Perséphone

Intégration de la filière biogaz dans la nouvelle bioéconomie

Résultats

2016 - 2020

Interreg Grande Région | Großregion Perséphone
UNION EUROPEENNE
Wallonie
Grand Est
L'Europe s'invente chez nous
LE GOUVERNEMENT DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
Ministère du Développement durable et des Infrastructures
SAARLAND
Ostbelgien

Table des matières

Projet PERSEPHONE 3

1. Objectifs 3
   - Objectif principal 3
   - Objectifs secondaires 4
2. Partenariat 4
3. Synopsis 5

Action 3 : Diversification des installations de biogaz par l'intégration d'hydrogène renouvelable et raffinage du digestat 6

1. Conversion biologique de CO_2 et d'hydrogène renouvelable en méthane : un pilote mobile exploitant les digestats 6
   - Introduction 6
   - Un prototype mobile au concept innovant 7
     - *Deux réacteurs à but bien spécifique* 7
     - *Apports gazeux du réacteur « H2 »* 8
     - *Un challenge en matière de sécurité et de mobilité* 8
   - Conclusions et perspectives 9
2. Fractionnement du digestat 9
   - Contexte 9
   - Objectifs 10
   - Démarche 10
     - *Fractionnement par filtration* 10
     - *Séparation de phase* 10
     - *Nanofiltration dynamique* 10
     - *Osmose inverse* 10
     - *Surconcentration et sous-fractionnement* 11

Action 4 : Production d'algues dans la Grande Région pour de nouveaux marchés 13

1. Valorisation des différentes fractions de digestat dans la production d'algues 13
2. Etat des lieux des unités couplant culture de microalgues et unités de méthanisation sur le territoire de la Grande Région 14
3. Revue scientifique et technique concernant la culture de microalgues sur du digestat 15

Action 5 : Le digestat et ses fractions en substitution aux engrais chimiques ; impact sur les sols et la qualité des eaux 16

1. Le digestat et ses fractions en substitution aux engrais chimiques 16
   - Introduction 16
   - Historique d'utilisation des sites 16
   - Propriétés des sols 17
   - Variantes 18
   - Gestion des parcelles : fertilisation et récoltes 19
   - Avantages de la fertilisation organique 19
   - Résultats 20
2. Impact sur la qualité des eaux 22
3. Impact sur le fonctionnement microbien du sol 24

Action 6 : Introduction des services écosytémiques et amélioration de la protection des eaux par le biogaz 27

1. Introduction 27
2. Forces et faiblesses du biogaz 27
3. Possibilités d'intégration de la protection de l'eau dans la production de substrat pour le biogaz 29
4. Conclusion 29
5. Références 30

Action 7 : Impacts environnementaux et faisabilité économique des actions 3 à 6 31

1. Introduction 31
2. Le biogaz et la contribution à la protection du climat 31
3. Aspects macro-économiques du biogaz ou l'intégration du biogaz dans la bioéconomie 31
4. Conclusion 33
5. Références 33

Projet PERSEPHONE

Production d'**E**nergies **R**enouvelable**S**, **E**ngrais et **P**roduits **H**armonieux d'**O**rigines **N**atur**E**lles

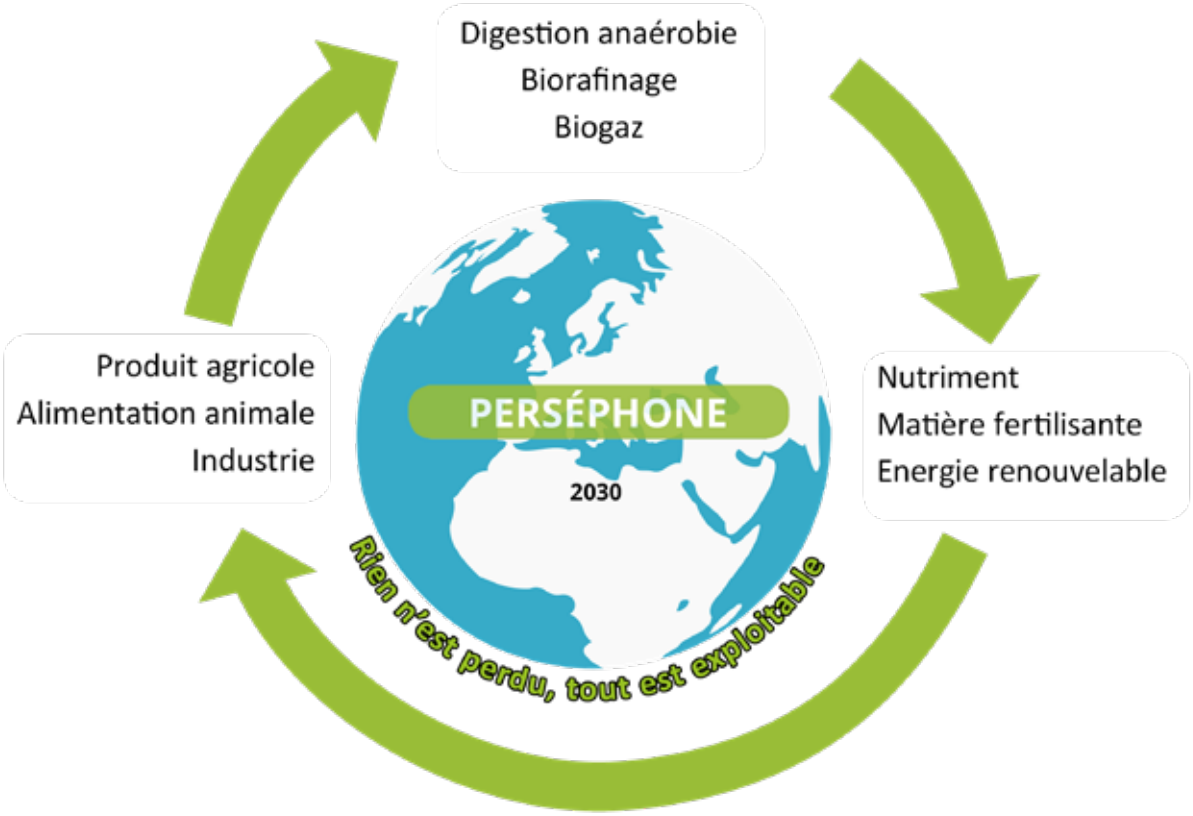
Projet introduit dans le cadre du programme Interreg VA 2013 -2020 avec le soutien de :

1. Objectifs

Objectif principal

Perséphone a pour objectif principal de positionner la filière biogaz **dans la nouvelle bioéconomie et l'économie circulaire.** Perséphone a la volonté d'apporter une nouvelle valeur ajoutée aux unités agricoles existantes afin de les pérenniser à l'horizon 2020-2030. Les futures unités pourront également intégrer ces nouvelles données dans leur business plan.

Pour atteindre cet objectif premier, le partenariat de PERSEPHONE propose d'agir principalement au niveau de la valorisation des produits du processus de biométhanisation, peu ou mal valorisés aujourd'hui.



Objectifs secondaires

Biométhanisation et énergie

Faire jouer à la biométhanisation le rôle de régulateur de production d'électricité renouvelable dans le bouquet énergétique et enrichir le biogaz en biométhane grâce à l'introduction innovante d'hydrogène dans les bioréacteurs (Actions 3, 6 et 7)

Biométhanisation, digestat et productions agricoles durables

Développer trois modes de valorisation du digestat qui répondent complètement au développement respectueux de l'environnement et du cadre de vie de nos sociétés en faisant évoluer l'agriculture conventionnelle vers des modes de production durable pour l'alimentation, l'énergie et les matériaux (Actions 3, 4, 5 et 6).

Biométhanisation et environnement

Faire une étude détaillée des impacts économiques (Action 7) et environnementaux (Action 6) des alternatives innovantes du projet.

2. Partenariat

- 1 chef de file : Au Pays de l'Attert
- 6 partenaires scientifiques : LIST, Université de Lorraine, Liège université, izes, AGRA OST
- 5 installations : Bio-Recycle, Ferme FAASCHT, Biogas Rohlingerhof, ENSAIA, autorgerichten
- 2 partenaires industriels : Ama Mundu Technologies, SUSTAIN WATER
- 2 partenaires méthodologiques : Biogas Diekirch, BIOGAS

Le partenariat s'articule autour des actions suivantes :

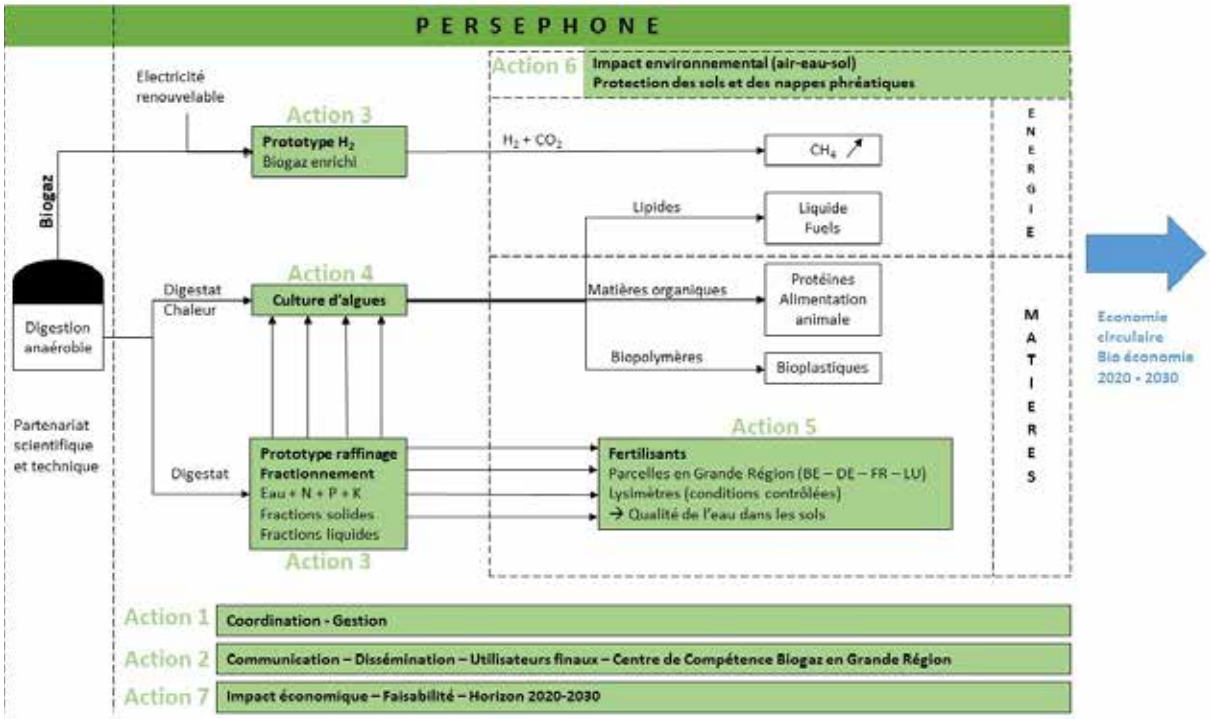
- ✓ Diversification des installations de biogaz par l'intégration d'hydrogène renouvelable et raffinage du digestat ;
- ✓ Production d'algues dans la Grande Région pour stimuler de nouveaux marchés ;
- ✓ Vitrines agronomiques : le digestat et ses fractions en substitution aux engrais chimiques - impact sur les sols et la qualité des eaux ;
- ✓ Collaboration avec les sociétés et les services impliqués dans la gestion de l'eau et la protection de l'environnement pour objectiver les apports de la filière de biométhanisation au maintien de la qualité de l'eau et des milieux aquatiques ;
- ✓ Estimation écologique et faisabilité économique des différentes actions pour la filière du biogaz à l'horizon 2020-2030.

La mise en place de vitrines agronomiques sur chaque versant de la Grande Région avec différentes formes de fertilisations en comparaison avec les engrais chimiques va permettre au partenariat de :

- ✓ Proposer une adaptation raisonnée de la directive des nitrates ;

- ✓ Démontrer que l'utilisation adéquate du digestat peut remplacer avantageusement les engrais chimiques avec diminution de l'empreinte carbone ;
- ✓ Démontrer que la qualité des eaux sera accrue ;
- ✓ Confirmer que la vie microbienne des sols est maintenue et plus durable.

3. Synopsis



Action 3 : Diversification des installations de biogaz par l'intégration d'hydrogène renouvelable et raffinage du digestat

1. Conversion biologique de CO_2 et d'hydrogène renouvelable en méthane : un pilote mobile exploitant les digestats

LIST

Introduction

La plupart des sources d'électricité renouvelable sont de nature transitoire (Figure 1). En particulier la production électrique des panneaux solaires photovoltaïques dépend de l'ensoleillement et celle des éoliennes de la vitesse du vent. En comparaison, la charge du réseau électrique présente une fluctuation non synchrone avec celle de ces productions électriques. En résulte un manque de valorisation d'énergie électrique, les technologies de stockage restant actuellement peu efficientes.

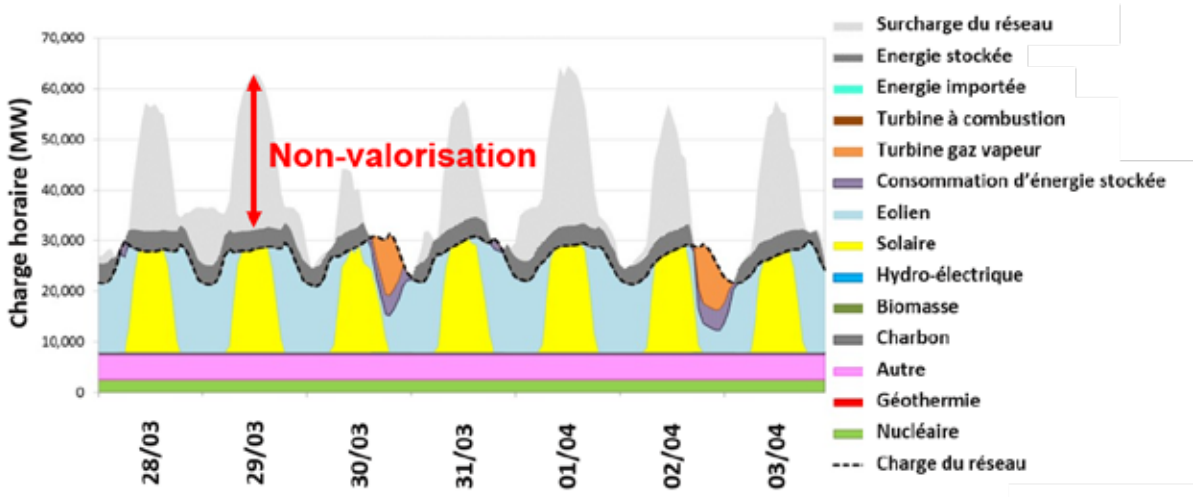


Figure 1 : Modélisation des besoins et productions électriques du Texas pour une semaine de 2050 (graphique adapté de https://solarlove.org/much-more-renewable-energy-could-be-integrated-into-us-grid-without-reliability-problems/)

Dans ce contexte, nous nous proposons de faire jouer à la biométhanisation un rôle de régulateur de production d'électricité renouvelable en exploitant la flore microbienne des digesteurs. En effet, celle-ci comprend des microorganismes qui ont besoin de convertir de l'hydrogène (H_2) et du dioxyde de carbone (CO_2) en méthane (CH_4). Le méthane, contrairement à l'électricité, est facilement stockable dans le réseau de gaz naturel, une infrastructure déjà en place, largement ramifiée, et présentant une capacité de stockage conséquente. De plus :

- de l'hydrogène peut être produit sur demande par électrolyse de l'eau (une technologie appelée *Power-to-gas*), par exemple en utilisant de l'électricité d'origine éolienne ou photovoltaïque ;
- du dioxyde de carbone est largement présent sous forme soluble dans les digestats de biométhanisation ou peut être fourni sous forme gazeuse comme sous-produit d'une épuration de biogaz en biométhane, ou encore par un rejet industriel.

Notre concept, illustré à la Figure 2, peut permettre un renforcement économique du secteur de la biométhanisation en offrant une solution pour (1) le stockage de l'électricité renouvelable de nature intermittente (nuit-jour, vent et absence de vent) ; (2) un outil permettant de mieux synchroniser production et consommation d'électricité renouvelable par sa conversion en hydrogène lui-même converti en méthane stockable dans une infrastructure existante ; (3) une possibilité d'intensification de production de méthane en augmentant drastiquement la qualité du biogaz.

Dans le but de démontrer ce concept à l'échelle réelle, nous avons conçu un bioréacteur pilote qui pourra être greffé en ligne sur le flux de digestat de bioréacteurs de taille industrielle. Le pilote a été

conçu comme un outil mobile permettant de s'assurer sur site que les consortia microbiens complexes et spécifiques à chaque installation de biométhanisation sont capables de biométhaniser efficacement le CO_2 en CH_4 en présence d'hydrogène d'origine renouvelable.

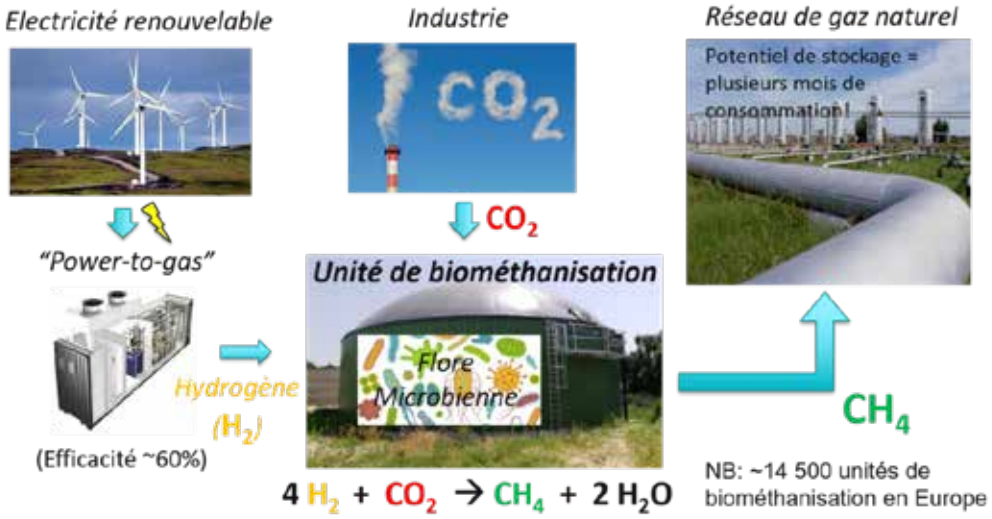


Figure 2 : Concept général

Un prototype mobile au concept innovant

Deux réacteurs à but bien spécifique

Le cœur du prototype est constitué de deux réacteurs en acier inoxydable d'un volume utile de 800 litres, chauffés à une température de 37 °C par un fluide caloporteur circulant dans une double paroi (Figure 3) :

- Un premier réacteur (*réacteur « CH_4 »*), mécaniquement mélangé, simule un digesteur « classique » de biométhanisation. Il est destiné à la conversion de substrat organique en biogaz (CH_4 et CO_2) et agit comme une nourrice pour le second réacteur.
- Un second réacteur (*réacteur « H_2 »*) est destiné à la conversion biologique proprement dite d'hydrogène et de CO_2 en CH_4. Il peut être alimenté : (1) en digestat provenant du réacteur « CH_4 » comme source de CO_2 sous forme soluble, de flore microbienne et de nutriments ; (2) en H_2 et CO_2 gazeux. Les apports en hydrogène et en CO_2 gazeux du réacteur « H_2 » sont fournis par des bouteilles et simulent respectivement l'apport d'H_2 d'un électrolyseur et l'apport de CO_2 résultant par exemple d'un rejet industriel ou d'une épuration de biogaz pour produire du biométhane.

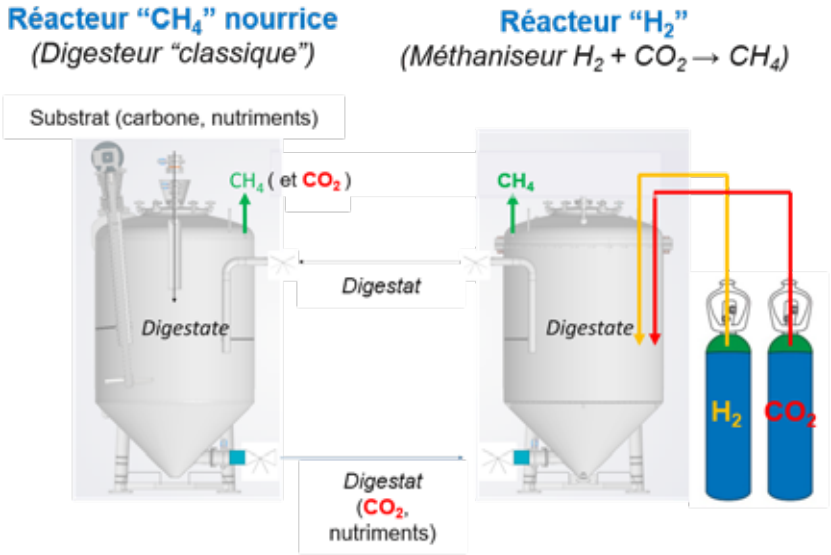


Figure 3 : Principe général du prototype

Une pompe péristaltique permet alternativement l'échange de digestat entre les 2 réacteurs et le brassage du réacteur « H_2 » par recirculation.

Apports gazeux du réacteur « H2 »

Pour permettre l'apport d'hydrogène (ainsi qu'un apport éventuel de CO_2) à la flore microbienne du réacteur « H_2 », un système versatile d'injection membranaire a été conçu (Figure 4). Celui-ci est basé sur 55 modules verticaux pouvant chacun recevoir 36 tubes d'injection en élastomères de natures diverses. Une grille placée en fond de réacteur supporte les modules d'injection et un couvercle amovible permet leur maintenance.

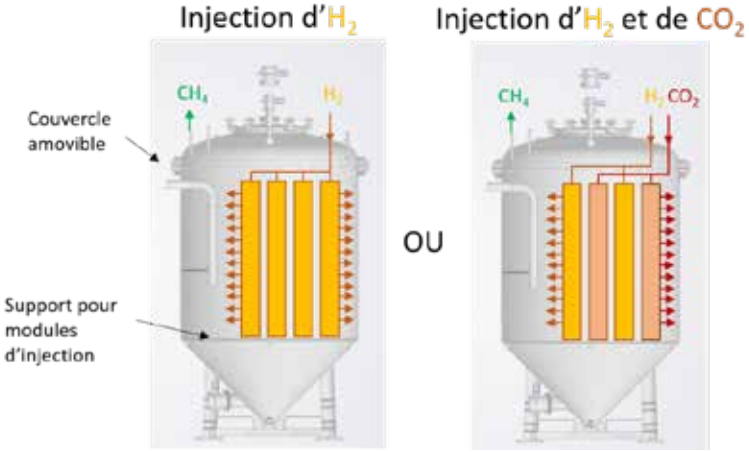


Figure 4 : Injection d'hydrogène avec apport éventuel de CO_2 dans le digestat du réacteur « H_2 »

Un challenge en matière de sécurité et de mobilité

Travailler avec de l'hydrogène dans un espace confiné ne s'improvise pas, ce gaz étant particulièrement explosif. Dès lors, diverses mesures ont été prises pour assurer la sécurité des utilisateurs du prototype. En particulier, la majorité des équipements électriques ont été choisis conformes à la norme ATEX (atmosphère explosive) et les équipements électriques ne répondant pas à cette norme ont été isolés des réacteurs par une cloison étanche délimitant une zone « à risque » et une zone « sûre ». De plus, une ventilation assure un renouvellement continu de l'air ambiant entourant les réacteurs dans la zone « à risque ». Enfin, un détecteur d'hydrogène gazeux mesure sa concentration ambiante et commande une vanne de coupure sur l'arrivée d'hydrogène si sa concentration s'approche du seuil d'explosivité.

Dans le but d'assurer la mobilité du prototype, il a initialement été envisagé d'installer les composants dans une remorque de type « fourgon » munie de panneaux latéraux mobiles, cette solution offrant les avantages d'être déplaçable avec un véhicule de type SUV et de permettre la visualisation du dispositif par le public. Au final, il a été décidé d'utiliser un conteneur transportable par camion, la masse totale des composants étant trop élevée pour permettre l'homologation routière du prototype une fois ceux-ci installés dans une remorque. Un schéma en 3D représentant l'aspect final du prototype est illustré à la figure 5.

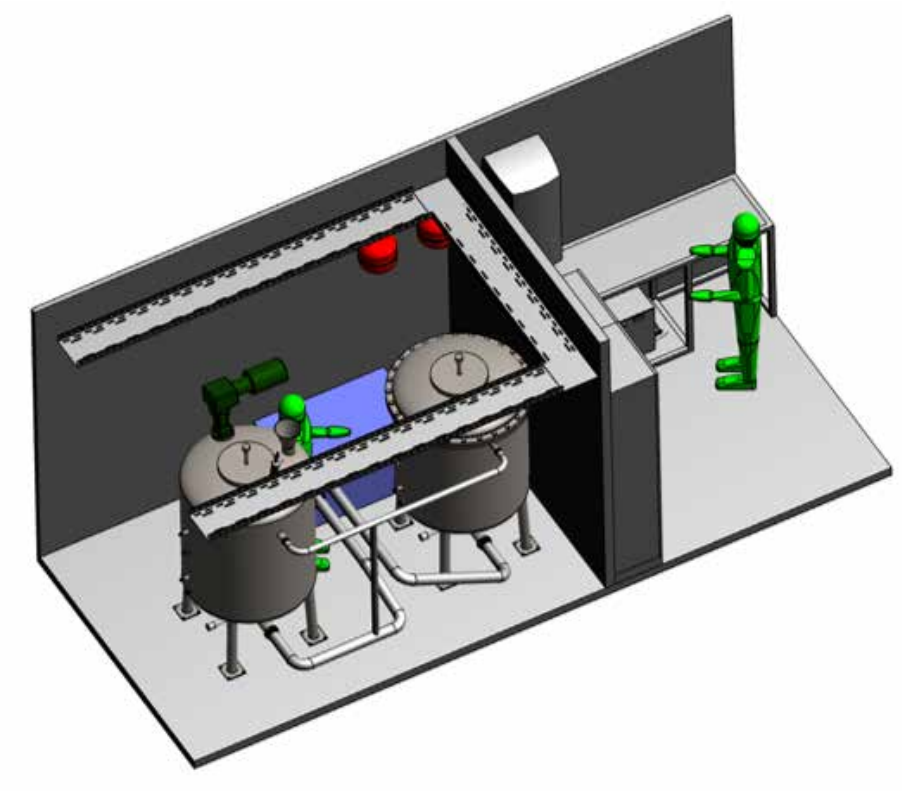


Figure 5 : Représentation 3D du prototype

Conclusions et perspectives

Les premières évaluations théoriques du prototype sont prometteuses : des calculs effectués sur base de plusieurs types d'élastomères montrent que l'importante surface d'injection volumique du système d'injection gazeuse (environ 70m² par m³ de digestat) peut accueillir une importante biomasse microbienne au contact direct des membranes sources d'hydrogène. De plus, la mobilité du prototype permet l'évaluation de digestats de compositions microbiennes diverses, ce qui peut contribuer à répondre à une question complexe : quelles espèces de micro-organismes (et leurs associations symbiotiques) sont les mieux adaptées à la conversion d'hydrogène et de CO_2 en méthane dans les digestats de biométhanisation ?

2. Fractionnement du digestat

AMA MUNDU TECHNOLOGIES

Contexte

La biométhanisation est un processus permettant de valoriser énergétiquement les effluents organiques tels que lisiers, fumiers, résidus agroalimentaires, boues de station d'épuration… La matière est digérée en absence d'air (conditions anaérobiques) libérant du biogaz, un gaz inflammable utilisé pour produire de la chaleur et de l'électricité. Les jus résiduels de digestion, appelés digestats, sont quant à eux riches en nutriments et sont valorisés sous forme d'engrais. Les périodes d'épandage étant toutefois limitées, les digestats doivent être stockés une partie de l'année, consommant des ressources foncières et financières.

La biométhanisation présente le double avantage de s'inscrire pleinement dans une démarche de circularité tout en fournissant une énergie renouvelable qui, à l'instar d'autres comme l'éolienne ou le solaire, peut être produite de manière continue, contrôlée et stockable. Cependant, la filière souffre aujourd'hui d'une mauvaise rentabilité économique et ne peut subsister sans intervention financière des états.

Objectifs

Le projet Perséphone dans son ensemble vise à améliorer l'intégration de la filière de biométhanisation dans la bioéconomie. Plusieurs pistes de valorisation, autres que la simple exploitation du biogaz, sont étudiées pour une meilleure rentabilité économique des installations de biométhanisation.

Une partie de l'action 3 du projet Perséphone est spécifiquement dédiée à une meilleure valorisation du digestat. Deux axes complémentaires ont été abordés :

- Réduction de volumes utiles : les quantités de digestat produites par une installation de biométhanisation se comptent en dizaines de milliers de tonnes. Le stockage et le transport de tels volumes génèrent des coûts relativement élevés qui nuisent économiquement à la valorisation du digestat sous forme d'engrais. Extraire une partie des 85-90% d'eau contenus dans le digestat permet de réduire substantiellement les volumes, et donc les coûts opérationnels associés, sans diminuer la valeur agronomique.
- Production de fractions à plus haute valeur ajoutée : le digestat est un mélange complexe de nutriments et autres molécules d'intérêt. Ces éléments peuvent être astucieusement séparés pour générer des sous-produits à plus haute valeur ajoutée. Ces nouveaux produits ouvrent par ailleurs la voie à d'autres formes de valorisation que le simple épandage sur champs (exemple : culture de microalgues – voir ci-dessous).

Démarche

Fractionnement par filtration

Ama Mundu Technologies développe des technologies innovantes permettant de séparer efficacement des effluents chargés en plusieurs fractions d'intérêt. Elles reposent sur l'utilisation successive de technologies évoluées de filtration membranaire de plus en plus fines (Figure 1a).

Séparation de phase

Dans une première étape, les particules solides grossières sont éliminées au moyen d'une presse à vis. Il en résulte une fraction solide épandable en l'état ou après compostage.

Nanofiltration dynamique

Le digestat liquide est ensuite filtré au travers de membranes de nanofiltration d'une porosité très fine de l'ordre de 5 nm. La nature très chargée du digestat proscrit l'utilisation de membranes classiques qui se colmateraient trop rapidement. Une technologie de filtration dynamique innovante a donc été mise en œuvre. Elle repose sur l'utilisation de membranes céramiques circulaires. La mise en rotation de ces disques pendant la filtration crée des forces de cisaillement à la surface des membranes permettant de fortement limiter le colmatage. Les rendements de filtration sont ainsi augmentés tandis que les consommations énergétiques sont fortement diminuées.
De cette étape il en résulte une fraction liquide riche en azote organique et en phosphore.

Osmose inverse

Une dernière étape de filtration poussée permet de produire deux nouvelles fractions liquides : d'une part une fraction riche en azote minéral et potassium et de l'autre de l'eau pouvant être soit utilisée localement, soit rejetée au milieu naturel.

Dans une première phase de l'étude, une unité de fractionnement mobile, appelée Mobilis (Figure 2), a été déployée sur plusieurs sites de biométhanisation partenaires du projet. Différents types de digestat ont ainsi pu être testés afin d'optimiser les paramètres du procédé. En parallèle, les fractions produites ont été utilisées pour réaliser des tests de fertilisation sur prairie (Action 5) et de culture de microalgues (Action 4).

Les microalgues constituent une forme végétale suscitant de plus en plus d'intérêt. Elles présentent de forts rendements par unité de surface et sont riches en huiles (utilisées pour produire des biocarburants) et en composés à très haute valeur ajoutée comme des compléments alimentaires (oméga 3, astaxanthine). Le digestat contient tous les nutriments nécessaires à la culture des microalgues mais ne peut pas être utilisé en l'état. En effet, il colore les bassins de culture empêchant les microalgues de percevoir les rayons lumineux dont elles sont besoin pour se développer. Le fractionnement a permis de produire une fraction riche en nutriments mais beaucoup moins colorée compatible avec la culture des microalgues.

Surconcentration et sous-fractionnement

La deuxième phase de l'étude a été consacrée à l'utilisation de technologies complémentaires permettant de sous-fractionner les différentes fractions produites par filtration membranaire (Figure 1b). Cette démarche s'inscrit dans un concept de bioraffinerie selon lequel une séparation fine des différents constituants du digestat permettra de produire une grande variété de molécules d'intérêt, remplaçant ainsi avantageusement des produits actuellement issus de la pétrochimie. Ces étapes de sous-fractionnement ont par ailleurs l'avantage d'extraire du digestat une fraction d'eau supplémentaire, permettant ainsi de réduire d'autant les volumes utiles finaux à gérer.

Suite à des essais préliminaires réalisés en laboratoire par le partenaire LIST, différentes technologies ont été retenues pour des tests sur site réel :

- **Evapoconcentration sous vide** : les unités de biométhanisation équipée de cogénérateur produisent sur site de l'électricité et de la chaleur à partir du biogaz. Cette chaleur peut être avantageusement valorisée pour chauffer les fractions de digestat afin d'évaporer l'eau et autres composés volatils qu'elles contiennent. Après condensation, il en résulte d'un côté une sous-fraction concentrée en nutriments et de l'autre une solution aqueuse riche en ammoniaque. L'opération est réalisée sous vide afin d'abaisser les températures d'ébullition et ainsi d'économiser de l'énergie.
- **Table sous vide** : l'ajout de chaux et de floculants permet de faire précipiter une bonne partie des nutriments qui sont ensuite récupérés par filtration sur table sous vide. Il en résulte un engrais organocalcique solide (donc plus facilement stockable) avec une valeur agronomique augmentée.
- Filtre presse : bien que plus compliqué à mettre en œuvre, le filtre presse, utilisé en lieu et place de la table sous vide, permet de produire des fractions solides encore plus compactes et plus déshydratés. Les volumes de stockage nécessaire en sont d'autant plus diminués.

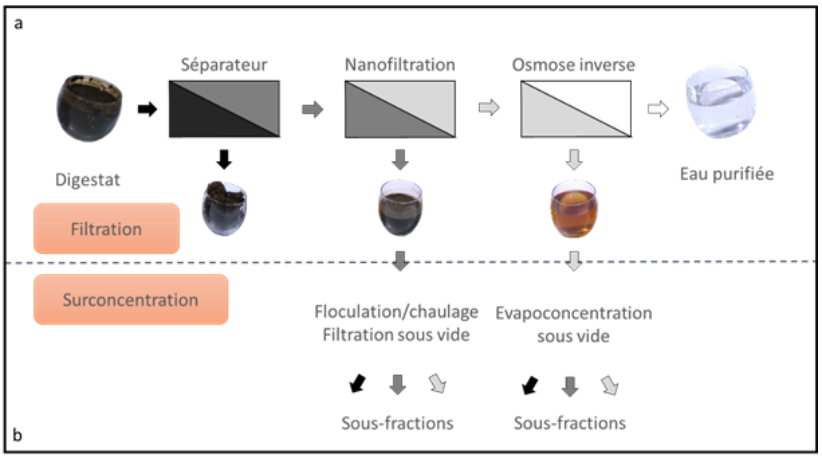


Figure 1 : Procédés de fractionnement du digestat
a) Le digestat est d'abord séparé par plusieurs étapes successives de filtration membranaire de plus en plus fines.
b) Les fractions produites par filtration sont traitées par des technologies complémentaires pour produire des sous-fractions à plus forte valeur ajoutée tout en éliminant un maximum d'eau afin de réduire les volumes utiles.

Figure 2 : Unité de filtration mobile Mobilis
L'unité mobile Mobilis regroupe sur une même remorque : un séparateur de phase, deux modules de nanofiltration dynamique et cinq modules d'osmose inverse.

Action 4 : Production d'algues dans la Grande Région pour de nouveaux marchés

1. Valorisation des différentes fractions de digestat dans la production d'algues

SUSTAINWATER

Afin de réaliser cet objectif, une serre a été mise en place sur le site de la ferme du Faascht appartenant à KESSLER sprl, partenaire du projet. Lors de l'installation de la serre, le système de chauffage a été pensé afin d'être alimenté par une fraction de la chaleur résiduelle produite par l'installation de biométhanisation installée sur le même site.

Dans cette serre, trois chenaux algaux de type « racetrack Chenal Algal à Haut Rendement » ont été installés dans lesquels les cultures d'algues ont été testées. Dans ces chenaux, différentes souches d'algues ont été mises en culture et différentes fractions de digestats ont été utilisées comme source de nutriments permettant d'évaluer le potentiel de ces différentes fractions dans la production d'algues.

On notera que dès le départ du projet, le type de réacteur choisi pour réaliser les tests de cultures d'algues est le Chenal Algal à Haut Rendement (High Rate Algal Pond), photobioréacteur ouvert combinant un airlift à une circulation externe constituée par le chenal proprement dit.

En effet, des travaux antérieurs menés par Sustainwater avaient permis de montrer que le système airlift consomme moins d'énergie pour mettre l'eau en mouvement dans le chenal que les roues à aubes très souvent utilisées dans ce type de réacteur.

Outre une consommation énergétique réduite pour mettre l'eau en mouvement à la vitesse choisie pour les conditions de cultures, le système airlift offre une meilleure efficacité pour assurer les transferts gazeux (O_2 mais aussi CO_2) nécessaires.

Durant le projet Perséphone, Sustainwater a poursuivi ses travaux de caractérisation de l'hydrodynamique des réacteurs CAHR (HRAP) et des transferts de masses (O_2 et CO_2) associés de manière à avoir des outils de dimensionnement et de modélisation pour différentes tailles de réacteurs. C'est un outil indispensable, appelé upscaling, pour passer de réacteurs de petite taille (quelques litres) utilisés en laboratoire à des pilotes de plus grande taille puis à des réacteurs en taille réelle qui peuvent atteindre plusieurs milliers de m^3.

Les différentes fractions de digestats ont toutes été fournies par Ama Mundu Technologies, autre partenaire du projet. Ces fractions ont été obtenues par nanofiltration et/ou par osmose inverse de digestat provenant de l'unité de biométhanisation sur le site de la Ferme du Faascht au départ puis par d'autres partenaires du projet.

Avant cette étude, d'autres essais avaient déjà été faits pour récupérer une fraction de la chaleur résiduelle d'installations de cogénération en place chez des méthaniseurs.

Ces cultures, notamment de spiruline, ne posent pas de problèmes particuliers car elles sont faites à partir d'eau propre et de nutriments qui ne sont pas des effluents ou des sous-produits. C'est alors uniquement la chaleur résiduelle qui est valorisée.

Nous avons testé trois souches différentes : deux souches classiques (*Scenedesmus et Chlorella*), ainsi qu'une souche sélectionnée en raison de sa bonne adaptation aux milieux saumâtres et montré que dans certaines conditions, notamment des temps de séjour élevés, on pouvait avoir une biofloculation naturelle, ce qui facilite les opérations de collecte des microalgues.

Nous avons également montré qu'il était possible de produire diverses souches de microalgues sur des fractions liquides de digestat qui contiennent des nutriments tels que N et P.

Nous avons aussi sélectionné et identifié (*Desmodesmus)* une souche moins classique qui est bien adaptée aux eaux saumâtres telles que celles issues des digesteurs.

Sur les photos ci-dessus on voit la serre expérimentale, les trois pilotes avec airlift et l'éclairage artificiel

Par contre, les productivités obtenues (de l'ordre de 1,3 g MS m^{-2} J^{-1}) restent assez limitées et inférieures aux productivités que l'on peut obtenir pour ces mêmes souches dans des conditions optimales. En fait la salinité relativement élevée des digestats, ainsi que leur forte coloration, malgré un passage par technologie membranaire, pénalisent la photosynthèse. Dans ce cas il faudrait, pour améliorer la productivité, travailler sur des fractions moins concentrées et avec une plus grande limpidité.

Enfin, nous avons développé des méthodologies de mesures des transferts de masse (transferts d'oxygène, mais aussi, nettement plus délicats, des transferts de CO_2) sur les pilotes installés dans les serres de Faascht puis sur des installations en vraie grandeur. Cela permet de dimensionner des installations avec Chenal algal couplé à un airlift en vue de réduire la consommation énergétique de l'installation et d'optimiser l'apport en CO_2 pour accroître la productivité. En effet, la culture d'algues en Chenal est généralement limitée par la teneur en carbone inorganique (CO_2). Un apport en CO_2 permet alors d'augmenter la productivité et offre une opportunité de constituer un puits à carbone.

Notons que dans le cadre du projet Perséphone, les algues n'étaient pas valorisées, mais leur contenu énergétique a été évalué, car dans le cas présent la valorisation la plus évidente serait d'envoyer la biomasse algale sur le digesteur de manière à accroître la production de biogaz, tout en traitant les effluents issus du digesteur.

2. Etat des lieux des unités couplant culture de microalgues et unités de méthanisation sur le territoire de la Grande Région

Agria Grand Est

La Grande Région ne dispose pour l'instant pas de nombreux exemples de couplage entre biométhanisation et culture de microalgues (1 seul recensé à date). Toutefois, sur l'ensemble du territoire français métropolitain on dénombre une petite dizaine d'installations de ce type.

Il est intéressant de noter que ces unités ont de nombreux points communs :

- Elles sont **récentes** (2013 pour la plus ancienne et d'autres sont encore en projet) ;
- Elles sont **associées à des méthaniseurs agricoles de puissance moyenne 160 - 250 kW ;**
- Elles utilisent un **procédé de culture des microalgues en bassin sous serre** ;
- Elles produisent de la **spiruline** ;

- La **lumière utilisée est naturelle ;**
- Elles utilisent **la chaleur de la méthanisation** mais aucune ne valorise le digestat comme milieu de culture ;
- Les rendements annoncés sont compris entre **1 et 2 kg MS/m²/an** ;
- Les microalgues produites sont orientées vers le marché de l'alimentation humaine en circuit court.

Le modèle décrit ci-dessus semble bien adapté à des installations de méthanisation de type « méthanisation à la ferme ». Toutefois, il peut être pertinent d'envisager d'autres modèles adaptés à des unités d'envergure plus importante (unités de méthanisation collectives, industrielles ou territoriales). En effet, des quantités de chaleur disponible plus élevées pourraient par exemple permettre un dimensionnement de la production de microalgues assez important pour justifier les investissements de départ plus conséquents nécessaires à la mise en place d'une culture en photobioréacteurs. Les paramètres mieux contrôlés de ce mode de culture pourraient à leur tour permettre de cultiver une plus grande variété de souches et envisager de nouveaux débouchés.

3. Revue scientifique et technique concernant la culture de microalgues sur du digestat

AGRIA GRAND EST

Ainsi, l'ensemble des publications étudiées ont montré que l'utilisation du digestat liquide comme milieu de culture pour des microalgues est possible et va permettre à la fois d'obtenir une biomasse d'intérêt tout en épurant cet effluent.

Toutefois la forte **turbidité du digestat**, qui va diminuer la transmittance de la lumière incidente, ainsi que son **importante concentration en azote ammoniacal**, qui, à des valeurs élevées, est toxique pour les microalgues, vont nécessiter sa dilution et/ou l'application de pré-traitements. Ces opérations vont générer une consommation d'eau importante, ainsi qu'un coût économique et énergétique non négligeable. Le bilan environnemental et économique de la culture en est donc impacté négativement et l'intérêt de valoriser un effluent s'en trouve amoindri.

Peu de travaux ont été conduits sur digestat pur, mais ceux réalisés sont encourageants et tendent à montrer que cette piste est à creuser, notamment via l'usage de souches mutantes.

Le digestat pose une autre problématique, celle de la limitation en nutriment : **limitation en carbone** d'une part et **limitation en phosphore** d'autre part. Résoudre cette problématique via une supplémentation va permettre d'améliorer la productivité et par voie de conséquence l'efficacité épuratoire.

Pour le carbone notamment il serait intéressant de développer un process permettant d'enrichir l'effluents, notamment en valorisant le CO_2 de la méthanisation afin d'optimiser les coûts et le bilan environnemental.

Enfin, il faut noter que les ressources disponibles décrivent essentiellement des expérimentations menées en conditions contrôlées (photobioréacteur) à petite échelle. Il sera donc important d'évaluer également la culture de microalgues sur digestat dans des bassins sous serre à grande échelle.

Par ailleurs, dans des process en continu, d'autres paramètres que la concentration et la composition initiales du digestat seront également à prendre en compte, comme la fréquence de récolte et la quantité récoltée.

Action 5 : Le digestat et ses fractions en substitution aux engrais chimiques ; impact sur les sols et la qualité des eaux

1. Le digestat et ses fractions en substitution aux engrais chimiques

AGRA OST

Introduction

Cinq sites ont été retenus afin de tester nos variantes de fertilisation. Ils se dispersent sur les différents versants de la Grande Région, et présentent une variété de conditions climatiques et de types de sols. La localisation de nos vitrines en prairie de fauche est donnée ci-dessous.

1. Grendel (Attert, BE)
2. Emmels (Saint-Vith, BE)
3. Steinborn (DE)
4. Erpeldange (LU)
5. La Bouzule (Nancy, FR)

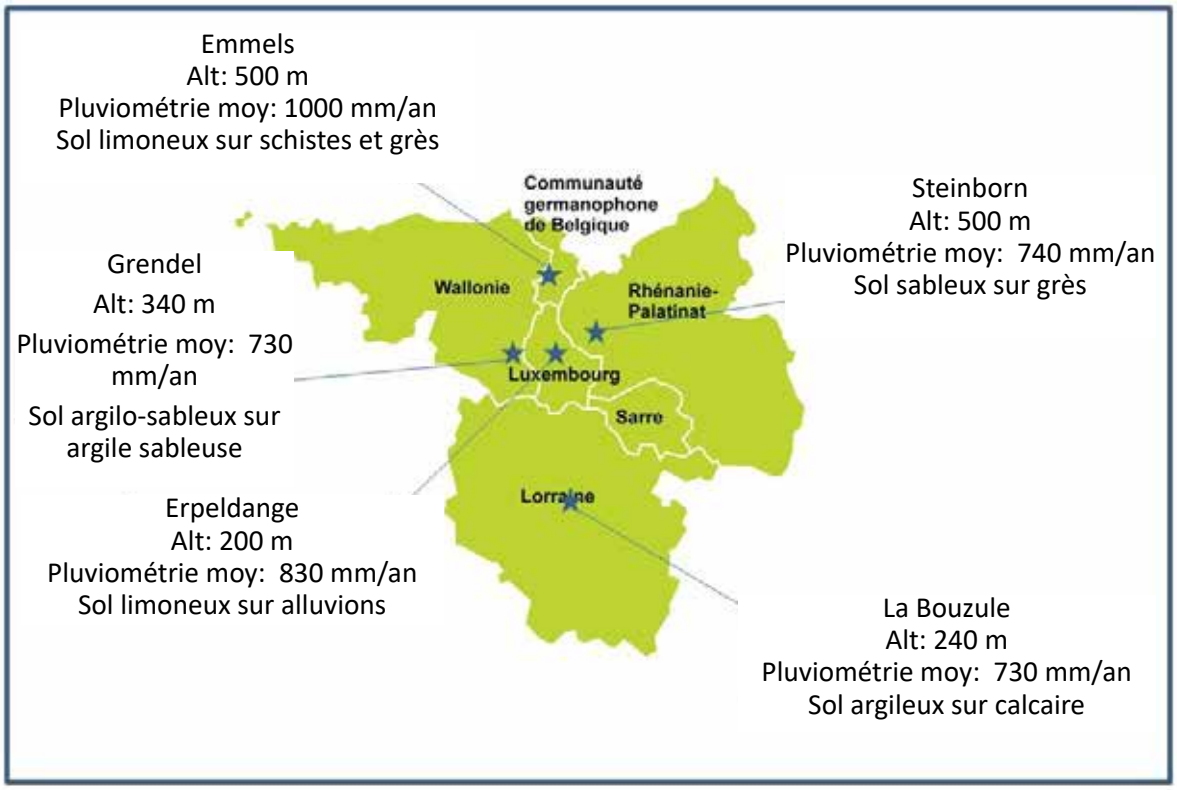


Figure 1 : Localisation des vitrines agronomiques (fond de carte extrait de http://www.luxembourg.public.lu/fr/cartes-du-luxembourg/11-grande-region/index.html)

Historique d'utilisation des sites

Les essais sur les parcelles expérimentales ont pour la plupart débuté en fin d'hiver 2017. Le site de Grendel-Faascht fonctionnait déjà comme parcelle d'essai depuis 2014.

Sur le site français de La Bouzule, deux parcelles expérimentales ont été installées :

- une en prairie permanente, avec cette affectation depuis de nombreuses années
- l'autre en prairie temporaire, ayant été cultivée en maïs l'année précédente l'implantation.

Les sites de Grendel-Faascht, Emmels et Erpeldange sont implantés dans des prairies permanentes. Le site de Steinborn est implanté dans une prairie temporaire.

Propriétés des sols

Des prélèvements ont été faits à la fin de l'hiver 2017, dans les parties du site non influencées par les essais.

La granulométrie des sols des sites est représentée ci-dessous, en distinguant la couche arable (0-30 cm) et le bas du profil (69-90 cm).

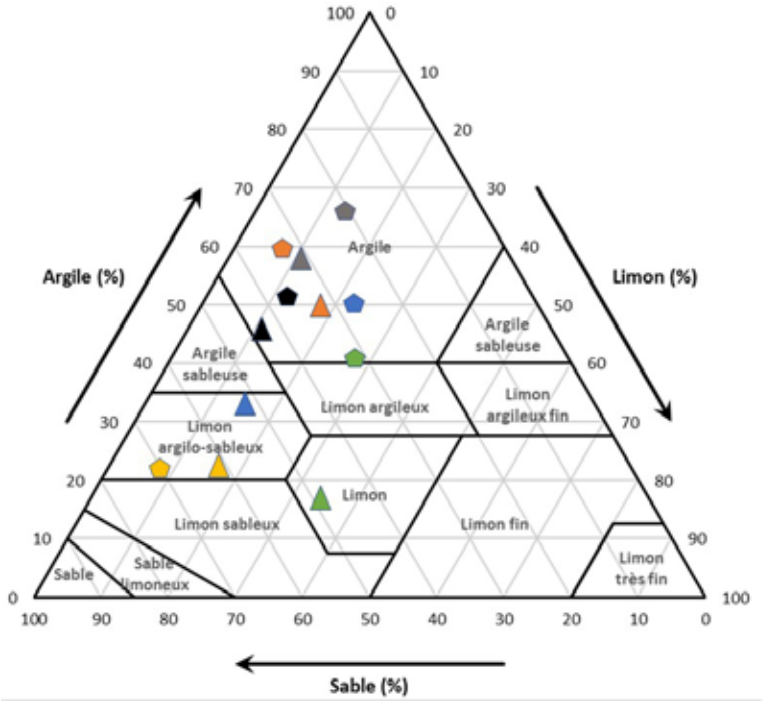


Figure 2 : Granulométrie

Les sols des sites de La Bouzule développés sur un substratum calcaire sont à dominante argileuse. C'est aussi le cas de manière générale pour ceux de Grendel-Faascht, bien que dans ce cas une hétérogénéité soit observée avec des couches sableuses intercalées dans les profils.

A Erpeldange, dans un site de fond de vallée implanté sur des alluvions, une certaine hétérogénéité est également observée, le sommet du profil étant un limon argilo-sableux, le bas plus argileux, avec localement des lits de gravier.

Steinborn, avec un substratum de grès, est caractérisé par des sols plus sableux.

Les sols de Emmels, sur un substratum schisto-gréseux, sont limoneux en surface, plus argileux en profondeur.

Les pH (eau et KCl) ont été mesurés, de même que la capacité d'échange cationique et le taux de saturation en bases.

Sol (profondeur en cm)	pH eau	pH $_{eau}$ moins pH $_{KCl}$	pH KCl	CEC mmole/ kg	% Na	% K	% Mg	% Ca	Taux saturation bases %
Erpeldange (0-30)	6,6	1,4	5,2	30,7	0,7	0,7	2,6	19,9	24,0
Erpeldange (30-60)	7,2	2,0	5,3	28,5	0,9	0,6	1,9	14,6	17,9
Erpeldange (60-90)	7,4	1,8	5,6	30,2	0,7	0,7	2,6	12,8	16,8
Faascht (0-30)	7,2	1,8	5,4	25,0	0,9	0,9	4,9	17,9	24,7
Faascht (30-60)	7,7	3,0	4,7	27,6	0,7	0,8	3,4	11,6	16,5
Faascht (60-90)	7,2	3,1	4,1	29,4	0,3	0,9	3,6	9,2	14,0
Emmels (0-30)	6,5	1,8	4,7	20,4	1,5	2,1	5,0	27,2	35,7
Emmels (30-60)	5,8	1,1	4,7	20,2	1,2	0,7	2,4	14,7	19,0
Emmels (60-90)	5,6	0,8	4,8	20,3	0,5	0,7	2,6	13,8	17,6
Steinborn (0-30)	6,2	0,9	5,3	17,2	1,6	4,0	6,1	28,0	39,7
Steinborn (30-60)	6,0	1,0	5,0	15,9	1,6	3,3	5,2	23,3	33,4
Steinborn (60-90)	5,4	1,2	4,2	17,4	0,7	2,0	2,4	14,7	19,8
Bouzule Temp. (0-30)	7,4	-0,1	7,5	25,1	0,5	1,9	1,3	51,9	55,5
Bouzule Temp. (30-60)	7,7	0,1	7,6	21,2	0,7	1,5	1,6	61,3	65,1
Bouzule Temp. (60-90)	7,8	0,2	7,6	17,1	1,5	1,5	2,9	92,6	98,5
Bouzule Perm. (0-30)	7,6	0,5	7,1	18,4	1,1	4,3	2,8	83,3	91,6
Bouzule Perm. (30-60)	7,9	0,5	7,4	17,2	2,4	4,0	2,2	78,0	86,6
Bouzule Perm. (60-9)0	8,0	0,4	7,6	18,9	0,6	2,7	2,3	71,7	77,4

Figure 3 : Relation pH – taux de saturation en base

Les sols de la Bouzule se distinguent par des pH plus élevés (surtout pour le pH KCl), par une faible différence entre les pH eau et KCl et par un taux de saturation en base élevé, avec le calcium qui domine largement. Cela correspond à la nature calcaire de la roche mère.

Les sites d'Erpeldange et de Faascht ont des pH eau proches de la neutralité, des pH KCl nettement plus acides, un taux de saturation en bases faible et donc une réserve d'acidité importante.

Les sites d'Emmels et de Steinborn ont des pH eau légèrement acides, des pH KCl nettement plus acides, un taux de saturation en bases faible et donc une réserve d'acidité importante.

Les teneurs en azote et phosphore ainsi que la teneur en matière organique ont été dosées.

Variantes

Sur ces sites d'essais nous testons jusque 21 variantes qui sont les suivantes :

- Sans fertilisation (témoin)
- Digestat brut de référence (230 unités azote par hectare)
- Digestat brut local (230 U de N/ha)
- Digestat phase liquide de référence (230 U de N/ha)
- Digestat phase solide de référence (230 U de N/ha)
- Digestat granulé de référence (230 U de N/ha)
- Lisier brut local (230 U de N/ha)
- Concentré Nano Filtration (230 U de N/ha)
- Concentré Osmose inverse liquide (230 U de N/ha)
- Nitrate d'ammonium (230 U de N/ha)
- Digestat brut local (350 U de N/ha)

- Digestat brut de référence (350 U de N/ha)
- Digestat brut de référence (230 U de N/ha) + Sulfate d'ammoniaque (120 U de N/ha)
- Digestat brut de référence (230 U de N/ha) + Nitrate de calcium (120 U de N/ha)
- Digestat brut de référence (230 U de N/ha) + Urée (120 U de N/ha)
- Digestat brut de référence (170 U de N/ha) + Sulfate d'ammoniaque (60 U de N/ha)
- Digestat brut de référence (170 U de N/ha) + Nitrate de calcium (60 U de N/ha)
- Digestat brut de référence (170 U de N/ha) + Urée (60 U de N/ha)
- Sulfate d'ammonium (350 U de N/ha)
- Nitrate de calcium (350 U de N/ha)
- Nitrate d'ammonium (350 U de N/ha)
- Urée (350 U de N/ha)

Le terme « local » signifie que le fertilisant provient de la zone proche du site d'étude. Par exemple, le lisier épandu sur la parcelle d'Erpledange est fourni par un agriculteur du village d'Erpeldange. Le lisier local épandu sera donc différent sur les 5 parcelles du plan expérimental. Cette variabilité sera compensée par l'introduction d'un digestat de référence et hygiénisé et une analyse des différents lisiers afin d'apporter une quantité d'azote équivalente sur tous les sites.

Toutes ces variantes ne sont pas menées sur les cinq sites. Les variantes testées sur l'ensemble des sites sont :

- Sans fertilisation (témoin)
- Digestat brut de référence (230 unités N par hectare)
- Digestat brut local (230 U de N/ha)
- Lisier brut (230 U de N/ha)
- Nitrate d'ammonium (230 U de N/ha)

Ce sont ces variantes dont nous détaillerons les résultats ci-après.

Gestion des parcelles : fertilisation et récoltes

Les engrais sont fractionnés en quatre apports (un apport après chaque coupe) selon le modèle suivant :

Dose appliquée	Épandage			
	Fraction 1	Fraction 2	Fraction 3	Fraction 4
230 U de N/ha	100 U	45 U	40 U	45 U
350 U de N/ha	100 U	100 U	100 U	50 U
170 U de Norg/ha + 60 U de Nmin/ha	100	35	0	35
	0	10	40	10
230 U de Norg/ha + 120 U de Nmin/ha	100 U	45 U	40 U	45 U
	0 U	50 U	60 U	10 U

Légende : U = unité ; N/ha = azote total par hectare ; Norg/ha = Azote sous forme organique par hectare ; Nmin/ha = Azote sous forme minéral par hectare

Avantages de la fertilisation organique

En plus d'être des fertilisants, les matières organiques permettent d'apporter l'ensemble des éléments essentiels aux plantes. Les compositions de nos lisiers et digestat sont repris dans le tableau ci-après. Nous avons également calculé la fumure de fond réalisé grâce à l'épandage du lisier ou digestat. Le cout de revient et l'économie permise en fumure de fond rendent l'utilisation des matières organiques nettement plus rentable que l'utilisation de l'engrais chimique (nitrate d'ammoniaque)

Fertilisation de 230 u.N	Lisier bovin	Digestat	Nitrate d'ammonium
Éléments en kg par tonne produit			
MS %	7,7	6,3	
N total (Kg/t)	3,5	5,3	270
P2O5 (Kg/t)	1,8	2	
K2O (Kg/t)	4,1	4	
CaO (Kg/t)	2,1	2,5	
Valeur agronomique/tonne produit frais	7,72 €	8,36 €	200 €
Quantité à épandre	65,7 m³/ha	43,4 m³/ha	851 kg/ha
Prix épandage	2,3 €/m³ (injection)	2,3 €/m³ (injection)	25 €/ha
Coût financier pour un épandage de 230 u	151 €	100 €	195 € (170 + 25 €)
Économie par ha de fumure de fond (P2O5, K2O, CaO)	347 €	242,8 €	0,00 €
Ce qui correspond à	Soit 118 u de P2O5, 270 u de K2O, 137 u de CaO 170 VN	Soit 87 u de P2O5, 173 u de K2O, 108 u de CaO 140 VN	
Rendement MS	6,0 t/ha	6,2 t/ha	7,3 t/ha
Coût à la tonne de matière sèche produite	25 €	16 €	27 €

Résultats

Sur la figure 4 ci-dessous nous constatons que les tendances générales sont identiques quel que soit le site. On constate que la variante qui produit le plus de fourrage est la variante nitrate d'ammonium. En moyenne cette variante produit 1 tonne de fourrage (MS) en plus que les variantes à la fertilisation organique. Au sein des fertilisants organiques, les digestats, locaux ou de de référence, produisent 0.5 tonne de fourrage (MS) en plus que le lisier. Les parcelles témoins sont quant à elle de manière générale 1 à 2 tonnes moins productives que les variantes fertilisées.

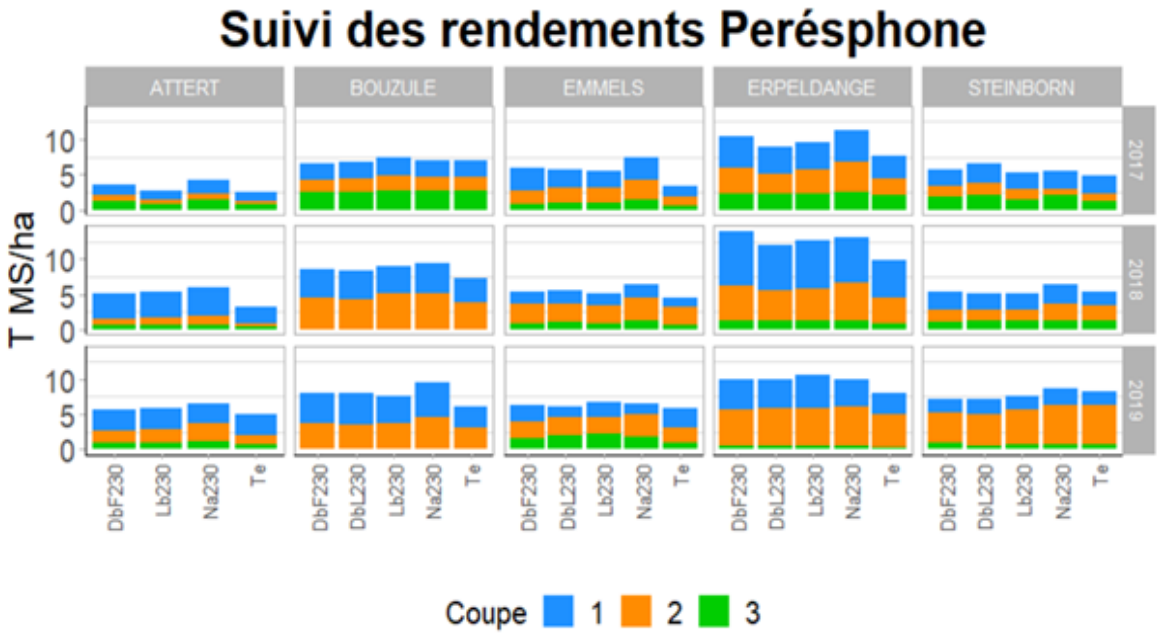


Figure 4 : Rendement en tonne de matière sèche par hectare en fonction de la fertilisation. A l'exception du témoin, les parcelles ont reçu l'équivalant de 230 U de N/ha.

D'un point de vue du contenu protéique du fourrage, les variantes fertilisées avec du digestat ont plus de protéines que la parcelle témoin et obtiennent des valeurs semblables au nitrate d'ammonium (+-14 %). Les variantes fertilisées avec le lisier obtiennent les meilleurs taux de protéine (15 %).

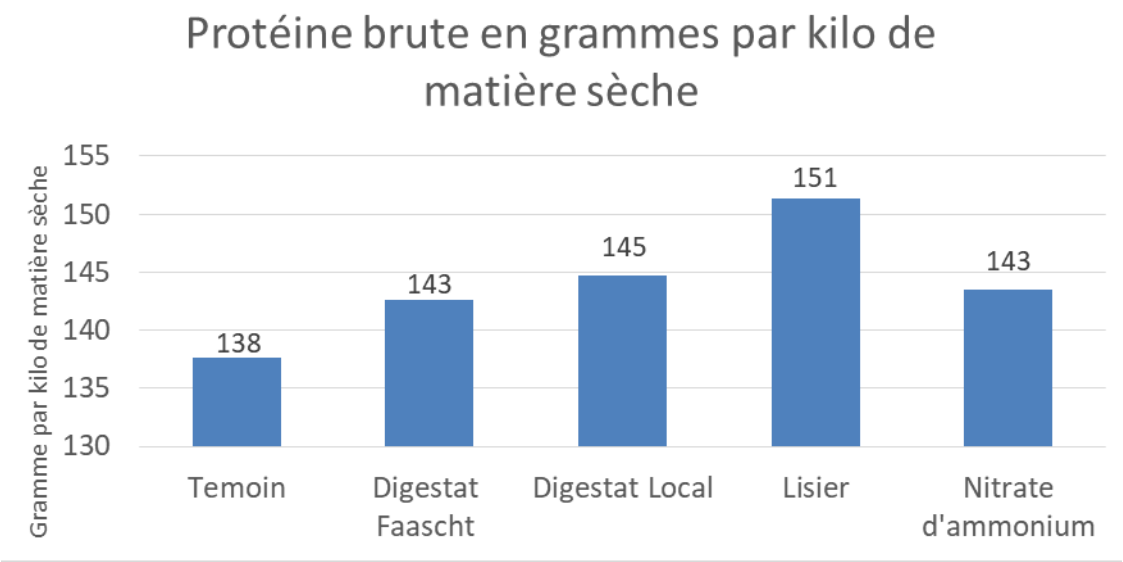


Figure 5 : Protéine brute en grammes par kilo de matière sèche (année 2017)

L'efficience est la quantité d'azote exportée lors de la récolte en comparaison à la quantité d'azote appliquée. L'efficience du digestat est légèrement supérieure à celle du lisier. Les valeurs moyennes étant de 15 %. C'est néanmoins deux fois moins important que l'efficience du nitrate d'ammonium. D'où l'importance de travailler dans de bonnes conditions météorologiques lors de l'épandage du digestat dans le but de limiter les pertes d'ammoniac par volatilisation.

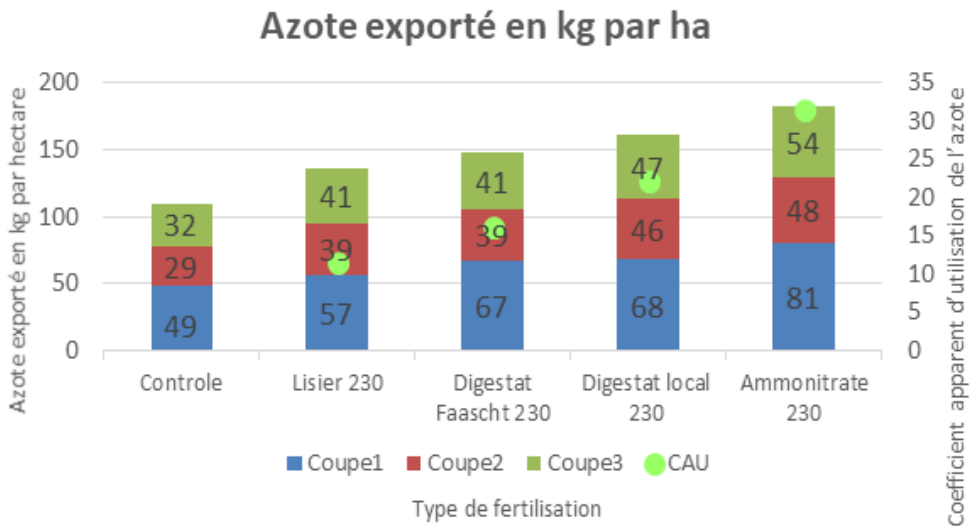


Figure 6 : Exportations azotées et coefficient apparent d'utilisation (CAU) de la fertilisation en % (année 2017)

Les résultats obtenus pour l'azote potentiellement lessivable (APL) sont très intéressants. En effet, l'épandage de digestat, malgré une fertilisation non raisonnée, n'a pas pour effet d'augmenter significativement les valeurs APL (en moyenne 40 kg de N-NO3-) par rapport au témoin (moyenne de 35 kg de N-NO3-). Contrairement à la fertilisation chimique qui elle voit l'APL fortement augmenter pour atteindre des valeurs moyennes de 70 kg de N-NO3-. Le lisier obtient quant à lui des résultats intermédiaires.

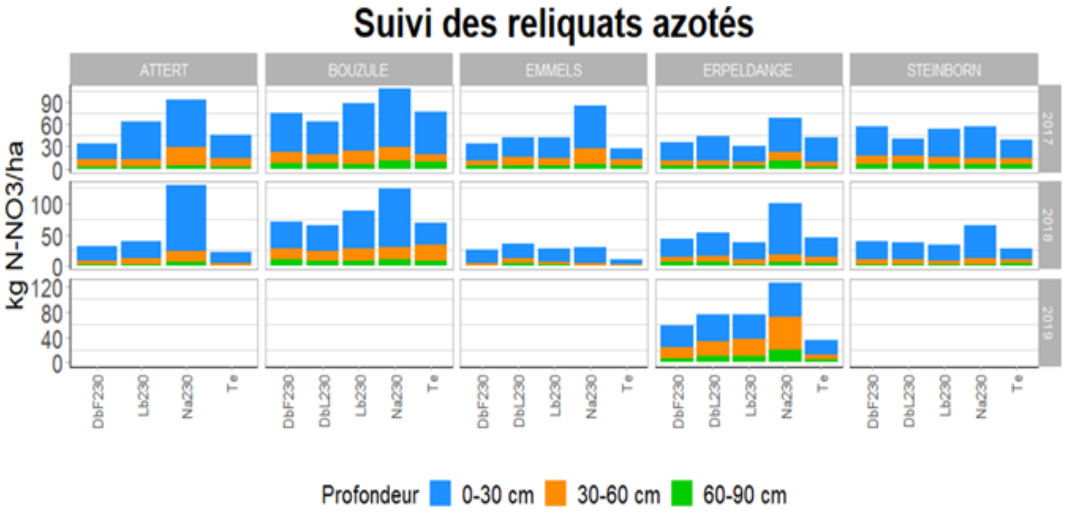
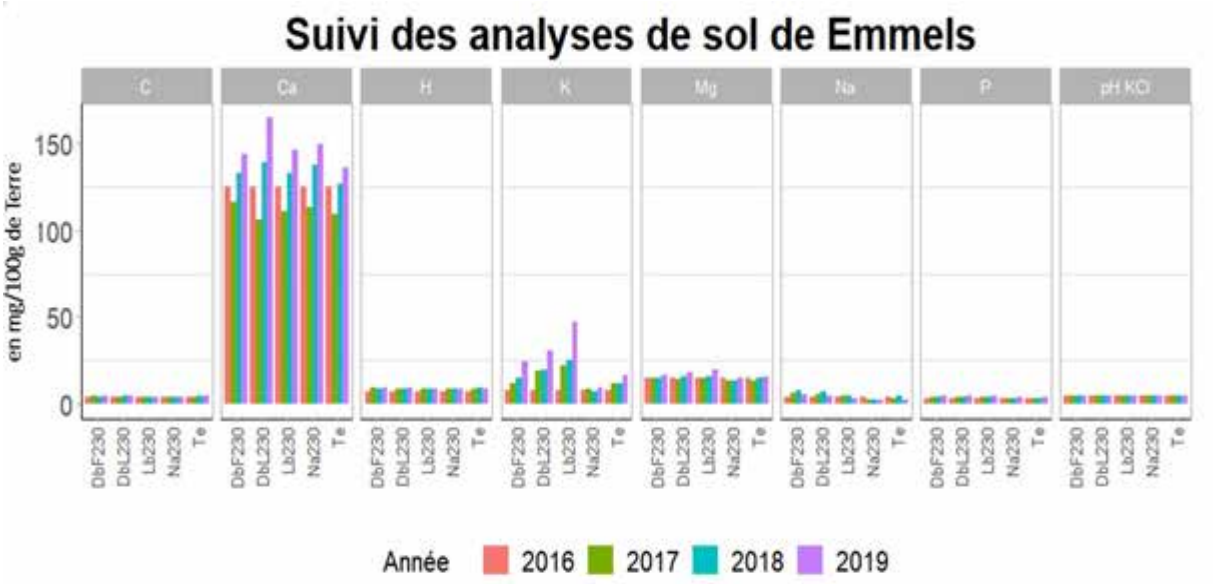


Figure 7 : Azote potentiellement lessivable en kg de N-NO_3^-

Évolution des teneurs en éléments nutritifs des sols :



L'utilisation des matières organiques et plus particulièrement du digestat permet à la teneur en Ca, K, Mg, Na du sol d'être augmentée. Cette plus grande disponibilité est un avantage certain qui permet à terme de diminuer les fumures de fonds additionnelles à la fertilisation. Les tendances sont encore légères mais il apparait une augmentation du taux de carbone dans le sol. Une augmentation du carbone dans le sol peut permettre au sol de mieux résister aux sécheresses et donc assurer une production de fourrage en conditions climatiques difficiles.

2. Impact sur la qualité des eaux

ULIÈGE

Les bougies poreuses sont des dispositifs qui permettent de collecter l'eau interstitielle du sol (figure 1). Le vide est créé dans la bougie grâce à une pompe à vide. Un bouchon muni d'un tuyau, pincé une fois le vide créé, permet le maintien du vide dans la bougie. Le bout en céramique de la bougie va aspirer l'eau du sol, qui est ensuite collectée avec un tuyau rigide connecté à un flacon de recueillement. Le vide est créé dans ce flacon ce qui permet l'aspiration de l'eau. Les nitrates présents dans cette eau sont dosés en laboratoire.

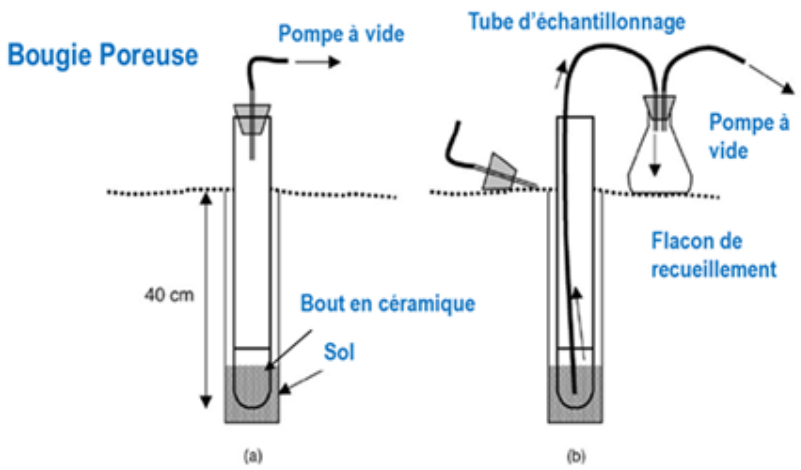


Figure 1 Schéma du dispositif d'une bougie poreuse. (https://www.fire.upmc.fr/abac/?q=node/2)

Au début du projet, le protocole expérimental était ambitieux. Trop de bougies ont été placées sur le site d'essai de Faascht et l'échantillonnage était impossible à réaliser sur une journée. Les résultats montrent que le protocole n'était pas adapté (figure 2) : de nombreuses données sont manquantes et les résultats sont hétérogènes. Ces premières campagnes de mesure n'ont pas permis de détecter les tendances saisonnières ni l'influence des variantes.

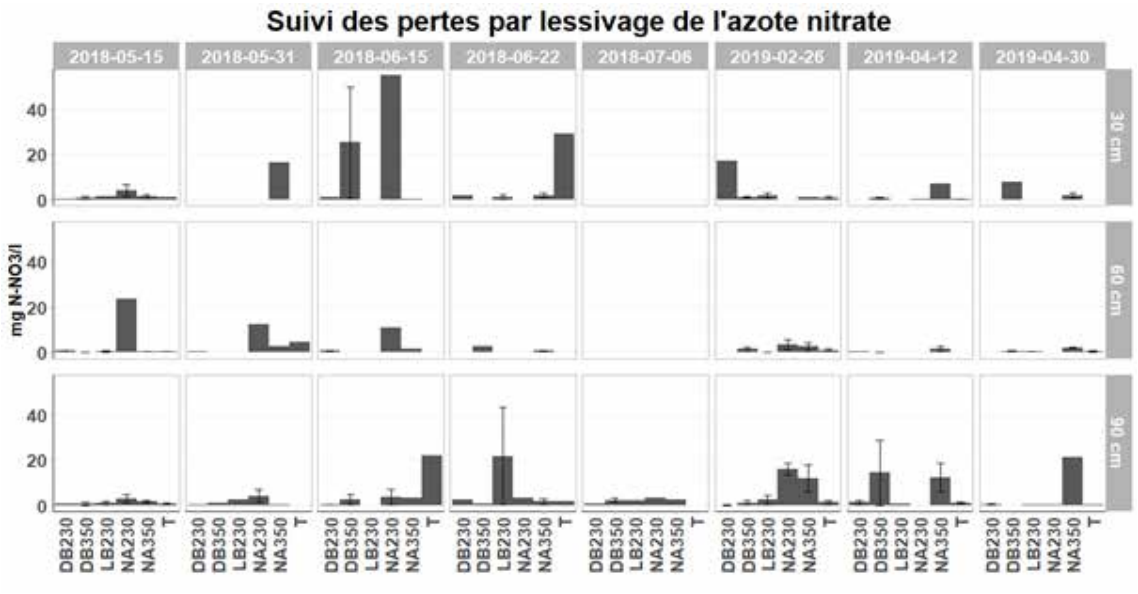


Figure 2 Suivi des pertes par lessivage des nitrates lors du début du projet. DB230 = Digestat brut 230 unités d'azote ; DB350 = Digestat brut 350 unités d'azote ; LB230 = Lisier brut 230 unités d'azote ; NA230 = Ammonitrate 230 unités d'azote ; NA350 = Ammonitrate 350 unités d'azote ; T = Témoin

Le protocole a donc été revu. Le nombre de variantes suivies a été réduit à 6, ce qui fait un total de 54 bougies à entretenir. L'entretien et le prélèvement des bougies pouvaient ainsi être réalisés sur une journée. Sur le terrain, le premier constat a été une diminution de l'encrassement des bougies, ce qui a permis de diminuer les contaminations extérieures de l'eau prélevée.

Les données récoltées après le changement de protocole ont permis d'obtenir des résultats qui montrent des tendances similaires pour chaque campagne de prélèvement (figure 3) :

- En automne 2019, les valeurs obtenues étaient beaucoup plus importantes. A cette époque de l'année, la végétation rentre dans une phase de ralentissement de son développement, ce qui implique une diminution de consommation d'éléments nutritifs. Un apport d'azote, sous forme de nitrate, à cette époque engendre une forte augmentation des risques de pertes de nitrate par lessivage. Un engrais organique doit être minéralisé, pour cela il faut que le sol soit chaud pour que les microorganismes du sol soient actifs. Ce sont les conditions optimales de croissance des plantes. En fin d'hiver et au printemps (janvier 2020 à mars 2020), les plus fortes concentrations

en nitrates sont trouvées à 90 cm de profondeur. Cette période correspond à la remise en route de la végétation, les plantes pompent les éléments nutritifs dont elles ont besoin afin de démarrer leur croissance. Les plantes assimilent les éléments nutritifs dans les premiers centimètres du sol qui se réchauffent, permettant la minéralisation de l'azote ainsi disponible pour les racines. De plus, durant l'hiver, dans les couches profondes du sol, l'azote est lessivé suite aux fortes précipitations et à l'inactivité de la végétation. L'azote retrouvé à 90 cm est le résultat probable de ce phénomène.

- Il semble que les variantes d'ammonitrate 350 unités sont responsables des concentrations les plus élevées en nitrates. Ce constat est en accord avec les résultats obtenus avec les APL. L'explication provient d'un surdosage de ces engrais à un moment où la plante n'en avait pas besoin, car l'activité du sol est suffisante pour couvrir les besoins azotés de la plante.

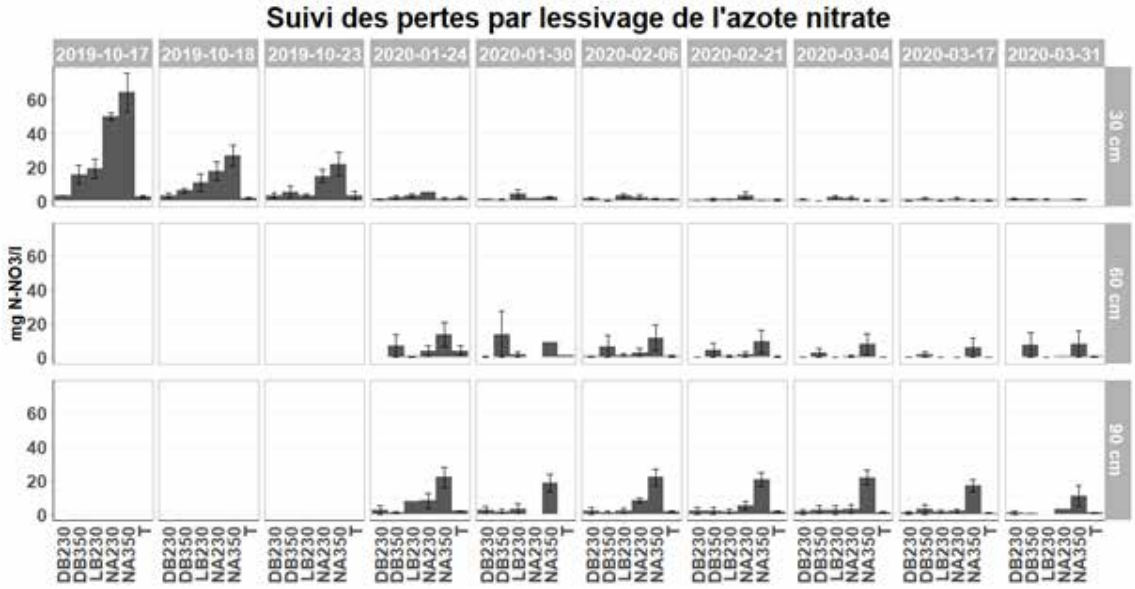


Figure 3 Suivi des pertes par lessivage des nitrates après modification du protocole expérimental. DB230 = Digestat brut 230 unités d'azote ; DB350 = Digestat brut 350 unités d'azote ; LB230 = Lisier brut 230 unités d'azote ; NA230 = Ammonitrate 230 unités d'azote ; NA350 = Ammonitrate 350 unités d'azote ; T = Témoin. Pour les dates du 17/10, 18/10 et 23/10/2019, les données pour profondeurs de 60 et 90 cm sont manquante à cause du manque d'eau lier à la sécheresse estivale.

Sur les deux dernières années (2019 et 2020), un problème additionnel est le manque d'eau au printemps et en été. Le prélèvement d'eau dans les bougies poreuses a donc été impossible pour ces périodes et notamment d'avril 2019 à octobre 2019.

Selon l'organisation mondiale de la santé (OMS), la concentration en nitrate ne doit pas dépasser 50 mg/l pour les eaux destinées à la consommation humaine, afin d'éviter des effets négatifs sur la santé. Les concentrations de 20 mg/l retrouvées dans les couches profondes, au printemps, sur les parcelles fertilisées avec de l'ammonitrate, posent question quant au risque de pollution des eaux de consommation. Pour ce qui est des variantes organiques, aucune concentration potentiellement problématique pour la nappe phréatique n'a été détectée.

3. Impact sur le fonctionnement microbien du sol

ULORRAINE - ENSAIA

Pour caractériser le fonctionnement du sol, nous avons suivi deux fois par an, différents indicateurs relatifs à la taille du compartiment microbien (biomasse microbienne carbonée et azotée), son activité (enzymes marqueurs impliquées dans la minéralisation des matières organiques en lien avec les cycles du carbone, de l'azote, du soufre et du phosphore) ainsi que les pools extractibles de carbone et azote total (facilement utilisables par les microorganismes du sol pour assurer leur croissance) et d'azote minéral (notamment les ions nitrates et ammonium essentiels à la croissance des plantes et des microorganismes).

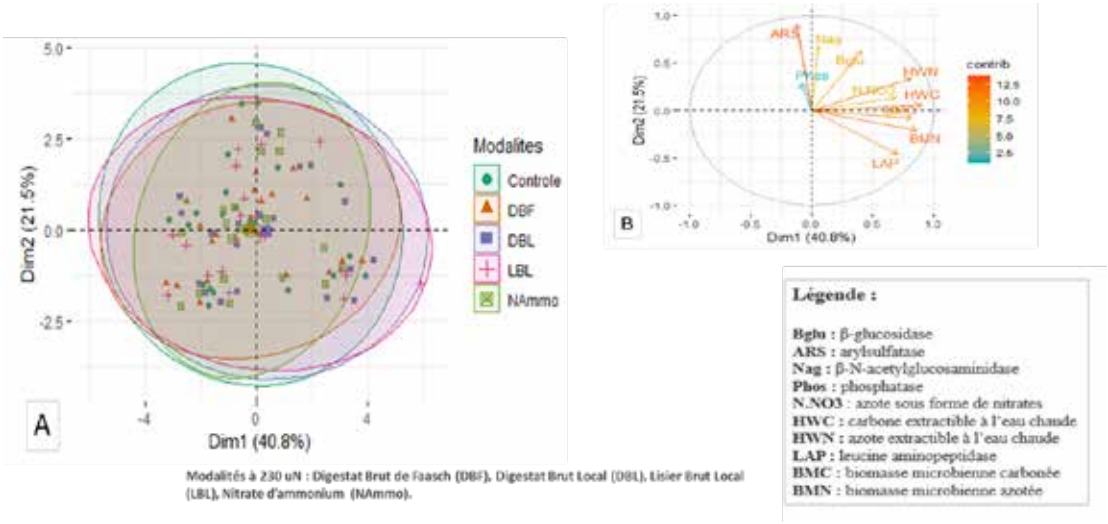


Figure 3 : Analyse en composantes principales (dimensions 1 et 2) effectuée sur les 5 modalités de fertilisation pour l'ensemble des sites en mars 2019. Les individus sont regroupés sur le graphique A selon la variable illustrative « modalité de fertilisation » et les variables de construction du plan factoriel sont représentées sur le cercle des corrélations sur le graphique B.

La figure 3A qui met en évidence le positionnement des individus dans le plan factoriel déterminé par l'ensemble des variables mesurées (figure 3B), permet de voir que l'ensemble des individus ne sont pas situés selon les mêmes coordonnées sur les deux axes du plan factoriel. Les cercles correspondent à l'intervalle de confiance des valeurs prises par les individus appartenant à chaque modalité de fertilisation. Ces cercles se chevauchent les uns les autres ce qui suggère **qu'au bout de deux années de mise en place des essais, il n'est pas encore possible de distinguer d'effet des modalités de fertilisation sur le fonctionnement microbien du sol et ce notamment car l'effet des conditions pédoclimatiques est supérieur au régime de fertilisation**. **L'application de digestats n'a pas d'effets délétères sur le fonctionnement microbien des sols à l'issue des deux premières campagnes d'épandage**.

LIST

Les expériences en plein champ qui ont été menées lors de ce projet aux différents sites de la Grande Région ont servi de tests grandeur réelle pour appuyer et valider nos hypothèses. La contribution du LIST, en étroite collaboration avec l'ensemble des partenaires impliqués dans cette action, a permis de délivrer des résultats qui renforcent le rôle des résidus liquides de biométhanisation vis-à-vis de la stabilité dans le sol et d'une utilisation optimisée par les plantes de l'azote épandu, ainsi qu'un intérêt réel de l'utilisation des résidus solides séchés pour favoriser la stabilité du carbone dans le sol sur le long terme. Ces travaux ont fait l'objet de plusieurs publications référencées ci-dessous.

La première partie de ces travaux était d'évaluer le potentiel des résidus de biogaz en remplacement des engrais chimiques. Les données acquises lors des prélèvements saisonniers et de l'analyse des résidus azotés au sein des sols pendant plus de 5 années ont été exploitées dans ce sens. Nous apportons de solides arguments en faveur d'un remplacement partiel des engrais de synthèse par des digestats de biométhanisation. Ceci permet en effet de réduire significativement les pertes en azote sous forme de nitrates dans les sols sous prairies, comme évalué sur le site expérimental de Faascht. Ceci contribuerait potentiellement à la réduction des concentrations en nitrates au sein des eaux souterraines et de surface drainant les zones agricoles. Nous pensons également que les traitements de fertilisation à base de digestats de biométhanisation permettent de gérer le stock d'azote organique sur le plus long terme au sein des sols de la Grande Région.

La seconde partie de ces travaux s'est focalisée sur le potentiel agronomique des granulés de biométhanisation, résidus solides séchés, et de positionner les résidus de biogaz dans la bataille pour la séquestration du carbone au sein des sols. Une expérience de décomposition *in sacco*, à 10 cm de profondeur, a été menée pour évaluer la double propriété potentielle de cette fraction en granulés en tant que source nutritionnelle et pour améliorer la séquestration du carbone lorsqu'elle est appliquée sous forme de matière organique exogène sur les sols sous prairies. En outre, pour résoudre la controverse concernant l'impact de l'ajout externe d'azote sur la décomposition de la matière organique et la séquestration du carbone, nous avons appliqué ce protocole à deux des prairies permanentes

expérimentales de la Grande Région pour tester l'impact du traitement de fertilisation pendant une période de neuf mois (printemps-automne 2018). La décomposition et les changements des teneurs en carbone et azote des granulés après neuf mois d'incubation ont été évalués en mesurant la perte de masse, le statut total en carbone et azote et la composition des fibres de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. Les résultats suggèrent que les résidus de biogaz granulés sont un biofertilisant ayant le potentiel de fournir progressivement des nutriments au microbiote du sol et de favoriser la séquestration du carbone dans les sols des prairies de la Grande Région. Ils ont également démontré l'effet accélérateur du nitrate d'ammonium et de l'urée sur la décomposition de la matière organique et la perte du carbone au sein de ces sols.

Un troisième volet de ces travaux, encore en cours en fin de projet, est d'identifier les communautés bactériennes et fongiques intervenant dans la décomposition des matières organiques exogènes dans les sols de prairie traités avec différents engrais azotés, dont les résidus liquides de biogaz. Pour ce faire, les sols des diverses parcelles expérimentales de Faascht et de la Bouzule ont été prélevés trois fois par an, en mars, juin et octobre en 2018 et 2019. Les 850 échantillons récoltés permettront de caractériser la diversité et l'activité de la flore microbienne en fonction des traitements de fertilisation. Les données générées sont en traitement via l'outil bio-informatique pour obtenir la composition proprement dite des communautés microbiennes et ne sont pas encore disponibles.

Références

Tsachidou B., Hissler C., Delfosse P. (2020) Biogas Residues in the Battle for Terrestrial Carbon Sequestration. ERCIM News 121: 19. ()

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 of the Walloon Region. Sci. Tot. Environ. 666: 212-225.

Tsachidou B., Delfosse P., Hissler C. (2018) PERSEPHONE: Using biogas Residues to Mitigate Agricultural Nitrogen Pollution. ERCIM News 113: 39-40. (doi:)

Action 6 : Introduction des services écosytémiques et amélioration de la protection des eaux par le biogaz

IZES

1. Introduction

Des installations de biogaz comptent parmi les principaux producteurs l'électricité dans le domaine de l'utilisation de la biomasse. En parallèle avec la construction d'installations de biogaz, leur importance a également augmenté dans l'agriculture. Aujourd'hui, la production de biogaz est fortement liée à l'espace rural. La production de biogaz peut amener des changements directs et indirects dans l'espace rural, parce que la nature, le sol, l'eau et le paysage sont impactés par la plantation, l'utilisation et la valorisation de plantes pour la production du biogaz. Par l'intégration du biogaz dans la production agricole, beaucoup de fonctions de protection peuvent être améliorées.

2. Forces et faiblesses du biogaz

En référence à la production de biogaz, on parle régulièrement d'une régression de la biodiversité. Mais ceci n'est pas forcément le cas, parce que la culture de la biomasse peut aussi servir au maintien de la biodiversité. La gamme des plantes utilisables pour la production du biogaz est plus large qu'à l'époque pour des raisons économiques. Des services écosystémiques produisent le lien entre les services écologiques pour le bien-être humain, pour ainsi illustrer l'effet de l'intervention humaine sur l'écosystème (Bouwma et al. 2018).

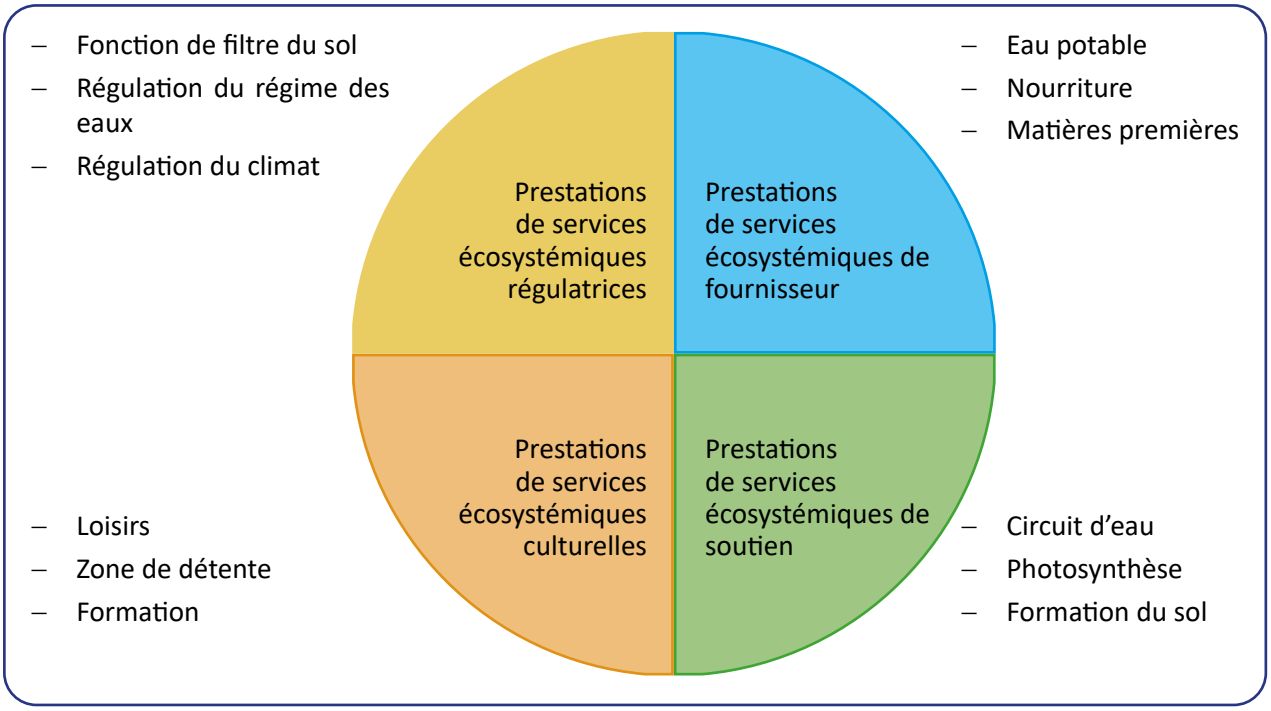


Illustration 1 Graphique services écosystémiques (basé sur Daily 1997)

Ces effets sont surtout évidents lors de la production des substrats, de la procédure de production et du management du digestat. Les effets peuvent avoir aussi bien des influences positives que négatives sur les services écosystémiques. La forme de l'effet dépend toujours de la manipulation et souvent des manipulations incorrectes de substrats, de digestats et des erreurs de production lors de la production de biogaz peuvent avoir des effets négatifs. En respectant les règles de gestion durable, les effets positifs de l'utilisation de biogaz sont plus visibles.

Si on regarde les influences écologiques du biogaz sur l'espace rural, il y a des réponses diverses en fonction des questions et de l'espace considéré. Pour décrire le fonctionnement réel du biogaz dans

l'espace rural, des forces et des faiblesses doivent être définies.

En principe, des forces et des faiblesses du biogaz sont présentes en nombre pratiquement identique (voir graphique 2). La plupart des faiblesses apparaissent néanmoins quand la culture des substrats se fait en monocultures, que la production du biogaz ne se passe pas correctement et que les digestats ne sont pas épandus soigneusement. Beaucoup de faiblesses d'une production de biogaz peuvent être évitées si on agit dans le sens du développement durable. Dans le cadre de la loi sur les énergies renouvelables, des principes de durabilité sont fixés et servent à réduire au maximum les faiblesses du biogaz. Si ces exigences sont respectées, les avantages écologiques pour les espaces ruraux prévalent. Par des incitations monétaires dans le cadre de la CEE, on essaie également de maîtriser la culture et l'utilisation des substrats.

Globalement ces forces peuvent se résumer comme des services systèmes, parce que le biogaz n'est pas seulement important pour la production d'énergie, mais remplit d'autres fonctions pour d'autres sections de domaines et écosystèmes.

	Forces écologiques	**Faiblesses écologiques**
Matières d'apport	Culture énergétique comme monoculture : – de nouveaux marchés pour des produits agricoles Utilisation de déchets communaux et d'engrais agricoles pour la production d'énergie : – Contribution d'économie circulaire – Utilisation en cascade (premièrement comme énergie, ensuite comme engrais), contribue à la valeur ajoutée régionale – Réductions des émissions qui existaient avant par le stockage des engrais agricoles	Culture énergétique comme monoculture : – Danger d'érosion et de lessivage des éléments nutritifs – Risque plus élevé d'infestation parasitaire – Diminution de la biodiversité – Fatigue des sols – Influences sur le régime des eaux – Réduction de la couche d'humus – Concurrence d'espaces avec la production alimentaire – Modification de la transpiration et de la capacité de réflectivité des rayons solaires par le retournement important des prairies et les conséquences sur le climat régional
Epandage du digestat	– Moins d'odeurs désagréables que lors de l'épandage de lisier – Destruction de germes de mauvaises herbes et de germes pathogènes – Réduction du danger de surfertilisation et un effet positif sur la qualité des eaux souterraines – Meilleure disponibilité de l'azote sous forme de digestat à la place du lisier	– Émissions de gaz à effet de serre et lessivage des éléments nutritifs par un épandage mal géré

Illustration 2 : Forces et faiblesses de la production de biogaz (IZES 2018)

3. Possibilités d'intégration de la protection de l'eau dans la production de substrat pour le biogaz

Les installations de biogaz se sont développées ces dernières années comme un composant principal de la transition énergétique. Dans le même temps, la demande de terres agricoles pour les installations de biogaz s'est accrue ce qui a entraîné une discussion sur les conséquences de la culture du substrat. Notamment l'érosion des sols et une grande pollution des eaux souterraines par le nitrate sont reliées avec l'agriculture et surtout la culture du maïs (Linhart und Dhungel, 2013). Pour la production de biogaz environ 1,55 Mio ha de substrats pour les installations de biogaz ont été cultivés en 2019 en Allemagne (BMEL 2020). Le maïs avec 62 % des surfaces représente la culture énergétique la plus importante. À cause de ses bonnes qualités pour la production de biogaz (coûts spécifiques de culture faibles, des techniques de culture fortement optimisées, progrès de la sélection) un remplacement par d'autres plantes n'est que difficilement réalisable pour des raisons économiques. Mais il y a eu dans le passé plusieurs problèmes liés à la culture du maïs. Cela concerne le danger d'érosion par la lente croissance des plantes au printemps, les problèmes d'acceptation du public (Rüskamp 2010) et l'utilisation importante de fertilisants, qui est également rendue responsable de la pollution par les nitrates des eaux souterraines (Buttlar und Willms 2016). En raison de la forte concentration de nitrates dans les nappes phréatiques, des installations coûteuses d'élimination des nitrates doivent être mises en place dans le cadre de l'approvisionnement en eau potable. Une approche financière potentielle vise à comparer les coûts du traitement de l'eau potable avec des économies d'eau (N, P) par l'intégration d'une installation de biogaz avec une culture de substrat optimisée et une gestion de la fermentation résiduelle.

Le silfe est une plante prometteuse. Comme légumineuse pluriannuelle elle peut lier elle-même l'azote dans le sol et agir positivement sur les organismes présents dans le sol et la fertilité du sol. Comme alternative au maïs, le silfe convainc par les grandes quantités et le rendement de méthane et est ainsi fait pour le substrat dans les installations de biogaz. Mais des essais ont également démontré qu'avec le grand rendement de ces plantes, comme d'autres, elles ont un taux de nitrate corrélé (LTZ 2012). Dans le projet Perséphone, on a déterminé la part des coûts de traitement imputables à l'agriculture et la manière de les réduire au moyen d'une autre culture de substrat. À l'aide d'un exemple d'une installation de biogaz avec 500 kWel. puissance nominale et 4.700 d'heures de production, différents modèles d'optimisation ont été calculés. Il a été démontré que par rapport au kilowattheure produit (el.) seulement une part de max. 0,33 cent est économisée du côté de la gestion des eaux ou peut être remboursée par elle. Il a été démontré que, dans le meilleur cas, la surface comme dans le scénario de référence (maïs) est maintenue, mais que parallèlement l'installation est optimisée sur le rendement d'énergie réduit du nouveau mélange des substrats. Des coûts augmentent de 2,18 cents/kWhel.. Dans la majeure partie des régions, les coûts de traitement ne sont pas assez élevés pour que la culture alternative puisse être rentable. Néanmoins, le modèle peut être intéressant dans des régions qui ont une pollution grave par les nitrates des eaux souterraines, c'est-à-dire une réalisation économique du modèle est ici possible. La même chose est valable pour des régions dans lesquelles les eaux souterraines sont un facteur économique majeur. Il faut citer l'industrie des boissons qui aurait, sur la base des valeurs de vente de l'eau supérieures et des facteurs de publicité supplémentaires positifs, le potentiel de soutenir une culture de substrat alternative (voir BfN 2009).

4. Conclusion

L'agriculture et donc aussi la production de biogaz, ont la chance d'apporter une contribution importante à l'amélioration de la qualité des eaux. Comme presque toutes les biomasses peuvent être fermentées dans les installations de biogaz, elles sont pratiquement prédestinées à utiliser une large et variable rotation des cultures. Par une rotation de culture variée dans laquelle le maïs trouve également sa place, le danger de l'érosion des sols peut en plus être diminué. La protection des masses d'eaux est une tâche importante de l'agriculture et par l'intégration du biogaz dans la production agricole, beaucoup de facteurs de protection peuvent être améliorés. D'autant plus que ceci est aussi valable pour la branche du biogaz qui doit appliquer des mesures qui améliorent l'état des eaux. Une potentielle approche de financement pourrait être la réduction des coûts pour le traitement des eaux potables par l'intégration d'une installation de biogaz avec une culture de substrats optimisée et un management des digestats.

5. Références

BfN (2009): Wasserversorgungsunternehmen bezahlen Landwirte für grundwasserschonende und biodiversitätsfreundliche Landbewirtschaftung, Bundesamt für Naturschutz, 13. Mai 2009, Bonn https://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/themen/oekonomie/dokumente/topf_schweppe-kraft_2009_pes_water.pdf [16.07.2019]

BMEL (2020): Statistisches Jahrbuch über Ernährung Landwirtschaft und Forsten 2019, 62. Jahrgang Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Bonn

Bouwma, Irene; Schleyer, Christian; Primmer, Eeva; Winkler, Klara Johanna; Berry, Pam; Young, Juliette et al. (2018): Adoption of the ecosystem services concept in EU policies. In: Ecosystem Services 29, S. 213–222.

Buttlar, C. von; Willms, M. (2016): Bewertung des Energiepflanzenanbaus für Biogasanlagen vor dem Hintergrund der Anforderungen der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie. In: Berichte über Landwirtschaft 94 (2). DOI: 10.12767/buel.v94i2.121.g293.

Linhart, E., A.-K. Dhungel (2013): Das Thema Vermaisung im öffentlichen Diskurs, Berichte über Landwirtschaft, Band 91, Heft 2, August 2013, Hg. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, ISSN 3296-5099 https://buel.bmel.de/index.php/buel/article/view/22/linhart-html

LTZ (2012): Erste Versuchsergebnisse mit der Durchwachsenen Silphie (Silphium perfoliatum L.) in Baden-Württemberg Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ) Karlsruhe

Rüskamp, W. (2010): Man sieht die Landschaft vor lauter Mais nicht mehr. Badische Zeitung, Rheintal 17.09.2010. Hg. Badische Zeitung. http://www.badische-zeitung.de/suedwest-1/man-sieht-die-landschaft-vor-lauter-mais-nicht-mehr--35524272.html [Stand: 05.02.2018]

Action 7 : Impacts environnementaux et faisabilité économique des actions 3 à 6

IZES

1. Introduction

Le projet Perséphone diversifie la gamme des produits de la production du biogaz et analyse les possibilités techniques en fonction des exploitations individuelles. Notamment l'importance de la protection climatique et les aspects positifs pour les espaces ruraux structurellement faibles ne sont souvent pas pris en compte. Les opinions et les attitudes par rapport au biogaz varient selon les régions, mais souvent le biogaz est réduit aux services de fournitures d'électricité et de chaleur. Les multiples possibilités de contribution des installations de biogaz au sens de la bio-économie restent inaperçues.

2. Le biogaz et la contribution à la protection du climat

L'utilisation de la biomasse pour la production d'énergie a des effets positifs directs sur le climat si des sources énergétiques fossiles sont écartées, qui ont généralement des émissions de gaz à effet de serre plus élevées durant leur cycle de vie. Mais il y a souvent encore dans le fonctionnement en cours des potentiels d'optimisation, qui en cas d'une mise en œuvre amènent le fait que l'électricité produite sur la base du biogaz prouve notamment dans le domaine de la protection du climat et de l'utilisation des ressources une bien meilleure efficacité environnementale que les sources énergétiques fossiles. Ces potentiels d'optimisation des installations de biogaz par des exploitations alternatives de l'électricité, de la chaleur et du digestat en intégrant des services systèmes indirects sont le sujet principal de Perséphone.

Dans une analyse du cycle de vie, toutes les émissions qui apparaissent durant la vie de la biomasse, sauf les émissions directes lors de l'utilisation finale (les émissions directes correspondent à la quantité CO_2 liée photosynthétiquement dans la biomasse), sont calculées ensemble et attribuées à une unité fonctionnellement (ici 1 kWh). Selon l'apport de substrat utilisé pour la production, se trouvent dans la chaîne en amont de la culture de la biomasse des facteurs déterminants sensibles aux engrais azotés et aux carburants pour le travail du sol, la récolte et la logistique. Les mesures efficaces de la protection du climat doivent prendre en considération qu'à l'avenir il y aura aussi dans la chaîne en amont spécifiquement moins d'émissions. Aujourd'hui, il est encore incertain de déterminer l'étendue de l'utilisation des carburants et aussi des engrais sur la base des énergies renouvelables et de déterminer la contribution de la réduction des émissions indirectes dans les chaînes en amont.

Concernant l'utilisation des engrais agricoles (lisier et fumier), il faut prendre en considération que ceux-ci, entreposés conventionnellement (c'est-à-dire à ciel ouvert) et lors d'un épandage conventionnel, émettent des émissions diffuses de méthane et de protoxyde d'azote. Comme le méthane a un impact sur le climat 23 fois plus élevé (Global Warming Potential - GWP) et le protoxyde un GWP de 265, même des émissions faibles de ces deux gaz à effet de serre ont un effet important sur le bilan des émissions de gaz à effet de serre. Dans les deux cas l'utilisation des résidus par le processus biogaz assure que les résidus restent pendant un certain temps dans un endroit étanche (digesteur) et ainsi les émissions peuvent être nettement réduites. En plus, les émissions d'ammoniaque des excréments liquides et solides provenant d'animaux se réduisent dans un stockage étanche.

3. Aspects macro-économiques du biogaz ou l'intégration du biogaz dans la bioéconomie

Le biogaz comme fournisseur d'électricité est connu, mais néanmoins les installations de biogaz influencent de nombreux autres domaines en dehors du système d'énergie. Une réduction de biogaz sur le secteur électricité prend donc en compte les effets de la production de biogaz d'une manière très unilatérale. Les différentes fonctions ne consistent pas seulement dans les services dans le marché de l'électricité. Le graphique 3 montre les services en dehors du secteur de l'énergie. Il s'agit d'aspects

supplémentaires, p.ex. de l'entretien des paysages, de la protection de la nature, de la structure agricole, de la politique de la gestion des déchets et des ressources ou de la protection contre des émissions polluantes. Comme prestateur de service multifonctionnel, le biogaz a en plus un effet positif dans d'autres secteurs en baissant les coûts ou en apportant une plus grande valeur ajoutée (Guss u. a. 2016).

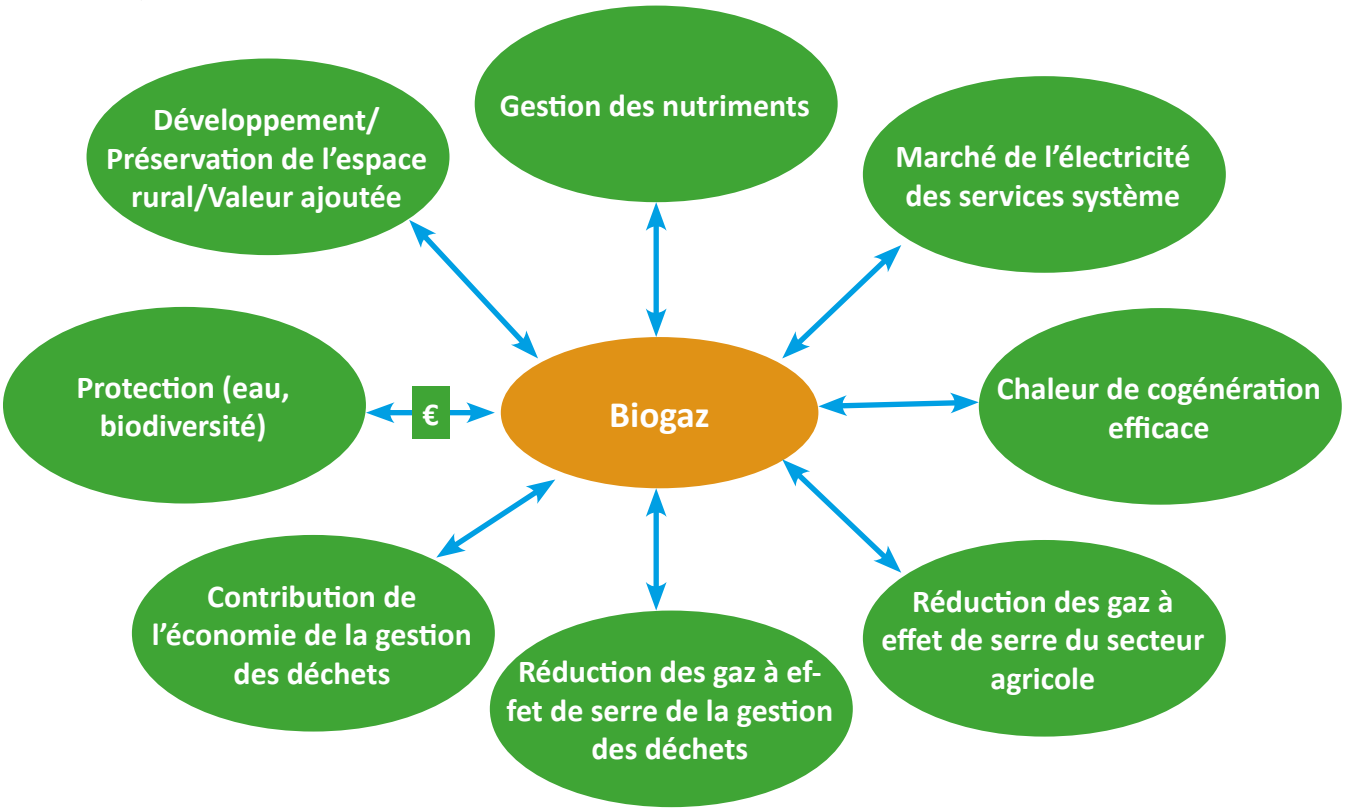


Image 3 : Effets généraux économiques du biogaz (Représentation d'Izes)

La production de bioénergie a notamment influencé le secteur agricole, parce que d'abord beaucoup d'exploitations agricoles ont investi dans ce domaine. Ainsi des agriculteurs ont pu stabiliser leurs revenus qui sont souvent volatiles (Borris, Maart-Nölck 2013) et apporter ainsi un renforcement dans le secteur agricole.

L'utilisation de bioénergie a eu également des effets sur la pratique agricole. Des techniques de culture, la planification de la rotation des cultures, l'utilisation des déchets et des sous-produits ainsi que des stratégies des éléments nutritifs adaptées peuvent être ajustées au profit de la bioénergie et ainsi atteindre un effet positif sur l'écosystème. Mais il faut tenir compte du fait que la maximisation des rendements de biogaz peut aussi apporter des détériorations de l'écosystème (FNR 2013).

Les services écosystémiques sur lesquels le biogaz agit, comprennent le climat et la biodiversité. Outre les effets sur l'environnement, il existe également des interactions entre les installations de biogaz et la structure de l'espace rural. L'accent est mis sur la mise en valeur des terres agricoles et les effets sur l'emploi tout au long de la chaîne de création de valeur.

En dehors de ce domaine, l'utilisation de la bioénergie a une grande influence sur la gestion des déchets. Les installations de biogaz prennent en charge la tâche de valorisation de qualité selon §8 de la loi sur l'économie circulaire (KrWG). Par cette forme d'utilisation, les émissions de gaz à effet de serre dans le domaine de la gestion des déchets peuvent être miminisées. Globalement le biogaz apporte une contribution à l'emploi et à la valeur ajoutée, aussi bien dans le domaine industriel des fabrications des installations que dans l'espace rural. En particulier, la réactivation des terres en jachères pour les cultures énergétiques peut générer une valeur ajoutée supplémentaire sur ces surfaces. Néanmoins, les effets de la valeur ajoutée de cette réactivation restent peu clairs, parce que d'un côté la mise en jachère des surfaces précédente était imputée à la politique européenne et que de l'autre côté les moyens financiers pour la culture énergétique écartent des investissements alternatifs avec une valeur ajoutée correspondante. (Matschoss et al. 2019).

Comparée aux technologies dominantes de la production d'électricité régénérative en Allemagne, l'énergie éolienne et PV, l'utilisation du biogaz génère une part nettement plus importante de valeur ajoutée – et aussi de coûts – dans la phase de fonctionnement de l'installation (Bost et al. 2012; Hirschl et al. 2015). Notamment l'impact sur l'emploi dépend des facteurs spécifiques des régions et des cas, surtout à savoir si des investissements alternatifs ont été faits et lesquels. Il est donc conseillé de considérer les effets de la valeur ajoutée et l'impact sur l'emploi comme co-avantages, mais pas comme raison prioritaire des motifs de financement. (Isermeyer und Zimmer 2006; WBA 2007, 183ff.; Hermeling und Wölfing 2011, S. 82). Une raison est également aussi le fait que des problèmes structurels dans le secteur agricole sont à l'origine du retard de financement du biogaz et que des processus d'adaptation seraient finalement retardés.

4. Conclusion

L'influence du biogaz dans les différents domaines est complexe. La vue globale ci-dessus représente en plus uniquement les liens évidents entre le biogaz et son fonctionnement. Mais il est évident que le biogaz peut atteindre beaucoup d'effets positifs s'il est produit selon les critères d'un développement durable.

Ces effets positifs des différents secteurs apportent au niveau macro et microéconomique une contribution, mais tous les secteurs ne sont pas faits pour la stabilisation financière des installations de biogaz.

5. Références

Borris, Johanna ; Maart-Nölck, Syster: Investition in Biogas: ja oder nein? Eine qualitative Analyse von Entscheidungsgründen landwirtschaftlicher Betriebsleiter. Berichte über Landwirtschaft -und Landwirtschaft. In: Zeitschrift für Agrarpolitik 91 (2013), Nr. 1

Bost, Mark; Böther, Timo; Hirschl, Bernd; Kreuz, Sebastian; Neumann, Anna; Weiß, Julika (2012): Erneuerbare Energien Potenziale in Brandenburg 2030. Erschließbare technische Potenziale sowie Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte – eine szenariobasierte Analyse. Im Auftrag von Greenpeace e. V., Hamburg. iöw. Berlin. Online verfügbar unter https://www.ioew.de/publikation/erneuerbare_energien_potenziale_in_brandenburg_2030

FNR: Bioenergie die vielfältige erneuerbare Energie. 5. überarbeitete Auflage. Gülzow, 2013 (196)

Guss, Hermann ; Pertagnol, Joachim ; Hauser, Eva ; Wern, Bernhard ; Baur, Frank ; Gärtner, Sven ; Rettenmaier, Nils ; Reinhardt, Guido: Biogas – Quo vadis? gefördert durch das BMUB. Saarbrücken, Heidelberg, 2016. – gefördert durch das BMUB

Hermeling, Claudia; Wölfing, Nikolas (2011): Energiepolitische Aspekte der Bioenergienutzung: Nutzungskonkurrenz, Klimaschutz, politische Förderung. Endbericht. Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung (ZEW). Mannheim.

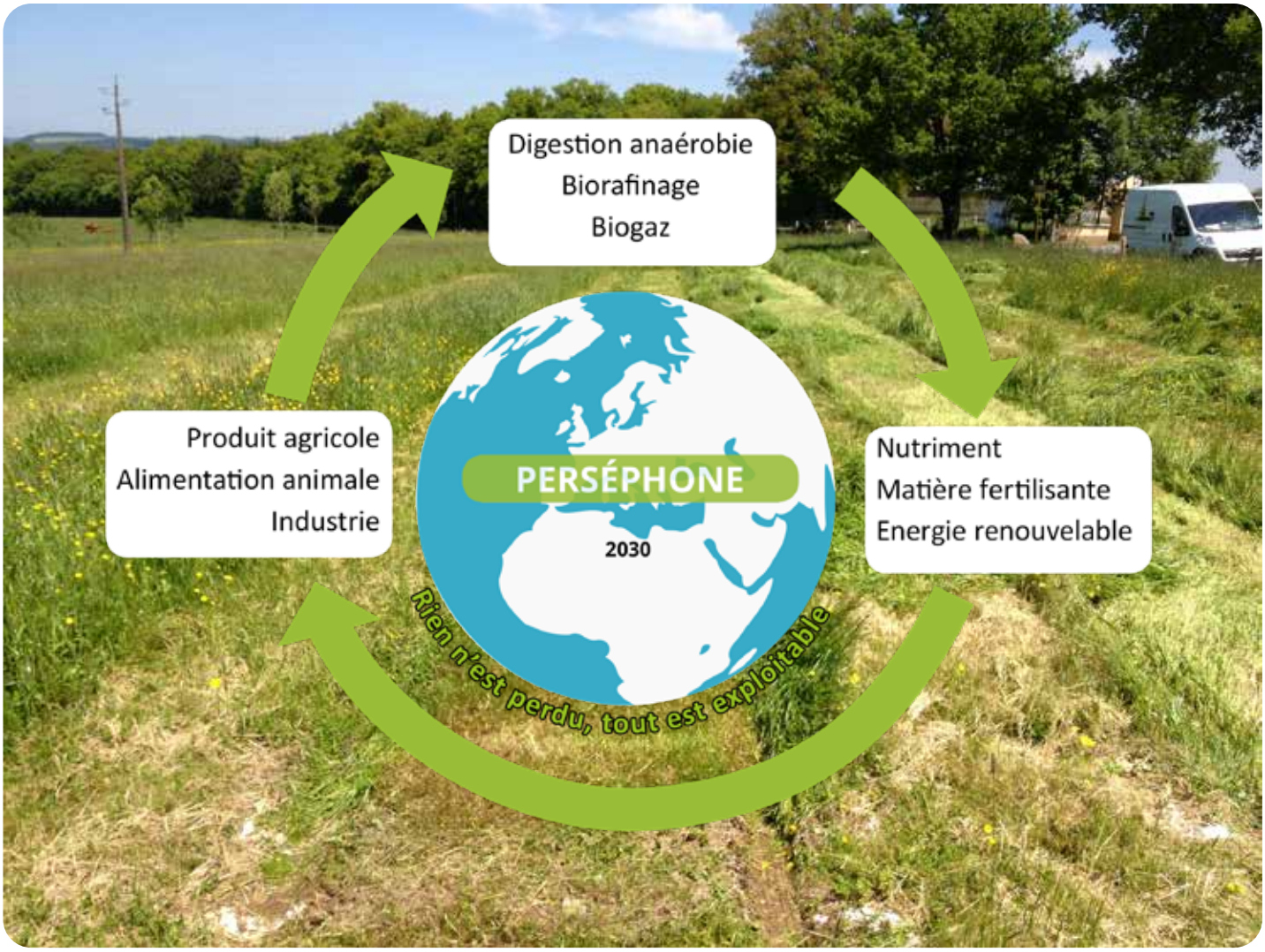
Hirschl, Bernd; Heinbach, Katharina; Prahl, Andreas; Salecki, STeven; Schröder, André; Aretz, Astrid; Weiß, Julika (2015): Wertschöpfung durch Erneuerbare Energien. Ermittlung der Effekte auf Länder- und Bundesebene. Gefördert durch die Bundesrepublik Deutschland. Zuwendungsgeber: Bundesministerium für Wirt-schaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages, FKZ 0325463. Schriftenreihe des IÖW 210/15. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW). Berlin.

Isermeyer, F.; Zimmer, Y. (2006): Thesen zur Bioenergie-Politik in Deutschland. Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Institut für Betriebswirtschaft. Braunschweig (Arbeitsberichte des Bereichs Agrarökonomie, 02/2006).

Matschoss, P.; Pertagnol, J.; Wern, B.; Bur, A.; Baur, F.; Dotzauer, M.; Oehmichen, K.; Koblenz, B.; Khalsa. J.; Korte, K.; Purkus, A.; Thrän, D.; Gawel, E.; Bulach, W. (2019): Analyse der gesamtökonomischen Effekte von Biogasanlagen. Wirkungsabschätzung des EEG (MakroBiogas), Verbundvorhaben gefördert durch die deutsche Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) / Bundesministerium für Landwirtschaft und Ernährung (BMEL). IZES, DBFZ, UfZ. Saarbrücken, Leipzig. DOI: 10.13140/RG.2.2.13184.17920

Perséphone

Intégration de la filière biogaz dans la nouvelle bioéconomie



Contact chef de file :

Asbl Au Pays de l'Attert
Voie de la Liberté 107 - 6717 Attert - Belgique
Tél. : +32 63 22 78 55
asbl.apda@attert.be - www.aupaysdelattert.be/persephone

Au Pays de l'Attert

Interreg Grande Région | Großregion Perséphone
UNION EUROPEENNE
Wallonie
Grand Est
LE GOUVERNEMENT DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
SAARLAND
Ostbelgien