur évaluation constitue ainsi un exercice particulièrement complexe et dépendant d'une multitude de facteurs. L'importance d'une externalité peut ainsi varier sensiblement d'un site à l'autre, en fonction du contexte du projet et des pratiques mises en œuvre par les exploitants des unités.



Cartographie des externalités de la filière méthanisation
(voir page suivante)

Illustration

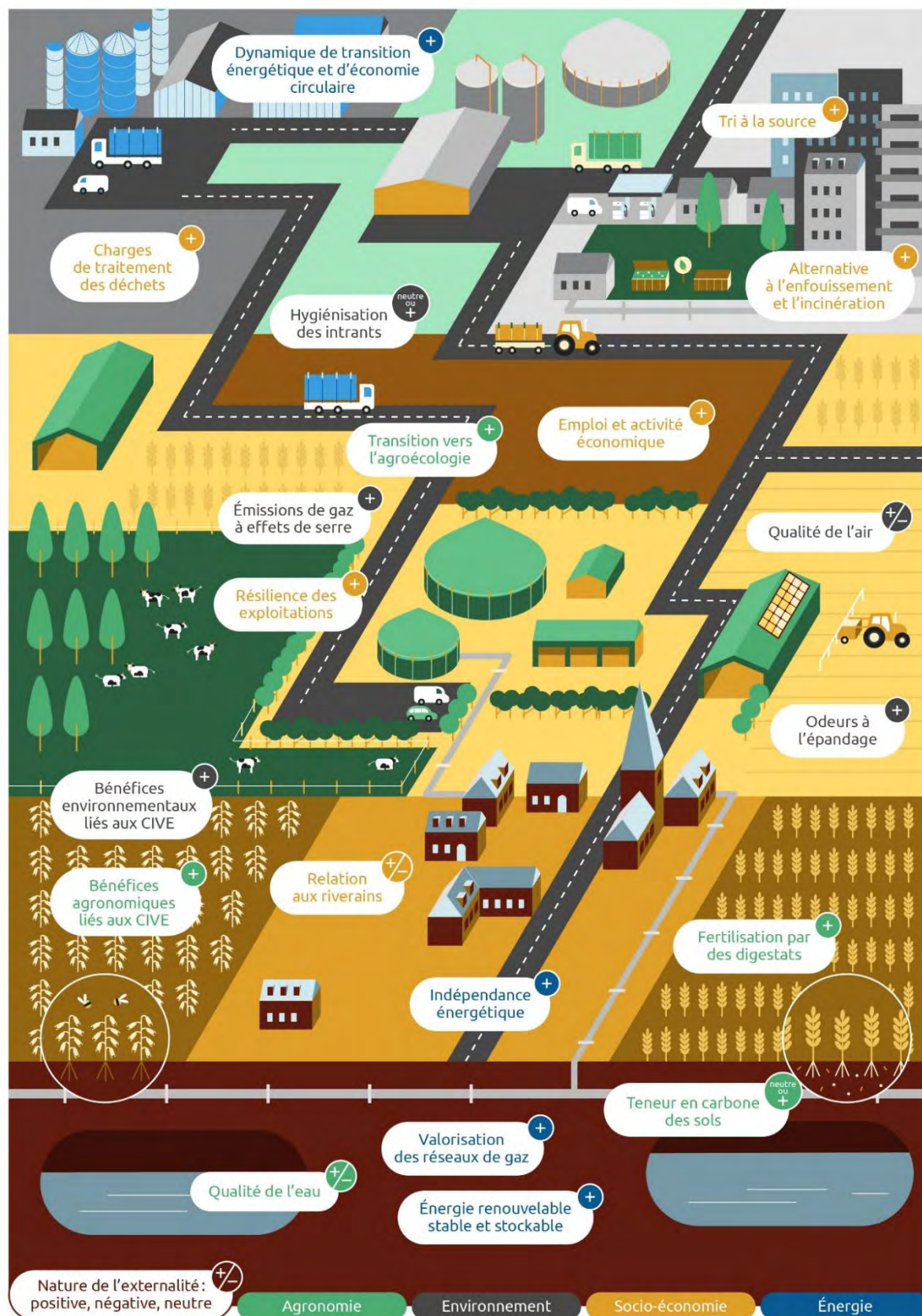
L'impact de la méthanisation sur le changement climatique ne peut être évalué qu'en tenant compte de l'exhaustivité des émissions induites (ex : émissions dues à l'épandage de digestat ou transport des intrants) et évitées par le projet (ex : meilleure gestion des effluents d'élevage, réduction de l'usage d'engrais minéraux) et ce sur l'ensemble du procédé.

Le bilan carbone varie également d'une unité à l'autre, en fonction par exemple du mix d'intrants, du matériel et des pratiques d'épandage, ou encore des installations de stockage des intrants.

Au-delà de ce panorama, les travaux enclenchés dans le cadre du Comité Stratégique de Filière ont permis de synthétiser et approfondir les connaissances sur trois thématiques majeures : l'eau, les émissions de gaz à effet de serre et le traitement des déchets.

Schéma : Cartographie des externalités générées par la filière méthanisation

Une quinzaine d'externalités ont été identifiées, caractérisées et classées selon leur nature (environnementales, agronomiques, énergétiques ou socio-économiques) :



Qualité de l'eau : résumé des travaux

L'impact de la méthanisation sur la qualité des eaux souterraines et de surface constitue un sujet particulièrement complexe, suscitant de nombreuses discussions. Envisagée par certains comme un outil de préservation des ressources en eau, la méthanisation est considérée par d'autres comme un facteur de risque supplémentaire. Cette problématique reste relativement peu documentée, au niveau français comme international.

Face à l'absence de consensus scientifique clairement exprimé et de documents présentant une vision systémique du sujet, un groupe de travail a été chargé de dresser un état de l'art de l'impact de la méthanisation sur la qualité de l'eau. Composé d'une dizaine d'experts provenant de différentes institutions publiques comme privées, le groupe de travail a été piloté par l'Association d'Initiatives Locales pour l'Énergie et l'Environnement (AILE).

Quel lien entre méthanisation et qualité de l'eau ?

Le principal lien entre méthanisation et qualité de l'eau se fait par l'épandage du digestat, retour au sol de la matière après méthanisation. Au même titre que les autres produits résiduels organiques (ex : lisier, fumier, compost) ou les engrais minéraux (ex : engrais azotés de synthèse), l'épandage de digestat permet aux agriculteurs d'apporter de la matière organique et des nutriments au sol et aux plantes.

Indispensable aux activités agricoles, l'apport de nutriments se doit d'être piloté de manière précise, en adéquation avec les besoins des cultures et des sols. Apportés en excès ou au mauvais moment, les nutriments peuvent en effet être entraînés vers les masses d'eau avoisinantes par lixiviation ou ruissellement et causer des pollutions. L'introduction d'un projet de méthanisation peut entraîner des changements de pratiques et de matériel (épandage, stockage) susceptibles de modifier les modalités de retour au sol par rapport à la situation avant méthanisation.

Par le biais d'une large revue de littérature complétée de plusieurs entretiens, une synthèse des connaissances scientifiques actuelles a été rédigée. S'appuyant sur les contributions de multiples acteurs de référence, ce travail inédit introduit une vision globale et argumentée de la problématique, distinguant les éléments faisant consensus de ceux faisant toujours l'objet de débats.

La synthèse met en évidence le rôle central joué par les pratiques dans l'impact possible d'une activité agricole ou de méthanisation sur la qualité de l'eau. À pratique d'épandage similaire et à quantité d'azote efficace apportée identique, les digestats présentent ainsi un risque de lixiviation globalement similaire aux produits résiduels organiques classiques. L'introduction d'un projet de méthanisation entraîne toutefois un ensemble de changements de pratiques susceptibles d'impacter la qualité de l'eau. Le respect des bonnes pratiques permet de minimiser les risques de dégradation de la ressource en eau, et peut constituer un levier de préservation de cette ressource. En effet, la connaissance des caractéristiques du digestat (dont le pouvoir fertilisant est plus important que celui des effluents non digérés), la possibilité de séparer les phases, une capacité de stockage suffisante et l'usage de matériel adapté peuvent permettre d'améliorer la gestion des épandages. L'étude met également en évidence le rôle de « piège à nitrates » joué par les cultures intermédiaires, dont le développement peut être favorisé par la méthanisation.

Le groupe de travail souligne finalement l'importance de poursuivre les travaux sur le lien entre méthanisation et qualité de l'eau, notamment sur deux thématiques particulièrement peu documentées à l'heure actuelle :

- Caractériser les changements de pratiques agricoles constatés à l'échelle des systèmes (avant et après méthanisation), et évaluer par modélisation l'impact de ces changements sur la qualité de l'eau
- Étudier l'influence des effets « induits » par le développement de la filière méthanisation (et notamment la question du changement d'affectation des sols)

Émissions de gaz à effet de serre : résumé des travaux

La contribution de la méthanisation au changement climatique ou à son atténuation fait l'objet de nombreux travaux à l'échelle internationale. Au regard de la grande diversité d'unités, l'évaluation des émissions de gaz à effets de serre du biométhane nécessite une approche rigoureuse, couvrant notamment l'ensemble de la chaîne de valeur des projets. La comptabilisation des émissions peut par ailleurs être effectuée selon divers cadres méthodologiques en fonction de l'objectif recherché, et donc mener à des résultats légèrement différents. Le caractère vertueux de la méthanisation en matière de limitation du changement climatique fait toutefois aujourd'hui l'objet d'un large consensus, faisant de la réduction des émissions de gaz à effet de serre l'une des principales externalités associée à la production de biogaz. Selon la Base Carbone, inventaire national des facteurs d'émissions géré par l'ADEME, le biométhane permet ainsi une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 81% par rapport au gaz naturel.

Quel lien entre méthanisation et émissions de gaz à effet de serre ?

La combustion de biométhane donne lieu à des émissions de CO₂ dit biogénique, provenant du CO₂ stocké dans la biomasse et capturé lors de la photosynthèse. Ces émissions sont considérées comme relevant du cycle court du carbone et présentent donc un impact nul sur le climat (au contraire des émissions de CO₂ « fossiles »).

Au-delà de la combustion du biométhane, les étapes associées à sa production sont naturellement à l'origine d'émissions induites (ex : émissions de CO₂ dues au transport des intrants) et d'émissions évitées (ex : émissions à l'épandage des effluents non digérés). L'évaluation de l'empreinte carbone du biométhane nécessite ainsi l'évaluation et la prise en compte de l'ensemble de ces contributions.

Un groupe de travail piloté par GRDF et regroupant un grand nombre des acteurs de la filière méthanisation a été lancé en juillet 2019 afin de travailler à la reconnaissance de cette externalité. Fruits de la collaboration des différentes parties prenantes impliquées, deux travaux complémentaires ont été réalisés :

Rédaction d'un rapport pédagogique explicitant les principales méthodes de comptabilisation des émissions de gaz à effet de serre liées à la production de biométhane. Dans un premier temps, un rapport pédagogique⁶ explicitant l'enjeu lié à la comptabilisation des émissions de gaz à effet de serre associées au biométhane a été rédigé. Également disponible sous la forme d'une synthèse exécutive, ce rapport répond à un besoin de clarification et d'explication, exacerbé par la coexistence de plusieurs méthodologies distinctes. Le document introduit ainsi quatre méthodes de comptabilisation de référence utilisées dans le cadre français, en détaillant les différences, les raisons d'être, ainsi que les principaux résultats de chacune d'entre elles.

Développement d'une méthodologie de comptabilisation permettant d'évaluer les réductions d'émissions d'un projet de méthanisation. Le groupe a également travaillé à l'élaboration d'un nouveau mécanisme de comptabilisation, ouvrant la porte à une évaluation des réductions d'émissions directement à l'échelle d'un projet de méthanisation. La méthode et l'outil associés seront ainsi rendus publics, permettant à tout porteur de projet d'évaluer le bilan gaz à effet de serre de son projet. La méthode sera en outre proposée dans le cadre du Label Bas Carbone⁷ afin de permettre aux unités respectant un certain nombre de conditions prédéfinies de bénéficier d'un financement complémentaire. En particulier, les projets souhaitant bénéficier d'une labellisation seront soumis à une liste de critères d'éligibilité ayant vocation à garantir leur exemplarité d'un point de vue environnemental.

⁶ Le rapport, ainsi que la synthèse exécutive seront disponibles sur le site du CSF

⁷ Le label bas-carbone est un cadre de certification carbone national volontaire introduit et porté par le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire.

Traitement des déchets : résumé des travaux

Souvent abordée par le prisme de la production d'énergie, la méthanisation n'en constitue pas moins une voie vertueuse et efficace de traitement des déchets organiques. Au-delà des déchets agricoles (effluents d'élevage, résidus de culture, ...), la méthanisation s'avère ainsi particulièrement indiquée pour le traitement des biodéchets issus des ménages, des collectivités ou des entreprises, ou encore les boues de station d'épuration. Dans un contexte de généralisation du tri à la source à partir de 2023, la méthanisation peut ainsi se positionner comme une alternative durable à l'enfouissement et l'incinération, mais également une alternative complémentaire au compostage. Si d'autres pays ont déjà mis en place des systèmes de collecte sélective et développé la méthanisation pour traiter les déchets associés, cette pratique reste encore relativement marginale en France.

Quel lien entre méthanisation et traitement des déchets ?

La méthanisation permet l'utilisation d'une large variété d'intrants, dont les déchets agricoles ou encore les boues de STEP. Elle constitue également une voie de traitement pour les déchets issus de l'industrie agroalimentaire, des collectivités et des ménages. Dans ce dernier cas, la fraction fermentescible des ordures ménagères peut être extraite après une étape de tri dans un centre spécialisé, ou captée directement à la source après mise en place d'une collecte sélective.

À l'heure actuelle, les biodéchets (déchets naturels biodégradables) sont en majorité enfouis dans des installations de stockage ou incinérés. Seule une part réduite est aujourd'hui fléchée vers les principales voies de valorisation agronomique, qui sont le compostage et la méthanisation.

Afin de mener une réflexion sur la place de la méthanisation comme filière de traitement des biodéchets, l'animation d'un groupe de travail pluridisciplinaire a été confiée à la Fédération Nationale des Activités de la Dépollution et de l'Environnement (FNADE) et SARIA Industries.

Composé d'acteurs du monde des déchets, de l'agriculture et de l'énergie, le groupe a travaillé à l'identification et la caractérisation des externalités sur l'ensemble de la chaîne, de la collecte des déchets jusqu'à leur valorisation, en passant par leur traitement par méthanisation. Pour ce faire, le groupe de travail s'est notamment appuyé sur un état des lieux détaillé du traitement des déchets organiques en France, réalisé grâce au croisement des expertises complémentaires des différents contributeurs.

En complément, des propositions permettant de saisir le plein potentiel de ces externalités ont été dressées conjointement par les membres du groupe de travail.

Rapport « Impact des digestats de méthanisation sur la qualité de l'eau »

Cette note de synthèse a été rédigée sous l'égide du groupe de travail « *Qualité de l'Eau* » par AILE, dans le cadre des travaux du Contrat Stratégique de Filière « *Nouveaux Systèmes Energétiques* ».

Auteurs de la note

Armelle Damiano

Directrice et responsable du secteur Biogaz

Louis Rosin

Chargé d'études Biogaz



AILE (Association d'Initiatives Locales pour l'Énergie et l'Environnement) est une agence locale de l'énergie créée en 1995 dans le cadre du programme SAVE de l'Union Européenne par l'ADEME Bretagne et les cuma (Coopératives d'Utilisation de Matériels Agricoles) de l'Ouest. AILE est spécialisée dans la maîtrise de l'énergie et les énergies renouvelables en milieu agricole et rural.

Membres du groupe de travail


Servanne LECOLLINET
Jean-Marc ONNO


Grégory VRIGNAUD


Yvan HURVOIS


Philippe GOETGHEBEUR


Olivier GODINOT


DÉCHETS | ÉNERGIE | EAU
Muriel FLORIAT


Jonathan MARKS-PERREAU


Mariana MOREIRA
Charlotte QUENARD


Emeline TIGNON


Romain GIRAULT


Florent LEVAVASSEUR
Aurélia Michaud

Synthèse exécutive

Il existe aujourd'hui un grand nombre d'interrogations sur la méthanisation et ses externalités environnementales, notamment à propos de la valorisation du digestat de méthanisation et son impact sur la qualité de l'eau. En effet la méthanisation peut induire des modifications de systèmes de cultures (rotation, itinéraires techniques, stratégie de fertilisation) dont les impacts sur la qualité de l'eau peuvent être négatifs ou positifs selon les systèmes existants avant la mise en place de la méthanisation, le contexte pédoclimatique et les pratiques associées aux nouveaux systèmes de cultures.

Par le biais d'une large revue de littérature complétée de plusieurs entretiens, une note de synthèse des connaissances scientifiques actuelles a été rédigée. Elle concerne les conditions « normales » de fonctionnement des unités de méthanisation et ne couvre pas les erreurs ou accidents, et leurs conséquences éventuelles.

S'appuyant sur les contributions de multiples acteurs de référence (cf membres du GT « digestat et qualité de l'eau »), ce travail inédit introduit une vision globale et argumentée de la problématique, distinguant les éléments faisant consensus de ceux faisant toujours l'objet de débats.

Les principaux points de consensus scientifique sont :

- À pratique d'épandage similaire et à quantité d'azote efficace identique, les digestats présentent globalement un risque de lixiviation similaire aux PRO classiques.
- Les risques de lixiviation sont surtout influencés par les pratiques agricoles ;
- L'introduction d'une unité de méthanisation est susceptible de modifier les pratiques d'épandage dans la zone concernée ;
- Il est admis que la couverture du sol en hiver est efficace pour limiter la lixiviation de l'azote.
- En France, la méthanisation peut favoriser l'introduction de CIVE contribuant ainsi à diversifier les assolements dans les exploitations agricoles.

En parallèle, les principaux points de débat portent sur :

- L'épandage du digestat (éventuellement couplé avec un couvert d'inter-culture) permet-il de diminuer le salissement des parcelles ?
- Quelle est l'évolution du solde azoté global dans le cas des unités de méthanisation avec une forte proportion de CIVE ?
- Une CIVE est-elle aussi efficace qu'une CIPAN pour limiter la lixiviation de l'azote en inter-culture ?

Le groupe de travail souligne finalement l'importance de poursuivre les travaux sur le lien entre méthanisation et qualité de l'eau, notamment sur deux thématiques particulièrement peu documentées à l'heure actuelle et par conséquent non abordées dans le présent document :

- Caractériser les changements de pratiques agricoles constatés à l'échelle des systèmes (avant et après méthanisation), et évaluer par modélisation l'impact de ces changements sur la qualité de l'eau ;
- Étudier l'influence des effets « induits » par le développement de la filière méthanisation (et notamment la question du changement d'affectation des sols).

Introduction

La méthanisation est un processus permettant de produire du biogaz (mélange de CO₂ et de CH₄) par fermentation anaérobie de substrats fermentescibles. En France, les méthaniseurs fonctionnent avec une majorité d'intrants d'origine agricole (effluents d'élevages, cultures intermédiaires, résidus de cultures, cultures énergétiques, etc...). Le biogaz est ensuite valorisé ; soit par une génératrice qui brûle le biogaz pour produire en parallèle de l'électricité qui sera injectée sur le réseau et de la chaleur qui aura vocation à être valorisée directement ; soit par injection directe du CH₄ (méthane) dans le réseau de gaz après avoir retiré le CO₂ du biogaz.

En plus de l'énergie valorisée, le processus de méthanisation produit également du digestat, qui correspond à la matière digérée après méthanisation. Ce digestat est considéré comme un Produit Résiduaire Organique (PRO), au même titre que le fumier ou le lisier, et peut être valorisé d'un point de vue agronomique par épandage. Il permet d'apporter à la fois un amendement et un fertilisant, et il est en ce sens partiellement substituable aux engrais minéraux de synthèse et autres amendements. Cette note de synthèse concerne les digestats « agricoles »

Avant d'être épandu, il peut subir une séparation de phase, qui consiste à séparer mécaniquement la phase liquide de la phase solide du digestat. Ainsi lorsqu'on parle de digestat, il peut s'agir d'un digestat « brut », ou de la fraction liquide ou solide issue de la séparation de phase. La séparation de phase permet de concentrer l'azote minéral dans la phase liquide, alors que les autres éléments minéraux (P en particulier) et la matière organique stable se retrouvent dans la phase solide (surtout dans le cas de l'utilisation d'un outil de séparation de phase efficace de type centrifugeuse). Le digestat solide s'apparente alors à un amendement organique permettant d'entretenir la fertilité du sol alors que le digestat liquide s'apparente à un fertilisant azoté permettant l'alimentation des végétaux à court terme.

Les substrats entrant dans l'unité de méthanisation ont également une influence sur les propriétés agronomiques du digestat. Le programme Concept-Dig (Jimenez et al., 2019) a étudié l'influence des substrats d'origine agricole sur la composition des digestats. Les substrats de type fumier bovin donnent un digestat riche en matière organique et donc favorisent l'effet amendant alors que les lisiers porcins donnent un digestat plus riche en azote et favorisent l'effet fertilisant. Les co-substrats pouvant être associés ont également un impact : les graisses et déchets d'industrie agro-alimentaires enrichissent le digestat en N, P et K alors que les végétaux, résidus de culture ou autres déchets verts enrichissent le digestat en matière organique stable, augmentant le ratio C/N et la teneur en matière sèche.

	MS	pH	MO (%MB)	Ntot (g/kgMB)	N-NH ₄ (g/kgMB)	NH ₄ /N (%Ntot)	P ₂ O ₅ (g/kgMB)	K ₂ O (g/kgMB)
Digestat brut	3,4% 9,7%	7,4 8,6	2% 7%	3,3 8,2	1,5 6,1	36% 79%	1,7 3,7	2,1 4,2
Fraction liquide	1,2% 7,6%	7,2 8,4	0,6% 4,8%	3,9 6,2	2,7 5,7	35% 87%	1,5 4,2	1,5 4,2
Fraction Solide <i>Presse à vis</i>	24,9% 30,2%	8,3 9,6	16,5% 21,2%	5 7	1,3 3,2	27% 46%	2,5 8	3,3 7,1
Fraction solide <i>Centrifugeuse</i>				5 14	0,6 4	4% 41%	11 16	2,2 8,1

Tableau 1 : Valeurs hautes et basses des paramètres agronomiques des digestats issus d'effluents agricoles en mélange avec des végétaux et/ou des déchets organiques. Source : VALDIPRO [2012-2015]

La réglementation pour les installations classées en déclaration ou en enregistrement (arrêtés du 10/11/09 et du 128/08/10 relatifs aux prescriptions générales applicables aux installations classées de méthanisation soumises à déclaration et à enregistrement sous la rubrique n° 2781-1) oblige une analyse de digestat avant les épandages. Ces analyses doivent inclure obligatoirement un volet agronomique (MS, pH, MO, N, N-NH₄⁺, C/N, P, K, Ca et Mg) et peuvent inclure un volet sanitaire pour les unités en autorisation ou pour les unités traitant des déchets non agricoles (ETM et CTO ne dépassant pas les seuils fixés par l'arrêté du 8 janvier 1998 et du 2 février 1998 modifié). Dans tous les cas la réglementation européenne n° 142/2011 impose des analyses bactériologiques prouvant l'absence de Salmonelle dans 25 grammes de digestat et des quantités de E.Coli ou d'entérocoques < 1000 UFC/g.

Il existe aujourd'hui un grand nombre d'interrogations sur la méthanisation et ses externalités environnementales, notamment à propos de la valorisation du digestat de méthanisation et son impact sur la qualité de l'eau. En effet la méthanisation peut induire des modifications de systèmes de cultures (rotation, itinéraires techniques, stratégie de fertilisation) dont les impacts sur la qualité de l'eau peuvent être négatifs ou positifs selon les systèmes existants avant la mise en place de la méthanisation, le contexte pédoclimatique et les pratiques associées aux nouveaux systèmes de cultures. Les impacts quantitatifs sur l'eau (irrigation) sont également à étudier avant de modifier significativement un système de cultures.

Cette note de synthèse vise à faire un état de l'art de l'influence de l'épandage des digestats sur la qualité de l'eau, essentiellement au regard de la pollution diffuse liée à la concentration en nitrates, aussi bien les possibles impacts positifs que négatifs. Les résultats issus des travaux scientifiques ne sont pas nécessairement le reflet des pratiques de terrain. Le retour au sol de tout digestat doit ainsi faire l'objet d'un plan de fertilisation adapté et précis avec des suivis fins et rigoureux.

Même si le sujet est encore peu caractérisé d'un point de vue scientifique, cette note compile les principales conclusions d'études et de programmes qui ont été menés en France et à l'étranger. Elle a été rédigée en quatre thèmes principaux, avec dans chaque thème des affirmations qui aujourd'hui représentent un consensus scientifique ou alors font actuellement débat. Les points de débat regroupent à la fois des non-consensus scientifiques et les affirmations non assez documentées dans la littérature scientifique pour aboutir à un consensus. Pour chaque thème le lecteur est invité à lire à la fois les aspects qui font consensus et les parties débat pour avoir une vision complète du sujet.

Partie 1 : Synthèse sur la pollution azotée

L'azote (N) est un élément nutritif essentiel à la croissance des cultures. Les plantes s'alimentent majoritairement à partir de l'azote du sol. L'azote peut être présent dans le sol sous forme organique, sa forme majoritaire (résidus végétaux plus ou moins décomposés, animaux vivants ou en décomposition, , micro-organismes etc.) ou sous forme minérale (nitrate NO_3^- , ammonium NH_4^+ , ammoniac NH_3 , urée $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$). L'activité biologique du sol transforme l'azote d'une forme à une autre.

Ces formes de l'azote sont reliées entre elles dans ce qu'on appelle «le cycle de l'azote».

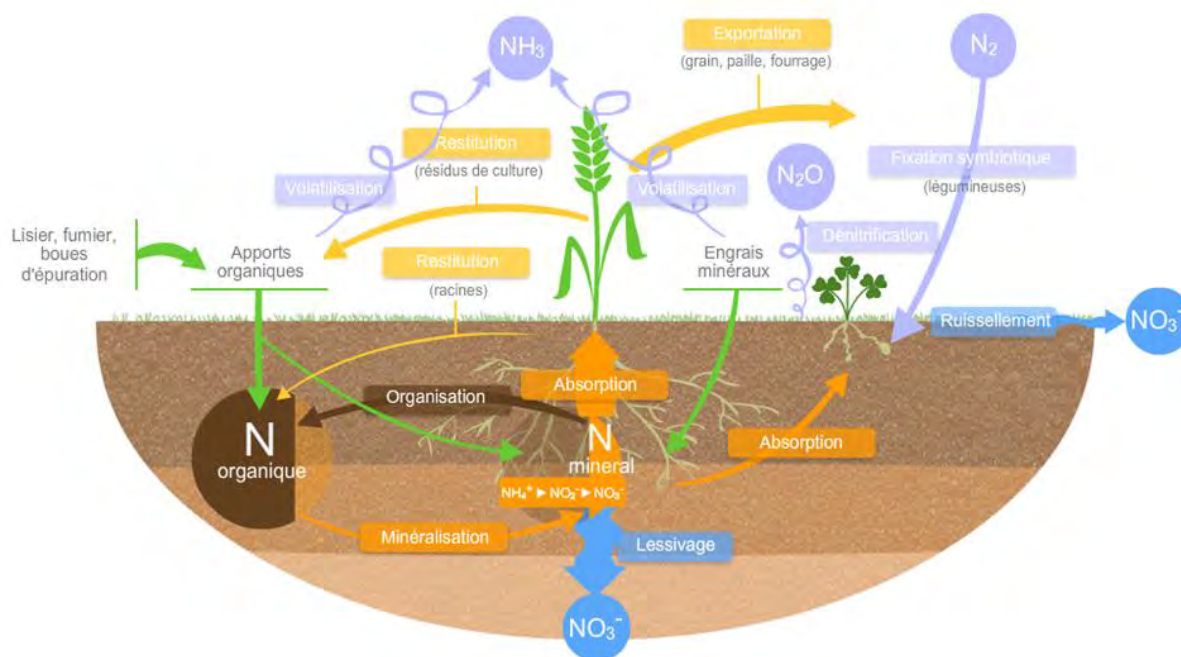


Schéma : Flux d'azote au sein d'une parcelle agricole : le cycle de l'azote
Source : Programme-nitrate.gouv.fr

NB : Le schéma a été amendé (ajout du terme *lixiviation*) par le GT Digestat et qualité de l'eau : le terme *lixiviation* est utilisé pour les substances dissoutes et le terme de *lessivage* pour les substances solides.

À l'échelle de la parcelle agricole, l'azote contenu dans les cultures est pour partie exporté en dehors du champ sous forme de produits végétaux récoltés ou via les animaux (du fait du pâturage) pour être vendu, recyclé ou transformé et pour partie retourné au sol par les résidus de cultures.

Des pertes peuvent également avoir lieu vers l'air et vers l'eau, notamment par les phénomènes de lixiviation, ruissellement et volatilisation. Certaines situations peuvent entraîner des transferts de pollution d'où la nécessité d'évaluer les risques sur les différents compartiments (eau, air).

THEME 1 : Impact du type de Produit Résiduaire Organique (PRO) sur la lixiviation de l'azote

Consensus

À pratique d'épandage similaire et à quantité d'azote efficace identique, les digestats présentent globalement un risque de lixiviation similaire aux PRO classiques

Plusieurs études visant à comparer les risques de lixiviation de l'azote et la lixiviation des NO_3^- , entre digestats, effluents d'élevage et fertilisants minéraux ont été menées :

- Pötsch (2005) conclut dans une étude qu'il n'observe pas de différence significative sur la concentration des nitrates mesurée dans les lixiviats, entre l'utilisation de digestats et de lisiers sous prairie permanente fauchée.
- Les essais aux champs de Möller et Stinner (2009) ne révèlent aucune différence sur les mesures de reliquats azotés d'automne, en utilisant des effluents d'écuries digérés ou non.
- Svoboda et al. (2013) ont simulé les flux d'azote lessivé à partir de mesures d'azote sur des lixiviats récupérés lors d'un essai aux champs de deux années. La fertilisation a été effectuée soit par du lisier (bovin et porcin), par du digestat ou par de l'engrais minéral. Ils concluent par leur étude qu'il n'y a pas de différence significative sur la lixiviation des NO_3^- entre les lisiers de porcs, les lisiers bovins et les digestats.
- Sur le site expérimental de la plateforme EFELE (ADEME, 2016), il n'a été observé aucune différence significative sur les reliquats d'azote minéral de début d'automne entre tous les traitements, sur aucune des années entre 2012 et 2016.
- Une étude menée par Nicholson et al. (2017) a mesuré la lixiviation des nitrates associée à l'utilisation d'un compost, d'un digestat de déchets alimentaires, d'un lisier et d'un fumier. Alors que ces mesures ont montré que la lixiviation des nitrates en sortie d'hiver était similaire entre le digestat et le lisier de porcs, elles ont également mis en évidence une lixiviation plus élevée dans le cas du digestat que pour le fumier de porcs ou un compost.
- Les simulations STICS du programme MéthaPolSol (Girault et al., 2019) n'ont pas montré de différences significatives sur les risques de lixiviation des nitrates entre les différents PRO utilisés et le digestat (sous réserve que les pratiques d'épandage des deux PRO soient optimisées).

En conclusion, même si les résultats peuvent être parfois sensiblement différents, on peut noter que globalement peu de différences sont observées sur les risques de lixiviation des nitrates entre différents effluents d'élevage, qu'ils soient digérés ou non. Il est sans doute nécessaire de distinguer les différentes formes de digestat : les digestats bruts ou liquides ont des comportements proches des lisiers, la fraction solide des digestats proche d'un fumier ou d'un compost.

Dans le programme ANR-10-BIOE-007 DIVA, des équipes d'INRAE (ex IRSTEA) ont étudié la structure des digestats bruts par l'intermédiaire d'une caractérisation rhéologique. Bien qu'un lien grossier puisse être établi entre la présence ou non d'un seuil d'écoulement et les préconisations pour l'épandage des digestats, l'aptitude à l'épandage ne peut être établie à partir des seules mesures rhéologiques. La notion d'épandabilité inclut non seulement le comportement mécanique des produits, mais aussi la machine d'épandage utilisée, ses réglages, la dose demandée ou encore les propriétés agronomiques des produits. Cette problématique est la même que celle rencontrée avec les produits organiques en général et les effluents d'élevage en particulier souvent encore plus concentrés en azote que les digestats. Il convient par conséquent de relativiser l'enjeu lié à la répartition des digestats liquides ou solides. Si l'on souhaite poursuivre dans ce sens, il faudra donc réaliser des essais d'épandage. Une telle démarche est très lourde expérimentalement, mais pourrait s'accompagner d'une étude d'impacts environnementaux en lien avec la répartition au sol ou encore avec les dégagements gazeux émis lors de l'épandage.

Dans le digestat brut ou liquide l'azote est présent majoritairement sous forme ammoniacale, plus rapidement assimilable que l'azote organique par les plantes ce qui facilite le pilotage de la fertilisation sous réserve de conditions d'épandage adaptées en sortie d'hiver. Il est donc plus facile de faire correspondre les doses et périodes d'apport en fonction des capacités d'absorption de la culture dans le cas où les effluents méthanisés présentaient une faible disponibilité de l'azote (fumiers par exemple), ce qui peut permettre de réduire le reliquat d'azote minéral du sol au début du drainage.

La fertilisation par des PRO est efficace et n'entraîne pas de baisse de rendement par rapport à une fertilisation minérale à quantité d'azote efficace identique.

La plateforme EFELE est intégrée au Système d'Observation et d'Expérimentation pour la Recherche en Environnement sur les Produits Résiduaux Organiques (SOERE PRO). Il s'agit d'un site expérimental consacré à l'étude sur le long terme des PRO sur l'environnement. Le rapport d'activité 2012-2016 de la plateforme EFELE (ADEME, 2016) conclut que la substitution des engrais minéraux par des PRO, dont un digestat, n'entraîne pas de baisse des rendements. En effet aucune différence significative sur les rendements des 3 cultures de maïs et des 2 cultures de blé n'apparaît entre les différents traitements sur aucune des années. Les doses d'azote apportées ont été raisonnées sur la base du 1^{er} élément limitant, le phosphore pour les PRO solides (fumier de volaille, compost porcin, fumier bovin) puis complémentés avec de l'azote minéral. Les apports en PRO liquides (digestat de lisier porcin, et lisier porcin) ont été raisonnés sur la base d'un coefficient équivalent engrais. Le rapport entre la dose d'engrais apporté sur ce coefficient d'équivalence engrais donne la dose d'azote minéral à apporter avec le produit. La quantité de produit apporté est ensuite déterminée par la teneur en azote minéral du produit. Une étude réalisée par RITMO pour le compte de l'ADEME (2011) s'est accompagnée d'essais aux champs qui ont montré que les digestats agricoles permettent l'augmentation des rendements de 6 à 20% par rapport aux effluents non digérés.

Les récents résultats du programme Métaméthas (Savoie et al., 2018) montrent qu'une fertilisation à base de digestat liquide et solide ou de digestat brut n'entraîne pas de baisse de rendement à quantité d'azote minéral efficace équivalente. Cependant, les teneurs en protéines du blé sont inférieures à l'exigence de la filière, quel que soit le mode de fertilisation. Une fertilisation mixte (PRO + azote minéral) est conseillée, et est déjà majoritairement mise en place par les agriculteurs. Celle-ci nécessite un réel pilotage pour éviter les surdosages en azote.

Au niveau international, certaines études ont mis en avant qu'une substitution des engrais minéraux par des digestats entraînait une baisse des rendements sur céréale, et

des rendements équivalents sur prairie (Berendonk, 2011). Toutefois plusieurs études rapportent qu'à dose équivalente d'azote, les rendements obtenus en épandant du digestat sont similaires aux rendements obtenus en utilisant des engrais minéraux (Odlare et al., 2011; Ortenblad, 2000; Riva et al., 2016) ou des lisiers de porcs (Chantigny et al., 2008 ; Gagnon et al., 2012 ; Loria et al., 2007) à condition que le digestat soit enfoui, limitant les pertes d'azote (Riva et al., 2016). L'enfouissement nécessite un équipement spécifique (pendillard, ...) dont l'acquisition doit être anticipée lors du développement des projets.

Concernant le coefficient d'équivalent engrais (CEE ou Keq), les résultats divergent car la valeur fertilisante du digestat dépend de la qualité des substrats, du procédé de méthanisation et des possibles pertes par volatilisation. Si des études affirment qu'il est sensiblement supérieur pour un lisier de porc digéré (Birkmose, 2009), d'autres affirment que dans le cas du blé ce coefficient est inférieur avec du digestat par rapport aux lisiers de porcs, mais supérieur dans le cas du maïs ensilage (chambre d'agriculture du Niedersachsen, 2010). En conclusion pour une grande partie des auteurs, la valeur fertilisante azotée d'un digestat équivaut à celle d'un lisier de porcs, avec un Keq variant de 40 à 70% suivant le substrat entrant. On trouve également des essais avec un gain de 20% du Keq, notamment lorsqu'il y a enfouissement immédiat du digestat (CRAB, 2011). Les Keq mesurés lors du programme MétaMétha (Savoie et al., 2018) font état d'une certaine disparité : ils sont compris entre 35% et 66% pour la fertilisation avec des digestats liquides et solides, de 35% à 45% pour le digestat brut et de 21% à 94% pour la fertilisation avec du lisier et du fumier. Ces disparités sont expliquées en grande partie par la volatilisation de l'azote qui est inférieure dans le cas du lisier que des digestats : en effet l'année où un Keq de 94% a été mesuré sur du lisier est celle où la volatilisation a été moindre.

Comme expliqué précédemment tous les digestats ne sont pas identiques et donc ne réagissent pas de la même manière ; le programme Concept-Dig propose des classes de digestats selon leur rapport C/N et leur concentration en NH_4^+ notamment. Le COMIFER travaille à l'actualisation des valeurs de Keq selon les différentes familles de digestat (publication attendue fin 2020).

Débat

Les digestats diminuent-ils les risques de lixiviation par rapport à la fertilisation minérale ?

Les études comparant les risques de lessivage d'azote entre une fertilisation minérale et une fertilisation organique, par du digestat notamment, ne font pas l'unanimité et les résultats peuvent varier. De plus, certaines études ont comparé l'effet d'une fertilisation minérale et organique à dose d'azote total équivalente alors que d'autres ont comparé ces deux modes de fertilisation à cible de rendement équivalente.

Les études comparant une fertilisation minérale et organique à dose d'azote total équivalente :

- Si les simulations issues d'essais aux champs effectuées par Svoboda et al. (2013) n'ont montré aucune différence significative sur la lixiviation des NO_3^- entre les différents PRO, elle a cependant mis en évidence que la quantité de nitrates lixiviés a été inférieure avec l'ensemble des PRO (digestat compris) qu'avec l'utilisation d'un fertilisant minéral à dose équivalente en azote total sur maïs.
- Une étude expérimentale de trois ans a été conduite dans le cadre du projet PERSEPHONE (Tsachidou et al., 2019). L'objectif de cette étude a été de

comparer les risques de lessivage de l'azote associés à l'utilisation de fertilisants minéraux, des différentes fractions d'un digestat, et de l'association d'un digestat brut avec du fertilisant minéral. Un témoin non fertilisé a également été mis en place. La quantité d'azote minéral a été mesurée dans le sol en février avant fertilisation et en octobre après la dernière fauche. Les résultats montrent que, à dose équivalente en azote total, l'accumulation des nitrates dans le sol est plus élevée dans le cas de l'utilisation de fertilisants minéraux que dans le cas des digestats. Aucune différence significative n'a été observée sur les rendements d'une même année entre les différents modes de fertilisation. Toutefois, ces résultats ne prennent pas en compte l'azote efficace épandu et une comparaison à dose équivalente en azote efficace serait judicieuse.

Les études comparant une fertilisation minérale et organique à objectif de rendement équivalent :

- Les mesures effectuées sur la plateforme EFELE n'ont enregistré aucune différence significative entre la fertilisation par épandage de digestat issu de lisier porcin et la fertilisation exclusivement minérale.
- Les simulations STICS du programme MéthaPolSol (Girault et al., 2019) ont permis de montrer que le remplacement d'une fertilisation minérale par une fertilisation organique à base de digestats, à cibles de rendement identiques, a pour effet d'augmenter le flux de minéralisation d'azote du sol et donc les risques de lixiviation des nitrates. Ces effets sont liés à (i) l'augmentation de la teneur en matière organique du sol (effet à long terme) et (ii) à une quantité d'azote apportée plus importante dans le cas d'une fertilisation organique. (Cependant, ces effets peuvent être contrebalancés par une couverture plus permanente des sols via l'insertion de cultures intermédiaires d'hiver et d'été.)

THEME 2 : Influence des pratiques d'épandage

Consensus

Les risques de lixiviation sont surtout influencés par les pratiques agricoles.

Les auteurs s'accordent à dire que l'ensemble des pratiques agricoles sur une exploitation sont davantage déterminantes que la nature du PRO utilisé sur la qualité de l'eau. En ce sens, l'impact de la méthanisation sur l'environnement et sur la fertilité d'un sol est essentiellement dû aux différents changements que peut provoquer l'insertion de l'activité de méthanisation sur les exploitations agricoles (Möller, 2015). Il en est de même pour l'impact du digestat sur le taux de matière organique dans le sol : « l'évolution de la matière organique du sol est dépendante essentiellement des modifications de pratiques culturales, et très peu liée au fait que les matières épandues soient digérées ou non » (Couturier et al., 2019).

Des mauvaises pratiques de fertilisation avec ou sans digestat ont des impacts négatifs sur la qualité de l'eau. A contrario l'application de bonnes pratiques (dose adaptée, période d'épandage appropriée, bonnes conditions météo, matériel d'épandage performant) a un impact positif sur la qualité de l'eau. Un guide de bonnes pratiques à l'épandage des digestats est en cours de réalisation par AgroParisTech. Le projet Ferti-Dig (projet GRAINE – ADEME, porté par l'INRAE-LBE et la CRAB) vise également à rédiger un

guide « Comment fertiliser avec des digestats d'origine agricole » qui va intégrer les caractérisations agronomiques des digestats et proposer des conseils d'apport pour maximiser leur valorisation agronomique et éviter d'éventuels impacts négatifs sur la fertilité du sol et l'environnement.

L'enfouissement du digestat directement après épandage est primordial pour limiter la volatilisation et par conséquent renforcer son efficacité.

La volatilisation est le transfert dans l'atmosphère du NH_3 présent à l'interface produit/sol (Sommer et al. 2001) et se fait selon un gradient de concentration, de la plus forte vers la plus faible (Genermont et al. 1997; Sommer et al. 2003). Dans des cas très particuliers, on a pu observer des transferts de pollution importants : par exemple, la réduction des émissions d'ammoniac par le travail du sol peut être à l'origine d'une lixiviation de nitrates (augmentation des capacités d'infiltration) ou d'une érosion du sol plus conséquente (déstructuration des sols). La mise en œuvre d'une mesure de réduction des émissions d'ammoniac doit, dans la mesure du possible, prendre en compte ces transferts potentiels d'impacts. (cf annexe 1).

La forte proportion d'azote minéral et le pH élevé du digestat font que les digestats sont très sensibles à la volatilisation. Les études montrent généralement que la volatilisation ammoniacale est supérieure lors de l'épandage de digestat par rapport à l'épandage d'effluents non digérés (Möller & Stinner, 2009; Nicholson et al., 2017; Reibel & Leclerc, 2018). Afin de limiter ces pertes par volatilisation, il convient d'enfouir très rapidement le digestat épandu. Des études ont montré que dans des mêmes conditions climatiques (12°C, vent 12 à 17 km/h), 30% de l'azote ammoniacal épandu est volatilisé si l'on enfouit le digestat immédiatement, contre 90% si on l'enfouit 48h après épandages (Claire & Cécile, 2018). En limitant au maximum la volatilisation, on augmente l'efficacité fertilisante du digestat.

Le programme MétaMétha (Savoie et al., 2018) confirme ces tendances : les plus fortes pertes par volatilisation ont été observées avec du digestat brut, puis avec des digestats liquide et solide, puis avec du lisier/fumier et enfin la moindre volatilisation a été observée avec l'azote minéral (Solution N 390 à 30% de N). La différence entre le digestat brut et liquide s'explique par une infiltration plus efficace du digestat liquide dans le sol.

L'introduction d'une unité de méthanisation est susceptible de modifier les pratiques d'épandage dans la zone concernée.

La gestion d'un seul type de PRO permet l'utilisation de matériel d'épandage plus performant pour l'ensemble des agriculteurs impliqués dans le projet de méthanisation. Les agriculteurs peuvent se tourner vers des CUMA afin de mutualiser du matériel adapté à l'épandage. On observe parfois la création de CUMA directement en lien avec une unité de méthanisation collective.

À titre d'exemple, sur les 31 exploitations ayant répondu à une enquête dans le cadre du programme MéthaLAE, 25 ont changé leurs matériels d'épandage ou la gestion des travaux d'épandage (utilisation de pendillards plutôt que buses palettes, délégation des travaux, etc...).

Suite à un post traitement du digestat brut par séparation de phase on obtient deux produits avec des utilisations agronomiques distinctes (Dabert, *et al.*, 2015) :

- le digestat liquide : il contient la presque totalité de l'azote (dont la part ammoniacale) et du potassium. C'est un produit intéressant pour la fertilisation azotée des cultures, mais du fait d'une grande part d'azote

ammoniacal, son épandage demande de la rigueur pour limiter au maximum les pertes d'azote par volatilisation (enfouissement, bonne pratique d'épandage ...).

- le digestat solide : contenant le phosphore, la matière organique et les éléments trace métalliques. Ce produit est plutôt utilisé comme amendement.

Sur certains bassins versants, la principale pollution est le phosphore. La mise en place de méthanisation collective peut être une solution pour gérer le phosphore à l'échelle de plusieurs exploitations (dilution des effluents plus chargés en phosphore (ex : volaille) et plan d'épandage plus important). Dans les cas d'excédent structurel à l'échelle d'un territoire, l'export de phosphore est possible via l'export du digestat solide. Ce fut le cas pour une unité de méthanisation collective dans le programme MethaLAE, qui a pu gérer de manière mutualisée l'export du phosphore excédentaire.

La mutualisation des plans d'épandage peut diminuer le nombre de parcelles isolées et améliorer la répartition des PRO sur le territoire.

L'étude MéthaLAE a mis en évidence que la méthanisation entraîne une meilleure répartition des apports organiques sur l'ensemble de la SAU. En effet la surface amendée en PRO (SAMO) a augmenté pour 40 des 46 exploitations enquêtées. L'augmentation moyenne de la SAMO est de 80% sur l'ensemble des exploitations. Le rapport SAMO/SAU, qui traduit la répartition spatiale des épandages de MO est passé de 50% à 65%. Cette augmentation de la SAMO provient de plusieurs opportunités d'épandage :

- Sur les cultures en place (principalement céréales en sortie d'hiver) lié au changement du type de PRO et à la mutualisation de matériel d'épandage plus performant (pendillards).
- Sur les nouvelles cultures intégrées dans la rotation suite à la mise en place d'une unité de méthanisation (par exemple : les CIVE).
- Grâce également à l'optimisation des apports via l'augmentation des plages d'épandages (réduction des surdosages liés à des fenêtres réduites, diminution des doses de digestat par hectare ce qui permet de couvrir une plus grande surface d'épandage).

Par voie de conséquence, cette augmentation de la SAMO participe à une meilleure répartition de la matière organique et peut améliorer le taux de MO du sol pour des parcelles ne recevant habituellement pas d'effluents. Cette augmentation de la MO améliore la structure et la capacité de rétention en eau des sols (Solagro, 2018; Tignon, 2018).

La connaissance des caractéristiques du digestat, la possibilité de séparer les phases, une capacité de stockage suffisante et l'usage de matériel adapté peuvent permettre d'améliorer la gestion des épandages.

La connaissance précise des caractéristiques du digestat en lien avec la possibilité de séparer les phases peut conduire à une meilleure gestion des épandages, au plus près des besoins. Il est donc important de connaître ces besoins afin de ne pas surfertiliser ce qui augmenterait considérablement les risques de lixiviation (ce qui est vrai pour tout type de fertilisant). Afin que les bonnes pratiques soient respectées il faut également épandre avec du matériel adapté (pendillard ou enfouisseur) et disposer d'un stockage couvert de

digestat avec une capacité de stockage suffisante pour épandre aux périodes les plus appropriées. La réglementation de l'arrêté du 10/11/09 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées de méthanisation soumises à déclaration ou enregistrement sous la rubrique n° 2781-1 indique la nécessité de disposer d'une capacité suffisante pour permettre le stockage de la quantité de digestat (fraction solide et fraction liquide) produit pendant au moins quatre mois ou pendant une période correspondant à la plus longue période pendant laquelle son évacuation ou son traitement n'est pas possible. À titre d'exemple, une enquête au sein de l'Association des Agriculteurs Méthaniseurs de France (AAMF) a révélé que sur 43 réponses, 16% des agriculteurs disposent de 4 à 6 mois de stockage, 24% de 6 à 8 mois, et le reste (60%) ont des capacités de stockage supérieures à 8 mois.

Le digestat, partiellement désodorisé, peut être épandu sur des surfaces qui ne pourraient recevoir des lisiers.

La dégradation des matières organiques labiles rend le digestat moins odorant qu'un effluent brut. En effet des études ont montré une diminution jusqu'à 80% des émissions odorantes à l'épandage entre des effluents non digérés (lisier) et un digestat. (Riva et al., 2016). L'injection permet de réduire les émissions odorantes de plus de 50% par rapport à l'épandage en surface (Orzi et al., 2018).

Les distances réglementaires à respecter vis-à-vis des tiers restent les mêmes que pour des lisiers mais dans la pratique les utilisateurs de digestat sont plus à l'aise pour épandre à proximité des habitations car ils génèrent moins de plaintes pour nuisances olfactives. Cela revient à augmenter la SAMO de certaines exploitations, permettant de réduire les risques de surfertilisation organique liés aux contraintes d'épandage. Ce cas de figure n'est pas systématique et dépend fortement des contraintes du territoire.

THEME 3 : Evolution du bilan azoté

Consensus

La substitution des engrais minéraux azotés par des digestats est possible dès lors que la valeur fertilisante de ces derniers est connue et que les bonnes pratiques d'épandage sont respectées

Le programme MéthaLAE a montré que sur l'ensemble des exploitations suivies (46 exploitations), l'utilisation d'engrais minéraux azotés a diminué de 20% en moyenne (63,2 kg/ha après méthanisation contre 79.8 kg/ha avant). Dans le détail, 14 exploitations ont fait l'objet d'une forte baisse (>30kg/ha), 11 exploitations ont fait l'objet d'une baisse légère (entre 0 et 30kg/ha) et 15 exploitations ont fait l'objet d'une hausse comprise entre 0 et 30 kg/ha.

Dans le cadre des opérations territoriales de reconquête de la qualité de l'eau en Bretagne, l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, l'État, le conseil régional et les conseils départementaux accompagnent l'évolution des pratiques agricoles pour une plus forte intégration des enjeux environnementaux (nitrates, pesticides, algues vertes, eutrophisation...). À ce titre, le service régional de l'information statistique et économique de la direction régionale de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt de Bretagne a été sollicité par ces acteurs pour réaliser en 2019 une enquête statistique auprès de 4 140 agriculteurs, en concertation avec la profession agricole. Cette enquête a permis d'établir un état des lieux de leurs pratiques de fertilisation et d'utilisation de produits phytosanitaires (pour la Bretagne, par département et par bassin versant) et de les comparer aux résultats de l'enquête précédente de 2011 sur cette même thématique. Une nouveauté depuis 2011, la fertilisation avec du digestat de méthaniseur a été incluse. Les

utilisateurs de digestat ont décrit les apports de digestats culture par culture. Une analyse statistique de la fertilisation par type de culture a permis de comparer les apports d'azote minéral chimique chez les utilisateurs de digestat (agriculteurs méthaniseurs et receveurs de digestat). La réduction d'azote minéral est en moyenne sur l'ensemble des surfaces de 40 kg par ha sur blé (-28%), de 34 kg (-29%) sur orge, de 19 kg (-58%) sur maïs ensilage et de 17 kg (-50%) sur maïs grain.

Amélioration du solde azoté global liée à une valorisation plus rationnelle de l'azote minéral des digestats elle-même liée à la faible proportion d'azote organique dans ledit digestat

Le solde azoté global, qui est calculé par la différence entre les entrées d'azote minéral ou organique (directes ou indirectes) et les sorties (exportation, volatilisation), a diminué de 8kg/ha (soit 11%) en moyenne sur l'ensemble des exploitations suivies dans l'étude MéthaLAE. Ce solde azoté global représente donc à la fois l'azote stocké dans le sol ou perdu par ruissellement/lixiviation (Laboubee, 2018). Les exploitations suivies dans MéthaLAE sont principalement des élevages et les céréaliers sont peu représentés (4 céréaliers sur les 46 exploitations au total).

Les résultats de MétaMétha (Savoie et al., 2018) sur les bilans d'azote à l'échelle de la rotation montrent que les systèmes avec digestats (liquide + solide ou brut) sont sensiblement équivalents. Ils sont caractérisés par de gros apports d'azote minéral, avec des risques d'efflux importants (volatilisation, lixiviation...). Le système avec une fertilisation minérale se caractérise par une immobilisation nette importante de l'azote, alors que le système avec digestat solide + liquide ou lisier + fumier se caractérisent par un apport net d'azote lié à la minéralisation des PRO à long terme. La séparation de phase permet de mieux répartir les flux d'azote minéral et organique, de limiter la volatilisation et donc d'obtenir une consommation d'azote par les végétaux qui sera plus importante. A terme ce programme vise à évaluer les différents systèmes de gestion des digestats pour évaluer les pratiques utilisées par les agriculteurs méthaniseurs aujourd'hui.

La faible proportion d'azote organique des digestats permet un meilleur pilotage de la fertilisation notamment des maïs ensilage. A titre d'exemple, avant la méthanisation, la pratique de fertilisation de maïs est de 30 à 40 T de fumiers de bovin associées à 40 à 60 UN d'urée pour sécuriser l'apport d'azote par les fumiers (variable selon leur minéralisation et des conditions météo) et limiter les faims d'azote⁸. Après méthanisation de ces fumiers, la fertilisation va pouvoir se faire uniquement sur des bases de digestats. C'est le cas par exemple pour une unité collective de l'ouest qui regroupe une trentaine d'éleveurs bovins qui dorénavant fertilisent uniquement avec du digestat liquide entre 25 et 30 m3/ha sans complément d'engrais minéral. Cette pratique peut réduire les quantités d'azote minéralisées pendant la période de drainage et diminuer le risque de pertes d'azote par lixiviation mais ne saurait être généralisable sur l'ensemble des unités de méthanisation.

Débat

Quelle est l'évolution du solde azoté global dans le cas des unités de méthanisation avec une forte proportion de CIVE ?

Peu d'études ont regardé le solde azoté global avant et après méthanisation chez des céréaliers. Le programme MéthaLAE a observé une baisse moyenne de 10kg/ha (ou 20%) suite à la mise en place de la méthanisation chez les 4 céréaliers suivis. Cependant la mise en place de CIVE sur une grande partie ou l'intégralité de la SAU et leur fertilisation pourrait représenter un poste d'intrant azoté supplémentaire et dégrader le solde azoté global. Ces aspects restent à l'heure actuelle très peu documentés.

⁸ Faim d'azote : Immobilisation de l'azote par les micro-organismes du sol, dû un apport riche en C et pauvre en N

THEME 4 : Les couverts d'inter-culture comme pièges à Nitrates

Une culture intermédiaire est une culture implantée entre la récolte d'une culture principale et le semis de la culture suivante pendant une période plus ou moins longue appelée inter-culture⁹.

De façon synthétique, on peut résumer l'évolution historique récente de la terminologie qui fait référence aux cultures intermédiaires en fonction notamment du service recherché, concomitant aux grandes préoccupations conjoncturelles de l'agriculture. Ainsi, pour simplifier, on peut repérer 3 grandes périodes dans l'agriculture récente :

- Dans les années 1970-1980, on parle surtout d'engrais vert en lien avec la structuration du sol et la fourniture d'azote.
- Dans les années 1990-2000, le terme CIPAN (Culture intermédiaire piège à nitrate) est très utilisé pour traiter de la question de la pollution nitrique (cf. Directive nitrate européenne de 1991) ; la fonction recherchée est d'abord celle de l'immobilisation du nitrate et l'amélioration de la qualité de l'eau drainée.
- Dernièrement, dans les années 2010, les cultures intermédiaires sont clairement vues comme multiservices (CIMS), faisant référence aux services d'amélioration des impacts de l'agriculture sur les trois grands compartiments sol/eau/air permettant le vivant et la biodiversité au sens large. [Eric Justes et al, 2017]

Les CIVE (cultures intermédiaires à vocation énergétique) sont des cultures intermédiaires implantées et récoltées en vue d'assurer un approvisionnement en biomasse (dont substrat d'unités de méthanisation) pour limiter le recours aux cultures principales et la concurrence avec les productions alimentaires. On parle de 3 cultures en 2 ans. Ces cultures rendent également des services écosystémiques (sol, biodiversité...). Avec les CIVE on cherche à optimiser les différents services (production d'énergie, revenu pour les agriculteurs, services écosystémiques).

Les CIVE sont fertilisées, majoritairement avec des digestats (mais parfois avec de l'engrais minéral). Des travaux sont en cours via différents projets (dont le programme RECITAL, soutenu par l'Ademe coordonné par Arvalis) pour mettre au point une méthode des bilans spécifiques aux CIVEs qui pourra être proposée à des organismes comme le COMIFER comme base de calcul. Pour les CIVEs d'hiver, un apport d'azote (40 à 80 kgN/ha) engendre systématiquement un gain de rendement. Pour les associations graminées-légumineuses, la fertilisation est toujours valorisée mais la dose apportée peut être inférieure. En CIVE d'été, les essais confirment l'intérêt d'une fertilisation (40 à 80 kgN/ha) pour toutes les espèces (source : OPTICIVE) avec la nécessité de prendre en compte les risques de stress hydrique pour une bonne valorisation de ces apports.

⁹ Dictionnaire d'agroécologie (dicoagroecologie.fr) – Définition de culture intermédiaire, consulté le 31/03/2021.

Consensus

Il est admis que la couverture du sol en hiver est efficace pour limiter la lixiviation de l'azote.

Un couvert hivernal d'inter-culture capte l'azote ce qui limite la lixiviation. Une méta analyse de 31 études américaines permet de conclure à une réduction de 70% de la lixiviation de l'azote sous les cultures intermédiaires non-légumineuses par rapport à une inter-culture de sol nu (Justes et al., 2012).

Des simulations sur seigle en inter-culture d'hiver ont été réalisées afin d'estimer les pertes d'azote par drainage (Malone et al., 2018). Les résultats concluent que la récolte du seigle, fertilisé à 120 kg N/ha minéral, diminue les pertes azotées de 54% par rapport à un sol nu, et de 18% par rapport à un seigle ni fertilisé, ni récolté. Möller et Stinner (2009) en arrivent aux mêmes conclusions dans leur étude : les reliquats azotés mesurés sont plus faibles avec la récolte de la culture intermédiaire et des résidus de cultures plutôt qu'en les laissant sur place.

Une étude autrichienne (Szerencsits, 2014) a également permis de montrer que les CIVE permettent de diminuer l'azote minéral dans le sol de 25 à 40% par rapport à un sol nu en sortie d'hiver. Heggenstaller et al. (2008) ont montré que les systèmes avec des cultures intermédiaires réduisent de 25% et 34% l'azote lessivable en automne et en sortie d'hiver respectivement par rapport à un système sans culture intermédiaire, en plus d'augmenter le rendement total en matière sèche.

Les simulations STICS effectuées dans le cadre du programme MéthaPolSol (Girault et al., 2019) ont comparé 4 scénarios de fertilisation : fertilisant minéral, Produits Résiduaires Organiques (PRO), digestat et digestat accompagné de la mise en place de Cultures Intermédiaires à Vocation Énergétique (CIVE). Ces simulations ont montré que les scénarios combinant l'insertion de CIVE d'hiver et d'été dans les rotations avec l'utilisation de digestat permettent de réduire de manière significative la lixiviation des nitrates. Ceci est principalement dû au fait que l'implantation de la CIVE d'été intervient en remplacement d'un sol nu. Ce qui réduit le risque de lessivage sur la culture d'hiver suivante (blé dans ce cas).

L'état des reliquats azotés en entrée et en sortie hiver a pu être mesuré dans la cadre du dispositif expérimental du programme OPTICIVE (Marsac et al., 2019), sous les CIVE d'hiver et en situation témoin de sol nu. Il faut rappeler que le sol nu est observé en système témoin d'une succession blé-tournesol dans les coteaux argilo-calcaire du Lauragais. Les reliquats observés à l'implantation du tournesol correspondent à la date de récolte de la CIVE, fin avril. En 2017, à l'exception du triticale, ce niveau de reliquats sous CIVE est inférieur de 50% environ à celui observé en sol nu. En 2018, année excessivement pluvieuse au printemps, les constats sont identiques avec une très forte minéralisation et une quantité d'azote sous CIVE nettement inférieure au témoin sol nu. En CIVE d'été, le même type de mesure réalisé sur Syppre® Béarn montre des reliquats à la récolte des CIVE (Octobre) de 50 à 70 kg N/ha sur 90 cm. Ces reliquats traduisent la minéralisation importante en été et début d'automne. Ces niveaux légèrement élevés restent toutefois inférieurs à la référence en système maïs mulching : 47% de la référence en 2017 et 90% en 2018.

En France, la méthanisation peut favoriser l'introduction de CIVE contribuant ainsi à diversifier les assolements dans les exploitations agricoles.

Le programme MéthaLAE a suivi l'évolution de 46 exploitations agricoles afin de comparer l'avant et l'après méthanisation. Une enquête effectuée dans le cadre de ce programme a pu mettre en évidence une augmentation des surfaces en couverts végétaux avec la méthanisation, et ce quel que soit le type d'exploitation concernée ; hormis

« élevage ovin ». Plus précisément, on observe que pour les exploitations « bovin lait » et « bovin viande », la mise en place de CIVE se fait en plus des couverts végétaux déjà présents alors que pour les « grandes cultures », les CIVE peuvent remplacer certaines CIPAN. L'ensemble des exploitations enquêtées fertilisent les CIVE avec du digestat.

De plus, ces enquêtes ont également montré que la mise en place de la méthanisation s'accompagne généralement d'un allongement et d'une diversification des rotations, notamment chez les éleveurs porcins qui avaient des rotations simples (maïs/blé) avant la mise en place de la méthanisation.

Cependant dans certaines zones de polyculture-élevage, on observe que les agriculteurs peuvent parfois privilégier les cultures méthanogènes (comme le maïs) au détriment des surfaces en prairies, ce qui pose la question de l'intensification des agrosystèmes en lien avec la méthanisation et de leur résilience vis-à-vis du changement climatique et de la ressource en eau.

En revanche dans les zones déjà en grandes cultures, la mise en place de cultures méthanogènes à bas niveau d'impact (miscanthus, silphie) peut constituer un levier pour la protection de la ressource en eau, notamment au niveau des zones de captages, à condition d'être vigilant au caractère invasif de certaines de ces espèces (ex : renouée du japon). Le miscanthus peut également être planté en Bande Ligno Cellulosique (BLC) pour maximiser son rôle dans la lutte contre l'érosion des sols tout en mobilisant peu de surface pour une culture énergétique (programme Innobioma).

Débat

Une CIVE est-elle aussi efficace qu'une CIPAN ou qu'un engrais vert pour limiter la lixiviation de l'azote en inter-culture ?

Le remplacement d'un couvert type CIPAN par un couvert type CIVE pose la question de l'intensification du système agricole et de l'augmentation des flux d'azote. Alors que la CIPAN n'est pas fertilisée et a pour vocation de piéger les nitrates, les CIVE sont souvent fertilisées et ont pour objectif une production de biomasse élevée.

La fertilisation des CIVE renforce le développement de la biomasse, et de fait l'absorption racinaire des nitrates pendant la phase de croissance. Elle est également en place plus longtemps qu'une CIPAN. L'exportation des CIVE ne génère pas de flux supplémentaires d'azote liés à la restitution des cultures et permet une meilleure maîtrise de la fertilisation azotée.

Mais les risques de lixiviation peuvent également être importants, notamment en cas de surfertilisation des CIVE. La production de CIVE peut également engendrer une réduction du cycle des cultures alimentaires et une surfertilisation s'il y a mauvaise estimation des rendements. C'est pourquoi il convient de prendre en compte le rendement attendu et la date d'implantation pour fertiliser au plus proche des besoins azotés des végétaux, et encore plus à proximité des zones sensibles. Des travaux sont en cours afin d'étudier et de comparer par modélisation les impacts environnementaux d'un système avec CIPAN, avec CIVE ou inter-culture de sol nu (Thèse CIFRE INRAE/GrDF de Camille Launay).

Brozyna et al. (2013) ont comparé l'impact de la gestion d'une prairie de trèfle (RGA + Trèfle) en semis sous couvert sur la dynamique de l'azote au cours d'une rotation orge de printemps / prairie de trèfle (semé dans l'orge en mai) / pomme de terre / blé d'hiver. Deux modalités de fertilisation ont été appliquées : une modalité avec incorporation de la prairie de trèfle comme engrais vert et une autre modalité avec récolte de la prairie de trèfle puis en réalisant un apport sous forme de digestat équivalent à l'azote exporté. Le digestat était en réalité issu de la digestion de lisier de porc pour des raisons pratiques.

Les résultats montrent qu'avec la modalité « digestat », les rendements en matière sèche ont augmenté de 14% et la quantité d'azote récolté de 40%.

Gunnarsson et al., (2011) ont également comparé l'impact du mode de fertilisation sur de la betterave rouge dans trois rotations. La fertilisation a été effectuée soit à base d'engrais vert (A), ou de digestat (B et C).

A = Engrais vert restitué / Betterave / Seigle d'hiver

B = Engrais vert récolté / Betterave / Seigle d'hiver

C = Engrais vert récolté / Orge printemps / Betterave

Les résultats montrent que la betterave fertilisée par le digestat d'un hectare d'engrais vert récolté et d'un hectare de feuilles de betterave a un rendement 15 à 28% plus élevé que la betterave implantée juste après un engrais vert, avec respectivement 2 et 3 fauches d'engrais vert récolté. En parallèle les mesures de reliquats azotés montrent également des risques de lixiviation moins importants dans les systèmes à base de digestat que le système à base d'engrais vert.

Une étude autrichienne (Szerencsits, 2014) a également permis de montrer que les CIVE permettent de diminuer l'azote minéral dans le sol de 5 à 10% par rapport à un engrais vert en sortie d'hiver.

Dans le cadre du programme MéthaPolSol, (Girault et al., 2019) sur la base de simulation Syst'N, aucune différence significative en terme lixiviation n'a été observée entre l'implantation d'une CIPAN et d'une CIVE d'hiver fertilisée (dans le cadre de la réglementation en vigueur en Bretagne) ou non. Cependant, ces résultats doivent être relativisés au regard des fortes incertitudes sur la capacité des modèles à prédire la minéralisation de l'azote organique du sol.

Partie 2 : Autres impacts sur l'eau

Débat

L'épandage du digestat (éventuellement couplé avec un couvert d'inter-culture) permet-il de diminuer le salissement des parcelles ?

Des retours d'expériences d'agriculteurs méthaniseurs affirment que certaines adventices ne sont plus présentes dans le digestat alors qu'elles l'étaient dans les lisiers ou les fumiers (avoine folle ou le ray-grass). Des études ont également montré que la digestion anaérobie inactive les graines de nombreuses adventices sans pour autant aller jusqu'à mesurer l'effet de l'insertion de la méthanisation sur le salissement des parcelles (quantité d'adventices présente sur une parcelle) (Johansen et al., 2013). La mise en place de CIVE peut également contribuer à diminuer le salissement des parcelles. Des essais sont en cours (programme Recital) afin de mesurer cet effet. La diminution du salissement de parcelle pourrait permettre de diminuer l'IFT (Indicateur de Fréquence de Traitements phytosanitaires), et donc potentiellement les pesticides en lien avec la pollution de l'eau mais ce sujet reste à documenter.

Les CIVE diminuent-elles la recharge hydrique des eaux souterraines ?

Des travaux sur les cultures intermédiaires (Meyer, 2020) ont montré que la présence d'un couvert diminue le drainage par une augmentation de l'évapotranspiration en comparaison avec un sol nu. La mise en place à grande échelle de couverts mal adaptés pourrait modifier le grand cycle de l'eau en diminuant le drainage qui est le processus déterminant de la recharge des eaux souterraines. Toutefois si le couvert est bien géré (adaptation des espèces, date de semis...) il n'entraîne pas de stress hydrique et azoté.

À l'inverse la mise en place de couvert encore efficace en mars/avril tamponne ces à-coups climatiques à la fois par la capacité de la plante à évapotranspirer mais également en évitant au sol de « se refermer » ce qui a pour conséquence de limiter le ruissellement de gros abats d'eau lors d'épisode orageux au printemps et d'accélérer les flux d'eau en dehors de la parcelle.

Des mesures de terrain réalisées dans le cadre du projet OPTICIVE illustrent la consommation en eau des CIVE d'été avec un niveau de réserve facilement utilisable totalement consommée à la récolte de ces couverts. Pour les CIVE d'hiver, le processus est identique. Les mesures effectuées à la récolte sont proches de la réserve de survie. Cet assèchement de la réserve par les couverts sur la culture suivante est une source d'impact sur le rendement de la culture suivante non négligeable qu'il convient d'instrumenter. Des bilans hydriques ont alors été réalisés sur la séquence de culture, avec réinitialisation et correction éventuelle de l'état initial de la réserve de la culture suivante à partir des mesures précédentes. Ces bilans illustrent le rechargement de cette réserve hydrique du sol sur le mois de mai, historiquement un des mois les plus arrosés de l'année sur de nombreuses régions françaises. Ces pluies rechargent alors la réserve pour la culture suivante qui ne serait pas pénalisée par ce déficit hydrique mais potentiellement par d'autres facteurs (date de semis).

Conclusion

Le sujet de l'impact de la méthanisation sur la qualité de l'eau est un sujet complexe, encore peu caractérisé scientifiquement, et très dépendant des contextes (pratiques, contexte pédoclimatique, etc.). Cependant certains liens de cause à effet font l'objet d'un consensus scientifique :

- À pratique d'épandage similaire et à quantité d'azote efficace identique, les digestats présentent globalement un risque de lixiviation similaire aux PRO classiques.
- Les risques de lixiviation sont surtout influencés par les pratiques agricoles ;
- L'introduction d'une unité de méthanisation est susceptible de modifier les pratiques d'épandage dans la zone concernée ;
- Il est admis que la couverture du sol en hiver est efficace pour limiter la lixiviation de l'azote.
- En France, la méthanisation peut favoriser l'introduction de CIVE contribuant ainsi à diversifier les assolements dans les exploitations agricoles.

En parallèle, les principaux points de débat portent sur :

- L'épandage du digestat (éventuellement couplé avec un couvert d'inter-culture) permet-il de diminuer le salissement des parcelles ?
- Quelle est l'évolution du solde azoté global dans le cas des unités de méthanisation avec une forte proportion de CIVE ?
- Une CIVE est-elle aussi efficace qu'une CIPAN pour limiter la lixiviation de l'azote en inter-culture ?

De plus les propriétés agronomiques des digestats dépendent des substrats, de leurs compositions azotées, de la structure physique des digestats. Par conséquent, une éventuelle méthodologie de monétisation devra considérer le type de digestat (cf typologies établies dans le projet Concept-Dig), le contexte pédoclimatique et les pratiques associées à chacun des projets (cf projet Ferti-Dig déposé à l'APR GRAINE sur les bonnes pratiques d'utilisation des digestats selon la classe du digestat). Le respect des bonnes pratiques minimise les risques d'erreurs et de dégradation de la ressource en eau.

Au regard de ce constat, la problématique de la monétisation pourrait être abordée en cherchant à mettre en évidence et valoriser les pratiques identifiées comme vertueuses (mise en place de cultures à bas niveau d'intrant, mise en place d'une interculture, allongement des rotations, etc...). Cette méthode peut en effet :

- Permettre de développer des pratiques adaptées au contexte des projets (meilleure efficacité)
- Déboucher sur des soutiens effectifs (ex : mécanismes de paiements pour services environnementaux ...)
- Permettre de suivre l'efficacité à l'échelle du projet (suivi d'indicateurs sur la qualité de l'eau sur le long terme) et mise en place d'une procédure de contrôle.

Le groupe de travail souligne finalement l'importance de poursuivre les travaux sur le lien entre méthanisation et qualité de l'eau, notamment sur deux thématiques particulièrement peu documentées à l'heure actuelle et par conséquent non abordées dans le présent document :

- Caractériser les changements de pratiques agricoles constatés à l'échelle des systèmes (avant et après méthanisation), et évaluer par modélisation l'impact de ces changements sur la qualité de l'eau ;
- Étudier l'influence des effets « induits » par le développement de la filière méthanisation (et notamment la question du changement d'affectation des sols).

Annexe 1 : Phénomène de volatilisation

La volatilisation est le transfert dans l'atmosphère du NH_3 présent à l'interface produit/sol (Sommer et al. 2001) et se fait selon un gradient de concentration, de la plus forte vers la plus faible (Genermont et al. 1997; Sommer et al. 2003). La présence d'azote ammoniacal dans une solution en contact avec l'air conduit systématiquement à la volatilisation d'ammoniac du fait d'un jeu d'équilibres à la fois physiques et chimiques (figure 1) (CORPEN 2006).

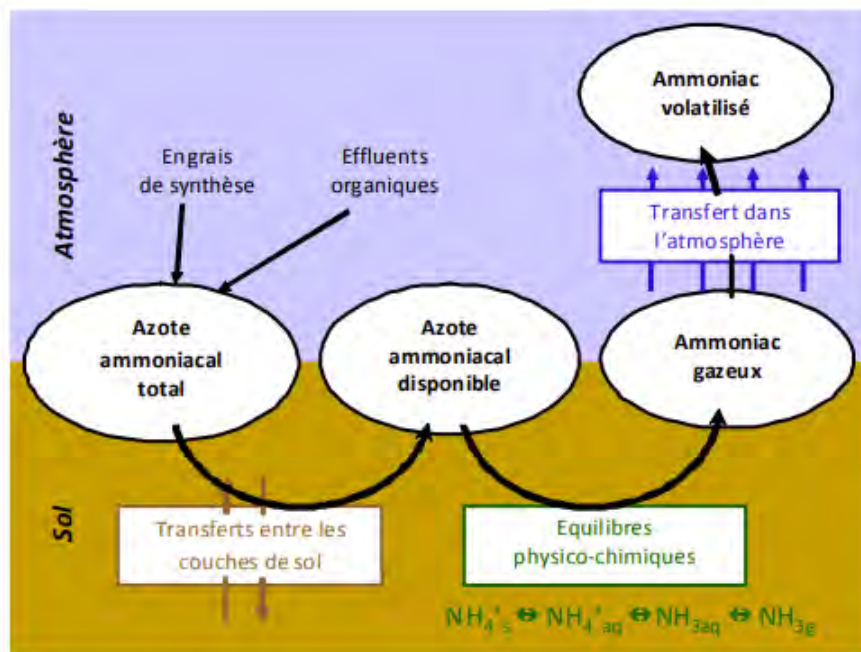


Figure : Le processus de volatilisation d'ammoniac en parcelle agricole.
Source : S. Genermont, INRAE Grignon)

L'état de l'art réalisé sur la période 2000-2010 montre qu'il existe de nombreux leviers de réduction des émissions d'ammoniac à l'épandage et qu'ils ont une efficacité variable selon les contextes. Il a été montré à plusieurs reprises que l'on ne peut pas faire abstraction des conditions pédoclimatiques particulières régnant au moment du déroulement d'un chantier d'épandage : une mesure permettant des réductions significatives dans un contexte pourra s'avérer complètement inefficace dans une autre situation ; il est important d'accompagner toute préconisation de conditions dans lesquelles la technologie et/ou la pratique réductrice des émissions d'ammoniac est efficace. De même, certaines situations très particulières peuvent entraîner des transferts de pollution importants : par exemple, la réduction des émissions d'ammoniac par le travail du sol peut être à l'origine d'une lixiviation de nitrates (augmentation des capacités d'infiltration) ou d'une érosion du sol plus conséquente (déstructuration des sols).

La mise en œuvre d'une mesure de réduction des émissions d'ammoniac doit, dans la mesure du possible, prendre en compte ces transferts potentiels d'impacts. (Source : Thomas Pacaud, M. Pradel. Volatilisation de l'ammoniac et épandage de fertilisants organiques et minéraux : état des lieux des connaissances et perspectives de recherche. irstea. 2010, pp.122. ffh102593494f)

Liste des abréviations

AAMF : Association des Agriculteurs Méthaniseurs de France
ADEME : Agence de la transition écologique
C : Carbone
CEE ou Kéq : Coefficient Equivalent Engrais
CH₄ : Méthane
CIFRE : Convention Industrielle de Formation par la Recherche
CIPAN : Culture Intermédiaire Piège à Nitrate
CIVE : Culture Intermédiaire à Vocation Energétique
CO₂ : Dioxyde de carbone
COMIFER : Comité Français d'Etude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée
CRAB : Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne
CTO : Composé Trace Organique
CUMA : Coopérative d'Utilisation de Matériel Agricole
E.Coli : Escherichia Coli
EFELE : Effluents d'Elevage et Environnement
ETM : Élément trace métallique
GRDF : Gaz Réseau Distribution France
HAP : Hydrocarbure Aromatique Polycyclique
ICPE : Installation classée Pour l'Environnement
INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement
K : Potassium
K₂O : Oxyde de potassium
LBE : Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement
MB : Matière Brute
MO : Matière Organique
MS : Matière Sèche
N : Azote
N-NH₄ : Azote ammoniacal
NO₃⁻ : Nitrates
N_{tot} : Azote total
P : Phosphore
P₂O₅ : Pentoxyde de phosphore
pH : Potentiel Hydrogène
PRO : Produit Résiduaire Organique
SAMO : Surface Amendable en Matière Organique
SAU : Surface Agricole Utile
SOERE PRO : Système d'Observation et d'Expérimentation pour la Recherche en Environnement sur les Produits Résiduaire Organiques
STICS : Simulateur MULTI disciplinaire pour les Cultures Standard
UFC : Unité Formant Colonie

Bibliographie

- ADEME, Morvan, T., Fléchar, C., Menasseri, S., Hallaire, V., Pérès, G., Michot, D., Chiffé, J., Le Roy, P., Cheviron, N., Grondin, V., Marraud, C., Hedde, M., Jardé, E., Monard, C., Potard, K., Pourcher, A. M., Ziebal, C., Dequiedt, S., ... Walter, C. (2016). *Synthèse de l'activité de la plateforme EFELE pour la période [2012 ; 2016]. Rapport final du contrat 1006C0126, 160 pages.*
- ADEME, RITTMO Agroenvironnement, Uteam, FIBL, & LDAR. (2011). Qualité agronomique et sanitaire des digestats. In *Rapport de l'ADEME.*
- Birkmose, T. . (2009). *Nitrogen Recovery from Organic Manures: Improved Slurry Application Techniques and Treatment – the Danish Scenario.*
- Brozyna, M. A., Petersen, S. O., Chirinda, N., & Olesen, J. E. (2013). Effects of grass-clover management and cover crops on nitrogen cycling and nitrous oxide emissions in a stockless organic crop rotation. *Agriculture, Ecosystems and Environment, 181*, 115–126. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.09.013>
- Chantigny, M. H., Angers, D. A., Bélanger, G., Rochette, P., Eriksen-Hamel, N., Bittman, S., Buckley, K., Massé, D., & Gasser, M. O. (2008). Yield and nutrient export of grain corn fertilized with raw and treated liquid swine manure. *Agronomy Journal, 100*(5), 1303–1309. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0361>
- Claire, B., & Cécile, M. (2018). *Essai pluriannuel d'épandage de digestat : premiers résultats d'azote : volatilisation et valorisation par les cultures* (Issue graph 1).
- Couturier, C., Jack, A., Laboubee, C., & Meiffren, I. (2019). *SOLAGRO : La méthanisation rurale, outil des transitions énergétiques et agroécologiques.*
- Dabert P., Charlène Couturier, P. Arlabosse, Marc Phillippe Heran, C. Zemb., et al.. Caractérisation des DIgestats et de leurs filières de Valorisation Agronomique. irstea. 2015, pp.49. ffhaf-02605458f
- Dieude-Fauvel, E., Baudez, J-C., Girault, R., (09/2013). IRSTEA. Livrable 3.2b *Caractérisation physique des digestats bruts*, programme ANR-10-BIOE-007 DIVA
- Gagnon, B., Ziadi, N., Chantigny, M. H., Bélanger, G., & Massé, D. I. (2012). Biosolids from treated swine manure and papermill residues affect corn fertilizer value. *Agronomy Journal, 104*(2), 483–492. <https://doi.org/10.2134/agronj2011.0327>
- Girault, R., Affes, R., Akkal, N., Bareha, Y., Corson, M., Houot, S., Launay, C., Levavasseur, F., Menasseri, S., & Trémier, A. (2019). *Projet MethaPolSol: Quelles stratégies territoriales de METHAnisation pour combiner lutte contre le changement climatique, lutte contre les POLLutions diffuses azotées et amélioration de la qualité des SOLs.* 67.
- Gunnarsson, A., Lindén, B., & Gertsson, U. (2011). Biodigestion of plant material can improve nitrogen use efficiency in a red beet crop sequence. *HortScience, 46*(5), 765–775. <https://doi.org/10.21273/hortsci.46.5.765>
- Heggenstaller, A. H., Anex, R. P., Liebman, M., Sundberg, D. N., & Gibson, L. R. (2008). Productivity and nutrient dynamics in bioenergy double-cropping systems. *Agronomy Journal, 100*(6), 1740–1748. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0087>
- Jimenez, J., Patureau, D., Carrere, H., Girault, R., Commandre, J.-M., Tremier, A., Delgènes, J.-P., Latrille, E., Rossard, V., Ollivier, D., & Houot, S. (2019). *CONCEPT-DIG : Outil d'aide à la conception de la filière pour la valorisation agronomique des digestats.*
- Johansen, A., Nielsen, H. B., Hansen, C. M., Andreassen, C., Carlsgart, J., Hauggard-Nielsen, H., & Roepstorff, A. (2013). Survival of weed seeds and animal parasites as affected by anaerobic digestion at meso- and thermophilic conditions. *Waste Management, 33*(4), 807–812. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.11.001>
- Justes, E., Beaudoin, N., Bertuzzi, P., & Charles, R. (2012). *Réduire les fuites de nitrate au*

moyen de cultures intermédiaires : conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.508.621>

- Laboubee, C. (2018). *MéthalaE : Expertise environnementale des résultats*.
- Loria, E. R., Sawyer, J. E., Barker, D. W., Lundvall, J. P., & Lorimor, J. C. (2007). Use of anaerobically digested swine manure as a nitrogen source in corn production. *Agronomy Journal*, 99(4), 1119–1129. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0251>
- Malone, R. W., Obrycki, J. F., Karlen, D. L., Ma, L., Kaspar, T. C., Jaynes, D. B., Parkin, T. B., Lence, S. H., Feyereisen, G. W., Fang, Q. X., Richard, T. L., & Gillette, K. (2018). Harvesting Fertilized Rye Cover Crop: Simulated Revenue, Net Energy, and Drainage Nitrogen Loss. *Agricultural & Environmental Letters*, 3(170041), 1–5. <https://doi.org/10.2134/aer2017.11.0041>
- Marsac S., Heredia M., Bazet M., Delaye N., Trochard R., Lagrange H., Quod C., Sanner E-A (2019): Optimisation de la mobilisation de CIVE pour la méthanisation dans les systèmes d'exploitation. 73 pages.
- Meyer, N. (2020). *Evaluation de l'impact des cultures intermédiaires multi-services sur le bilan hydrique des sols : approche par expérimentation et simulation. Application au bassin Adour-Garonne*. (Issue May). Institut National Polytechnique de Toulouse.
- Möller, K. (2015). Effects of anaerobic digestion on soil carbon and nitrogen turnover, N emissions, and soil biological activity. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(3), 1021–1041. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0284-3>
- Möller, K., & Stinner, W. (2009). Effects of different manuring systems with and without biogas digestion on soil mineral nitrogen content and on gaseous nitrogen losses (ammonia, nitrous oxides). *European Journal of Agronomy*, 30(1), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.06.003>
- Nicholson, F., Bhogal, A., Cardenas, L., Chadwick, D., Misselbrook, T., Rollett, A., Taylor, M., Thorman, R., & Williams, J. (2017). Nitrogen losses to the environment following food-based digestate and compost applications to agricultural land. *Environmental Pollution*, 228(2017), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.05.023>
- Odlare, M., Arthurson, V., Pell, M., Svensson, K., Nehrenheim, E., & Abubaker, J. (2011). Land application of organic waste - Effects on the soil ecosystem. *Applied Energy*, 88(6), 2210–2218. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.043>
- Ortenblad, H. (2000). The use of digested slurry within agriculture. In *AD: Making energy and solving modern waste problems*.
- Orzi, V., Riva, C., Scaglia, B., D'Imporzano, G., Tambone, F., & Adani, F. (2018). Anaerobic digestion coupled with digestate injection reduced odour emissions from soil during manure distribution. *Science of the Total Environment*, 621, 168–176. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.249>
- Pötsch, E. (2005). *Nährstoffgehalt von Gärrückständen aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen und deren Einsatz im Dauergrünland*.
- Reibel, A., & Leclerc, B. (2018). Valorisation agricole des digestats : quel impact sur les cultures, le sol et l'environnement ? *La Méthanisation En Provence-Aples-Côte d'Azur*, 63. <http://www.metha-paca.fr/>
- Riva, C., Orzi, V., Carozzi, M., Acutis, M., Boccasile, G., Lonati, S., Tambone, F., D'Imporzano, G., & Adani, F. (2016). Short-term experiments in using digestate products as substitutes for mineral (N) fertilizer: Agronomic performance, odours, and ammonia emission impacts. *Science of the Total Environment*, 547, 206–214. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.156>
- Savoie, A., Pasquier, C., Ayzac, A., & Voylokov, P. (2018). *MétaMéthala : Impact de l'insertion de la méthanisation sur le bilan C et N en exploitation polyculture élevage*. 3(1), 1–20.

- Solagro. (2018). *MéthaLAE : Synthèse technique - Améliorer la fertilité des agrosystèmes*.
- Svoboda, N., Taube, F., Wienforth, B., Kluß, C., Kage, H., & Herrmann, A. (2013). Nitrogen leaching losses after biogas residue application to maize. *Soil and Tillage Research*, 130, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.02.006>
- Szerencsits, M. (2014). *Blue Globe Report Synergetische Biogaserzeugung aus Fruchtfolgesystemen*.
- Tignon, E. (2018). *MéthaLAE : Expertise agronomique des résultats*.
- Tsachidou, B., Scheuren, M., Gennen, J., Debbaut, V., Toussaint, B., Hissler, C., George, I., & Delfosse, P. (2019). Biogas residues in substitution for chemical fertilizers: A comparative study on a grassland in the Walloon Region. *Science of the Total Environment*, 666(Feb 2020), 212–225. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.238>

Annexe : Liste des membres du Comité de Pilotage du Sous-GT Externalités

Olivier DAUGER	France Gaz Renouvelables / FNSEA
Cécile FREDERICQ	France Gaz Renouvelables
Jean LEMAISTRE	France Gaz Renouvelables
Jacques-Pierre QAAK	France Gaz Renouvelables / AAMF
Jean-Marc ONNO	AAMF
Gildas COTTEN	AGPM
Edouard LANCKRIET	Agrosolutions
Léonard JARRIGE	APCA
Christian DECONNINCK	ATEE
Alice L'HOSTIS	ATEE - CTBM
Michel SPILLEMAECKER	ATEE – Club Biogaz
Jean-Marc RENAUDEAU	Chambre d'Agriculture des Deux Sèvres
Carole LEJEUNE	FNSEA
Sylvain FREDERIC	GRDF
Christophe DELFELD	GRTgaz
Rachel KOLBE SEMHOUN	InVivo
Laura LUU VAN LANG	Teréga
Mathilde WORINGER	Teréga

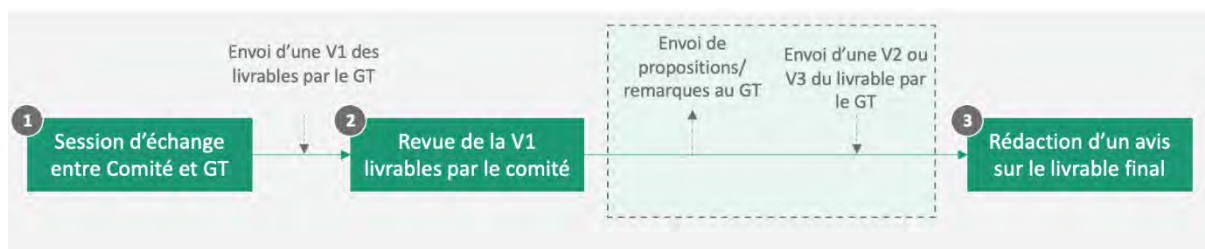
Annexe : Avis du comité scientifique sur le rapport

NB : L'avis du comité scientifique porte exclusivement sur le livrable produit par le groupe de travail (p11 à 34 du présent document).

▪ Rappel de la mission du Comité scientifique et des modalités d'interaction avec les groupes de travail consacrés à la méthanisation

Le Comité scientifique (CS) a été missionné par le sous-GT Externalités du CSF afin « d'orienter les groupes de travail et d'émettre un avis sur les résultats produits par ces derniers ».

Les interactions entre le CS et les GT ont été organisées selon le processus suivant, de sorte que des versions intermédiaires du livrable final ont déjà fait l'objet de recommandations et que le présent avis porte donc sur un document qui intègre différents amendements.



▪ Objet et méthode de la note de synthèse « Digestats et qualité de l'eau »

L'objet de ce groupe de travail a été d'analyser les externalités induites par l'ensemble du processus de méthanisation (y compris les modifications des systèmes de cultures en amont) sur la qualité de l'eau, qu'elles soient négatives ou positives, notamment eu égard au risque de lixiviation.

Ce sujet est particulièrement complexe, dépendant fortement du contexte pris en référence (nature des pratiques, cadre pédoclimatique, etc.) et n'est pas celui qui a fait l'objet des travaux scientifiques les plus denses.

La méthode retenue par le GT a été de procéder à une large revue de la littérature complétée par des entretiens d'experts. La note est conçue de telle façon à clairement distinguer ce qui, à ce stade, fait l'objet d'un consensus dans la littérature analysée, ou à l'inverse fait débat.

Il convient de souligner (comme mis en avant dans la synthèse de la note) que les travaux passés en revue concernent généralement « les conditions 'normales' de fonctionnement des unités de méthanisation et ne couvrent pas les erreurs ou accidents, et leurs conséquences éventuelles ». De sorte que l'appréciation de la nature et du niveau des externalités « positives » (ou la limitation des externalités négatives), telle qu'elle ressort de la note, doit se comprendre comme issue du respect de ces « conditions normales ».

■ Observations du Comité scientifique

Avis général :

- Le contenu de la note reflète les principaux questionnements sur le sujet, tels qu'abordés dans la littérature.
- L'approche est rigoureuse, basée sur un très important travail de revue de littérature.
- En particulier, les points de débat sur le sujet ne sont pas occultés.
- L'organisation du document par thème et par points de consensus et de débats permet un éclairage efficace et objectif du sujet.
- Par ailleurs, malgré la complexité du sujet, la note propose une approche pédagogique et reste abordable pour des non-initiés.
- La qualité du document pourrait légitimer sa publication sur un site d'archives ouvertes (ex : HAL)

Points d'amélioration et d'approfondissement dans des travaux futurs :

- Le lien de chacune des thématiques avec la qualité de l'eau pourrait parfois être mieux mis en évidence.
- Le présent travail effectue une synthèse précise des connaissances scientifiques à date. Toutefois, des questionnements subsistent sur plusieurs sujets et n'ont pas été traités de manière détaillée dans la note, faute de données et de travaux scientifiques suffisants (comme souligné clairement dans la note) et dont il importe de souligner la nécessité.
- La note traite de manière détaillée l'impact de la méthanisation sur la qualité des ressources en eau à l'échelle « micro » (à l'échelle d'une parcelle, d'une unité...), mais n'est pas en mesure de traiter des impacts possibles liés au développement généralisé de la filière méthanisation (impacts à l'échelle d'un territoire).
- Le développement d'un ou plusieurs projets de méthanisation peut induire des effets sur la qualité de l'eau. En particulier, les éventuels changements d'affectation des sols et leur impact sur les ressources en eau font l'objet de questionnements importants au sein de la filière et devraient être étudiés en détail.
- La note porte sur les unités fonctionnant de manière nominale. Les erreurs, mauvaises pratiques et accidents peuvent toutefois avoir des conséquences importantes sur la qualité de l'eau. Il s'avère donc important de caractériser les impacts potentiels de tels événements, et de travailler à la dissémination des bonnes pratiques.
- Enfin, la note étant basée essentiellement sur la revue des travaux scientifiques, elle sera à mettre à jour régulièrement. Une prochaine mise à jour devrait intégrer une méthodologie par scénario pour prendre en compte soit la réalité du développement des méthaniseurs (approche territoriale), soit la diversité des fonctionnements (analyse du risque).

■ Composition du Comité scientifique

Jean-Paul BORDES	• Directeur Général – ACTA Instituts Techniques Agricoles
Marc CHAUSSADE	• Directeur Exécutif – Consortium de Valorisation Thématique de l'Alliance National de Recherche pour l'Environnement (CVT AllEnvi) • Directeur Département d'Intelligence Économique à INRAE Transfert
Christian COUTURIER	• Directeur Général – Solagro • Président – Association Negawatt • Vice-Président et membre fondateur – Club Biogaz de l'ATEE
Patrice GEOFFRON (Président du Comité)	• Professeur d'Économie – Laboratoire d'Économie de Dauphine / LEDa UMR-CNRS-IRD
Julie JIMENEZ	• Chargée de recherche – INRAE / LBE Narbonne
Yves LE ROUX	• Enseignant chercheur – ENSAIA / Université de Lorraine • Titulaire – Chaire Énergies et Territoire de l'ENSAIA
Thierry RIBEIRO	• Enseignant chercheur bioprocédés et méthanisation – Uni Lasalle Beauvais