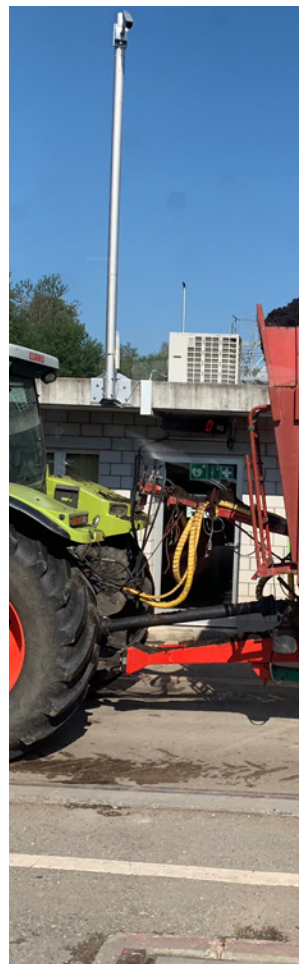


LIVRE BLANC

Production de biogaz à partir d'engrais de ferme en Suisse

potentiel énergétique, développement technologique et mobilisation des ressources

Vanessa Burg, Gillianne Bowman, Oliver Thees, Urs Baier, Serge Biollaz,
Theodoros Damartzis, Jean-Louis Hersener, Jeremy Luterbacher, Hossein Madi,
Francois Maréchal, Emanuele Moioli, Florian Rüschi, Michael Studer,
Jan Van herle, Frédéric Vogel, Oliver Kröcher



Impressum

Vanessa Burg¹, Gillianne Bowman¹, Oliver Thees¹, Urs Baier², Serge Biollaz³, Theodoros Damartzis⁴, Jean-Louis Hersener⁵, Jeremy Luterbacher⁴, Hossein Madi³, Francois Maréchal⁴, Emanuele Moioli³, Florian Rüscher², Michael Studer⁶, Jan Van herle⁴, Frédéric Vogel^{3,7}, Oliver Kröcher^{3,4}

¹ Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL, Birmensdorf

² ZHAW, Université des sciences appliquées de Zurich, Wädenswil

³ PSI, Institut Paul Scherrer, Villigen

⁴ EPFL, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne et Sion

⁵ Bureau d'études Hersener, Wiesendangen

⁶ BFH, Haute école spécialisée de Berne, Zollikofen

⁷ FHNW, Haute école spécialisée de la Suisse du Nord-Ouest, Brugg-Windisch



Citation

Burg, V.; Bowman, G.; Thees, O.; Baier, U.; Biollaz, S.; Damartzis, T.; Hersener, J.-L.; Luterbacher, J.; Madi, H.; Maréchal, F.; Moioli, E.; Rüscher, F.; Studer, M.; Van herle, J.; Vogel, F.; Kröcher, O., 2021: Livre blanc: Production de biogaz à partir d'engrais de ferme en Suisse: potentiel énergétique, développement technologique et mobilisation des ressources. SCCER-BIOSWEET; Birmensdorf, Institut fédéral de recherches WSL. 20 pp.

<https://www.doi.org/10.16904/envidat.257>

Objectif du livre blanc

L'objectif de ce livre blanc est de fournir aux décideurs, aux administrations et aux parties prenantes les résultats de recherche les plus récents afin de promouvoir l'utilisation optimale de la bioénergie issue des engrais de ferme dans la transition énergétique suisse. À cette fin, les résultats du centre de compétence suisse pour la recherche en bioénergie – SCCER BIOSWEET – sont résumés et présentés dans un contexte plus large. Si rien d'autre n'est mentionné, les résultats se réfèrent à la Suisse et, dans le cas de la matière première, aux potentiels nationaux de biomasse.

Photos page de titre: Florian Rüscher (ZHAW), Vanessa Burg (WSL) et Vivienne Schnorf (WSL)

Mise en page: Sandra Gurzeler, WSL

Éditeur

Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL, Birmensdorf, 13.12.2021

Résumé

La Suisse se doit de transformer en profondeur son système énergétique. Afin de trouver des solutions aux défis techniques, sociétaux et politiques liés à cette transition, le Conseil fédéral et le Parlement suisses ont créé en 2014 huit centres de compétences pour la recherche énergétique (SCCER – Swiss Competence Center for Energy Research) pour soutenir la stratégie énergétique 2050. Le SCCER BIOSWEET (BIOmass for SWiss EnErgy fuTure) s’est consacré à la biomasse et sa conversion.

Bien que les processus de production de biogaz soient déjà très évolués et prêts à la mise en œuvre, l’utilisation d’engrais de ferme (fumier et lisier) comme source d’énergie est encore très limitée en Suisse. La digestion anaérobie (DA) est une technologie prometteuse pour générer de l’énergie renouvelable sous forme de chaleur, d’électricité et de carburant à partir d’engrais de ferme. En outre, la DA améliore la qualité des fertilisants et réduit la consommation d’engrais minéraux. Par conséquent, l’engrais de ferme, dont les quantités produites sont élevées en Suisse, doit être considéré comme une ressource locale importante qui peut être exploitée pour la fertilisation des sols, la récupération de nutriments et l’approvisionnement en énergie, avec pour atout supplémentaire une diminution des émissions de gaz à effet de serre.

Dans ce livre blanc, nous analysons la production d’engrais de ferme en Suisse afin d’identifier les raisons de sa faible utilisation comme source d’énergie et d’indiquer des possibilités d’amélioration.

La complexité de cette production (décentralisée, de nature variable, etc.) rend difficile la transformation de cette matière première en différents produits durables. Ainsi, sa valorisation énergétique n’entre pas en concurrence avec d’autres applications. Aujourd’hui, cette valorisation s’effectue avec de petits convertisseurs, qui souffrent du faible rendement de la production électrique à partir du gaz. L’efficacité de la géné-

ration d’énergie à partir de l’engrais de ferme pourrait être améliorée en mettant en œuvre des technologies plus performantes tout au long de la chaîne de traitement de la DA. Il s’agit notamment de la séparation de l’engrais de ferme en fractions solides et liquides et des technologies permettant de parfaire leur prétraitement (prétraitement microbien et thermochimique) ainsi que de la méthanisation, de la purification des gaz et des piles à combustible. Outre la DA, la gazéification hydrothermale et la production de biochar sont des technologies émergentes intéressantes qui présentent un fort potentiel pour la conversion à grande échelle des engrais de ferme. La modélisation globale du système énergétique indique la grande pertinence de l’utilisation de l’engrais de ferme comme source d’énergie.

En résumé, l’utilisation de l’engrais de ferme à des fins énergétiques en Suisse pourrait être beaucoup plus importante qu’elle ne l’est aujourd’hui. La réalisation de ce potentiel passe par le développement des infrastructures de biogaz et des incitations à l’investissement. Outre les avantages environnementaux (en particulier la réduction des émissions de CO₂), la génération d’énergie à partir de l’engrais de ferme, en combinaison avec d’autres énergies renouvelables, contribue à la stabilisation du système énergétique et permet une plus grande indépendance vis-à-vis des sources d’énergie fossile.

Tables des matières

1	Introduction	4
2	Ressources en engrais de ferme	4
3	Évolutions technologiques actuelles	6
3.1	Séparation solide-liquide	6
3.2	Prédigestion microbienne	7
3.3	Prétraitement à la vapeur	8
3.4	Gazéification hydrothermale	8
3.5	Valorisation du carbone dans le biochar	10
3.6	Purification du gaz	10
3.7	Méthanisation catalytique	11
3.8	Méthanisation biologique	12
3.9	Piles à combustible	12
4	Chances et obstacles pour la bioénergie à partir d’engrais de ferme	14
5	La génération de bioénergie à partir des engrais de ferme dans le système énergétique	15
6	Promotion du biogaz issu des engrais de ferme et recommandations	16
7	Conclusion	17
	Remerciements	18
	Références	18

1 Introduction

La Suisse est confrontée à une transformation profonde de son système énergétique. Afin de trouver des solutions aux défis techniques, sociétaux et politiques qui en découlent, le Conseil fédéral et le Parlement ont lancé le plan d'action « Recherche énergétique suisse coordonnée », dans le cadre duquel la Commission suisse pour la technologie et l'innovation (CTI; aujourd'hui Innosuisse), le Fonds national suisse (FNS) et l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) ont été mandatés pour développer et gérer des réseaux de recherche interdisciplinaires entre les hautes écoles. Huit centres de compétences suisses pour la recherche énergétique (SCCER) ont été créés en 2014 pour soutenir la stratégie énergétique 2050 du gouvernement. Dans le cadre du SCCER BIOSWEET (BIOMass for SWiss EnErgy future; www.sccer-biosweet.ch), l'accent se porte sur la biomasse et en particulier sur la recherche et la mise en œuvre de processus de conversion offrant un degré élevé de maturité technologique. Ce programme a conduit à de nombreuses nouvelles perspectives dans le domaine de la bioénergie; le présent document synthétise ses principaux résultats dans le contexte de la transition énergétique en Suisse.

Malgré la quantité considérable d'engrais de ferme (fumier solide et lisier liquide) disponible, et bien que les technologies de production de biogaz soient déjà matures et prêtes à être mise en œuvre, l'utilisation des engrais de ferme comme source d'énergie est encore très limitée en Suisse. Environ 110 installations de biogaz agricole fournissent 1440 térajoules (TJ) par an, dont une partie importante est liée à la fermentation de co-substrats. Aujourd'hui, seule une fraction des engrais de ferme disponibles est donc utilisée à des fins énergétiques. La digestion anaérobie (DA) est une technologie prometteuse pour convertir les engrais de ferme en énergie renouvelable sous forme de chaleur, d'électricité et de carburant. Dans le même temps, elle

entraîne une réduction des gaz à effet de serre émis par les engrais de ferme gérés de manière traditionnelle. En Suisse, l'agriculture est responsable de 12,7% des émissions de gaz à effet de serre (GES), et 19% de celles-ci proviennent du traitement des engrais de ferme. Par conséquent, la DA des engrais de ferme peut contribuer à atteindre une partie des objectifs de la Stratégie énergétique 2050 et à soutenir les engagements de la Suisse dans le cadre de l'Accord de Paris. En outre, la DA augmente la disponibilité des nutriments pour les plantes et restreint l'épandage d'engrais minéraux en les remplaçant par le digestat. L'engrais de ferme doit donc être considéré comme une ressource locale importante qui peut être utilisée à la fois pour la récupération des nutriments (co-substrat) et la génération d'énergie, ce qui permet de réduire les émissions de GES.

Dans ce livre blanc, nous analysons la production d'engrais de ferme en Suisse, nous identifions les raisons de sa faible utilisation à des fins énergétiques et nous indiquons des possibilités d'amélioration. Tout d'abord, nous présentons le contenu en énergie primaire des engrais de ferme ainsi que leur distribution spatiale et leurs hotspots (section 2). Nous décrivons ensuite les développements technologiques récents qui ont été considérés dans le cadre du programme SCCER BIOSWEET et d'autres projets (section 3). Puis nous montrons les atouts de la bioénergie à partir des engrais de ferme, ainsi que les obstacles rencontrés en abordant différents aspects: diminution des GES, perceptions et incitations pour les agriculteurs, chaînes de transport et d'approvisionnement, et autres moyens de valoriser les engrais de ferme (section 4). Nous analysons alors le rôle des engrais de ferme dans le système énergétique par une approche de modélisation (section 5) et nous donnons pour finir des recommandations pour promouvoir l'utilisation énergétique de ceux-ci (section 6).

2 Ressources en engrais de ferme

Le potentiel théorique de la biomasse suisse s'élève à 209 pétajoules (PJ) d'énergie primaire par an (fig. 1), dont environ la moitié provient des forêts (108 PJ) et un quart des engrais de ferme (49 PJ). L'énergie primaire correspond à l'énergie totale contenue dans la ressource et ce, avant toute perte de transformation en énergie secondaire (1 PJ = 10¹⁵ Joule). Ce potentiel correspond à la quantité totale de biomasse produite en un an. L'énergie issue des engrais de ferme pourrait atteindre durablement environ 27 PJ (Burg *et al.* 2018a; Thees *et al.* 2017). Ce chiffre tient compte des pertes subies lorsque les animaux sont au pâturage et des restrictions technico-économiques d'utilisation liées à la répartition spatiale des engrais de ferme (car une quantité minimale produite localement est requise pour la

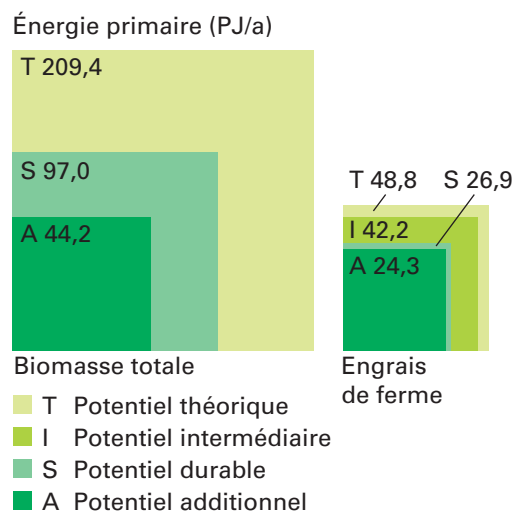


Figure 1: Énergie pouvant être fournie par les engrais de ferme en Suisse

DA). Actuellement, les engrais de ferme sont peu utilisés à des fins énergétiques, principalement pour des raisons économiques. Ils possèdent donc un important potentiel additionnel (24 PJ), représentant 0,57 Mt d'équivalent pétrole ou environ 2,2% de la consommation énergétique brute totale de la Suisse (1103 PJ en 2019 [OFEN 2020]).

Les potentiels estimés des engrais de ferme sont largement répartis dans le pays (fig. 2). Avec des tailles d'exploitation relativement petite (27 unités de gros bétail en moyenne), cette dispersion rend difficile la collecte et l'utilisation des engrais de ferme à des fins énergétiques. Les plus grandes quantités sont disponibles sur le Plateau, où se trouvent la plupart des élevages (dans le canton de Berne, suivi de Lucerne et de Saint-Gall).

Pour promouvoir l'utilisation efficace de la biomasse pour la génération d'énergie, il est important d'identifier et, le cas échéant, de donner la priorité aux régions où le contexte socio-économique et la disponibilité des ressources bioénergétiques sont propices aux investissements dans ce domaine. Par conséquent, Mohr *et al.* (2019) ont cartographié explicitement les potentiels pour déterminer les concentrations de biomasse au niveau des communes, avant de les comparer aux caractéristiques socioéconomiques de ces régions (fig. 3). Ils ont constaté que la production d'engrais de ferme se concentre dans les zones d'agriculture intensive du Plateau central, mais qu'ils sont plus rares dans les Alpes et les régions densément peuplées. Leur analyse statistique a montré que les caractéristiques socio-économiques telles que le revenu des ménages, l'orientation politique et la densité de population différaient forte-

ment entre les zones de forte et de faible production. Par exemple, les attitudes en faveur de la transition énergétique sont en moyenne plus positives dans les zones où les engrais de ferme sont moins abondants. Bien que la comparaison témoigne d'une corrélation plutôt que d'une causalité, elle peut aider à trouver et à exploiter les synergies entre les régions et à transférer les leçons apprises à d'autres projets dans des domaines semblables. Par exemple, les opérateurs ayant réussi des projets de biomasse dans une commune pourraient s'étendre sur des collectivités similaires en termes de disponibilité des bioressources et d'attitudes de la communauté envers les énergies renouvelables.

En 2050, on considère que la quantité d'engrais de ferme disponible pour l'énergie sera similaire aux niveaux actuels (Burg *et al.* 2019). Le potentiel théorique futur est estimé à 49 PJ, tandis que le potentiel durable diminuera légèrement, de moins de 2 PJ (jusqu'à 25 PJ), car les animaux passeront plus de temps dans les pâturages où les déjections ne peuvent être collectées. Ces projections tiennent compte de divers facteurs possibles (par exemple, la croissance démographique, la consommation), mais pas des événements perturbateurs qui ne peuvent être prédits. Par exemple, une diminution soudaine de la consommation de viande pourrait réduire considérablement la disponibilité future des engrais de ferme. L'évaluation à long terme du potentiel des engrais de ferme confirme qu'il y aura suffisamment de matières premières disponibles à l'avenir pour exploiter un nombre d'installations de biogaz (notamment agricoles) beaucoup plus important qu'aujourd'hui.

Énergie primaire (PJ/a)

- 0,0–0,5
- 0,5–1,0
- 1,0–1,5
- 1,5–3,0
- 3,0–6,0

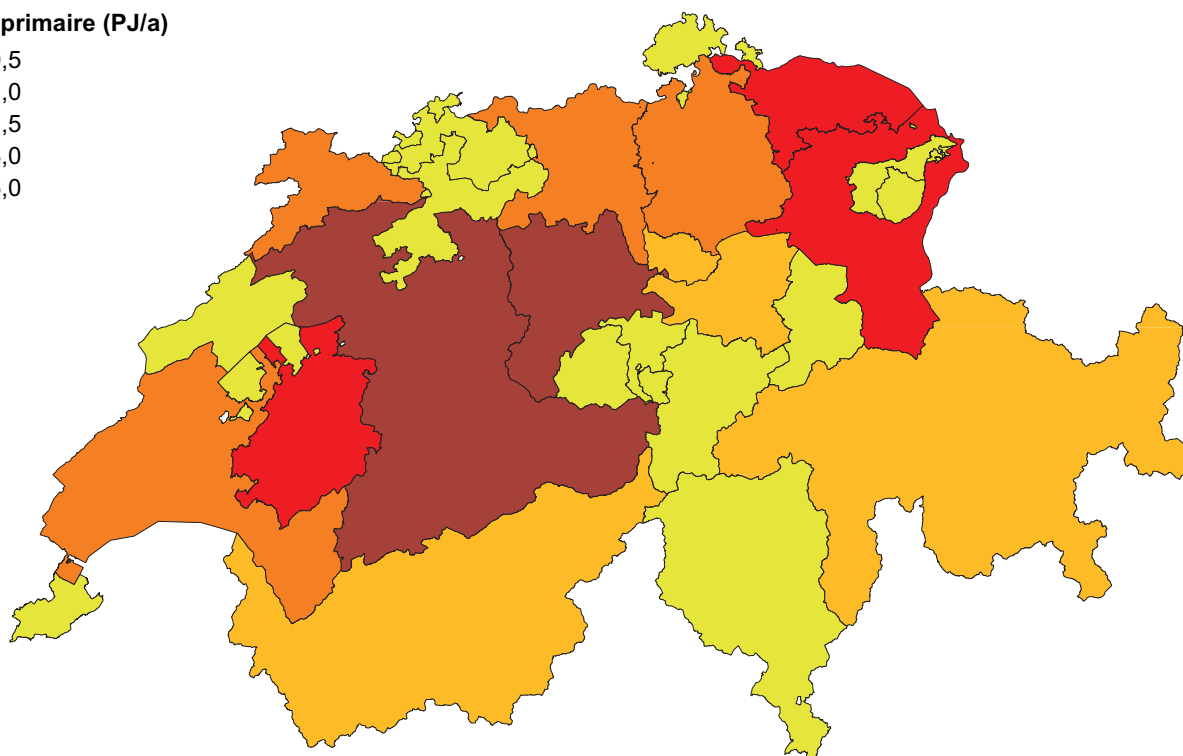


Figure 2: Répartition cantonale du potentiel durable.

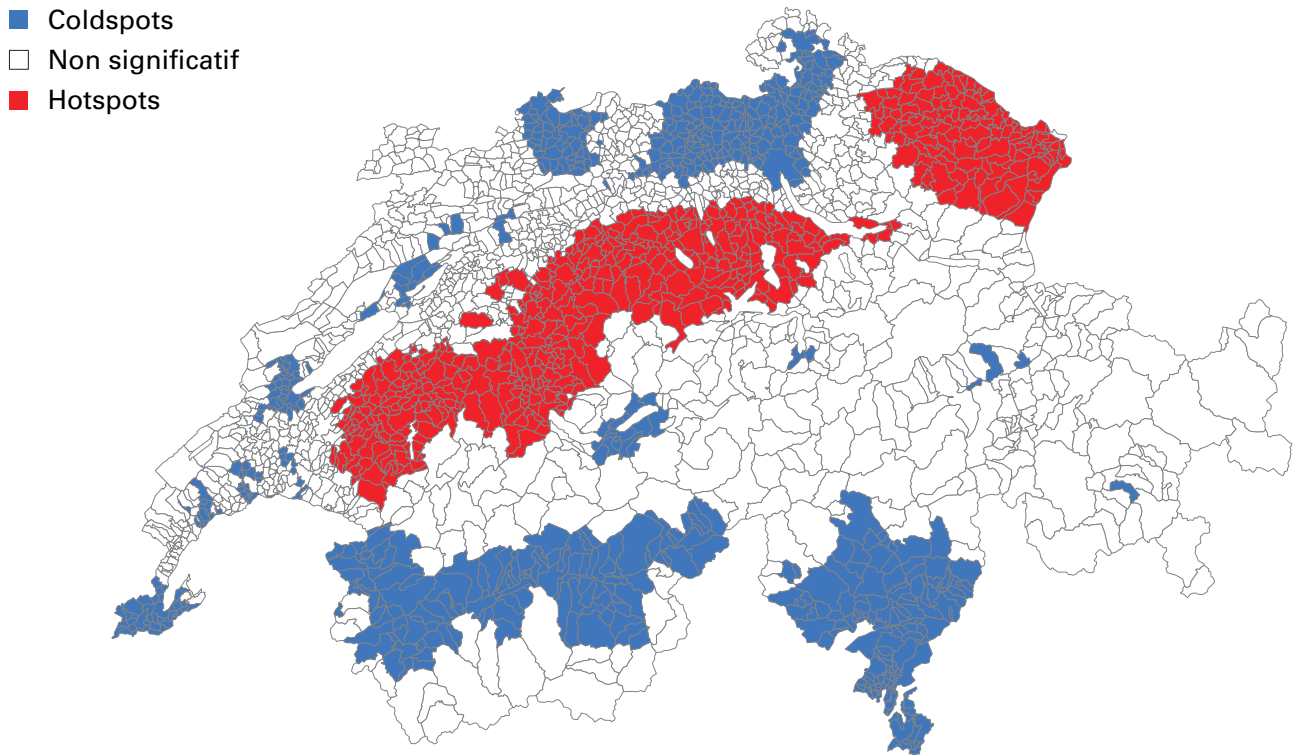


Figure 3: Hotspots et Coldspots du potentiel durable d'engrais de ferme par surface (TJ / km²) en Suisse.

3 Évolutions technologiques actuelles

La grande quantité d'engrais de ferme peut être valorisée énergétiquement grâce à de nombreuses technologies. En Suisse, on utilise principalement la DA. La DA produit non seulement un digestat, mais aussi du biogaz. Le digestat contient le carbone (C) non fermenté et les nutriments (N, P, K) et il est utilisé comme engrais. Les principaux composants du biogaz sont le méthane (CH₄), qui peut être une source d'énergie, et le dioxyde de carbone (CO₂). Bien qu'il s'agisse d'une méthode bien établie, l'optimisation de l'ensemble du processus est nécessaire pour améliorer l'efficacité énergétique et la faisabilité économique, et ainsi favoriser une plus large diffusion de la DA d'engrais de ferme en Suisse. Le programme BIOSWEET a porté le développement de la DA et de divers autres processus à un niveau de maturité technologique (NMT) plus élevé. Les technologies et processus correspondants sont présentés dans la figure 4 et sont décrits ci-dessous.

Tout d'abord, nous présentons comment la séparation de l'engrais de ferme en fractions solide et liquide peut favoriser son utilisation énergétique (section 3.1). Viennent ensuite les technologies visant à améliorer le prétraitement des engrais de ferme avant la DA: une prédigestion microbienne (section 3.2) et un prétraitement par vapeur (section 3.3). En outre, la gazéification hydrothermale (section 3.4) et la carbonisation (section 3.5) sont décrites comme des technologies alternatives à la DA. Celles-ci peuvent utiliser soit directement les engrais de ferme, soit le digestat de la DA. Puis, nous

décrivons la purification des gaz (section 3.6) ainsi que la méthanisation catalytique (section 3.7) et biologique (section 3.8) ainsi que l'utilisation des piles à combustible (section 3.9).

3.1 Séparation solide-liquide

Une technologie simple pour améliorer le transport et la gestion ultérieure de l'engrais de ferme consiste à le dissocier en deux fractions – une solide et une liquide – et à les traiter séparément. Selon l'étude RAUS REIN, la fraction solide du lisier renferme plus d'énergie utilisable par unité de poids que le lisier de bovins non traité (Meier *et al.* 2018).

La fraction liquide contient moins de carbone digestible que la fraction solide, mais elle est plus facile à traiter technologiquement et peut être digérée efficacement dans des réacteurs à haute performance. Cependant, on ne trouve pas aujourd'hui sur le marché de petits réacteurs de ce type. Son utilisation dans les épandeurs à lisier ne pose aucun problème, car elle n'entraîne pas de blocages comme le lisier brut. En outre, cette fraction liquide s'infiltre mieux dans le sol, réduit la contamination des pâtures et diminue les odeurs.

Par rapport au lisier non séparé, la fraction solide contient jusqu'à quatre fois plus d'énergie par unité de poids. Cela améliore le rapport entre la densité énergé-

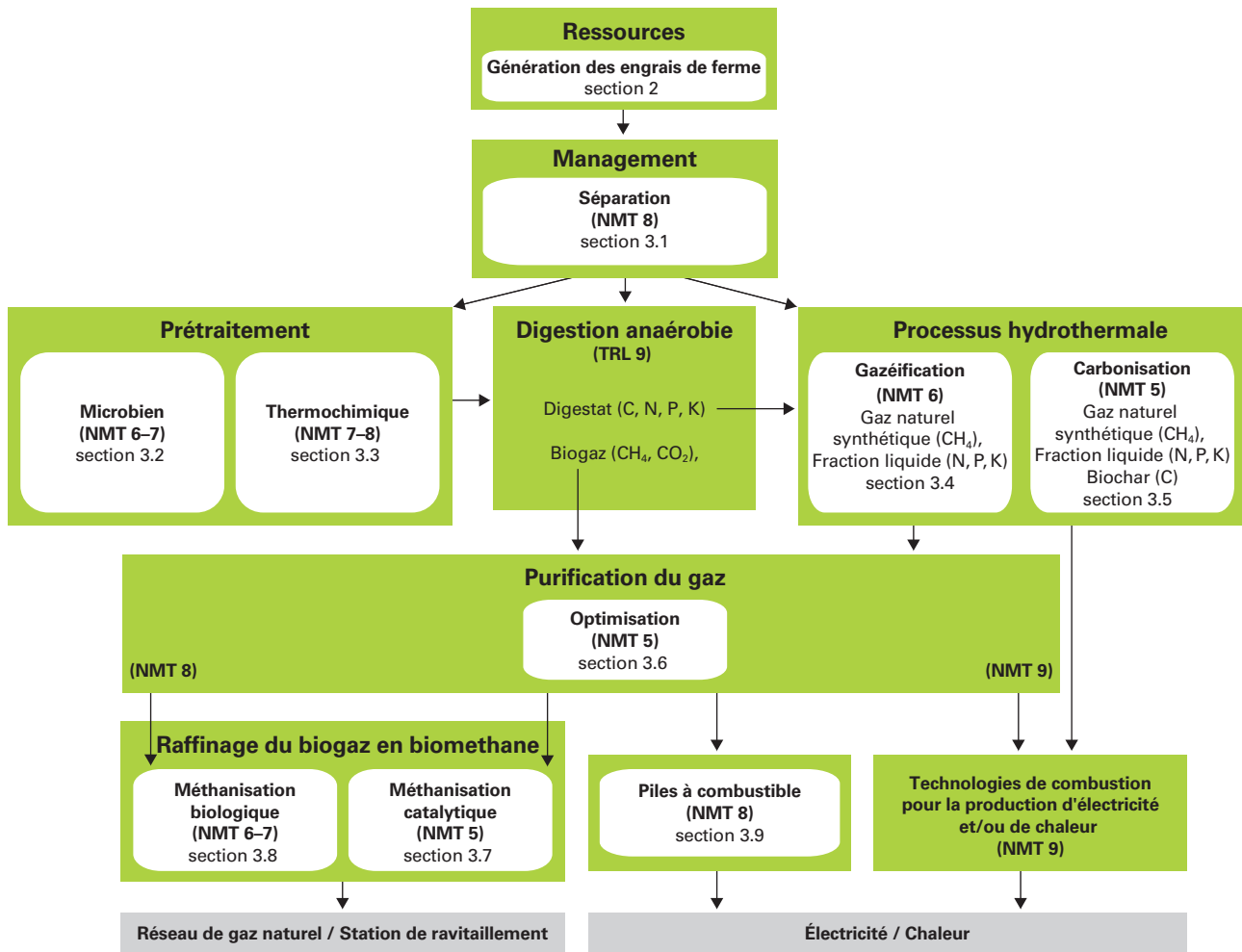


Figure 4: Aperçu des technologies de génération d'énergie à partir d'engrais de ferme. Celles étudiées dans le cadre du programme SCCER-BIOSWEET sont dans les cases blanches avec leur niveau de maturité technologique (NMT). Les voies d'utilisation possibles sont indiquées par des flèches.

tique et l'énergie nécessaire pour le transport, éventuellement sur de plus longues distances. La fraction solide n'est pas très gênante dans les réacteurs à cuve agitée et peut donc remplacer les co-substrats qui sont plus problématiques pour la DA.

La séparation solide-liquide est une technologie dont la faisabilité est éprouvée. Cependant, compte tenu des coûts globaux, ce processus n'est pas rentable aujourd'hui. Bien qu'il soit opérationnel (NMT 9), il faudrait l'accompagner de petits digesteurs à haute performance pour utiliser la fraction liquide, et ils ne sont pas encore disponibles (NMT 4-5). On manque également de méthodes permettant d'augmenter de manière significative le rendement en biogaz des solides séparés (cf. section 3.2 et 3.3). Mais par ailleurs, la séparation réduit les frais de transport car moins d'eau est transportée et le contenu énergétique de la matière transportée est plus élevé. Cela facilite ainsi la collecte de la fraction solide du lisier dans des installations de biogaz plus importantes afin de réaliser des économies d'échelle. Une logistique optimisée pour la séparation solide-liquide promet une meilleure rentabilité. Cette

approche est développée dans le cadre du projet NETZ (Nägele *et al.* 2020) lancé en 2020, où la combinaison de petits digesteurs liquides localement et de grands digesteurs solides au niveau régional pourrait rendre le système plus profitable.

3.2 Prédigestion microbienne

La prédigestion séparée de l'engrais de ferme et des résidus agricoles permet une fermentation beaucoup plus rapide et complète que la DA conventionnelle et l'utilisation d'une quantité 20 à 30% plus importante de biomasse, seulement partiellement fermentée sinon, pour la production de biogaz. Cela augmente le potentiel énergétique et améliore le rendement de l'ensemble de l'installation de 20 à 30%. En séparant physiquement les étapes de la DA, l'hydrolyse est plus efficace et l'installation fonctionne de manière stable et pérenne. En effet, les conditions du processus de fermentation en deux étapes sont optimisées par rapport à l'approche conventionnelle en une seule étape. Les

procédés biologiques, tels que la prédigestion microbienne, présentent également l'avantage de réduire les coûts de l'investissement et de l'énergie car ils se déroulent à pression et température modérées.

La prédigestion microbienne a été étudiée et développée dans plusieurs projets ZHAW à différents niveaux de maturité technologique (NMT). Le projet HYDROFIB (Baier *et al.* 2019) a permis d'évaluer le potentiel énergétique supplémentaire utilisable, sur l'ensemble de la Suisse, de la biomasse prédigérée et riche en fibres, y compris la paille et les solides issus de la séparation des digestats. En outre, les conditions optimales de traitement spécifiques de l'hydrolyse microaérobie du substrat ont été déterminées à l'échelle du laboratoire, une installation pilote a été construite pour des investigations plus poussées et une étude de cas avec une installation DA grandeur nature à deux étapes a été réalisée (Baier *et al.* 2019). Dans le cadre du projet MOSTCH4, un prototype d'installation de biogaz à deux étapes avec prédigestion microaérobie de l'engrais de ferme va démontrer les avantages économiques des équipements agricoles à petite échelle (Warthmann *et al.* 2021). Le projet HYKOM met en œuvre une séparation des étapes de l'hydrolyse anaérobie et de la formation de méthane dans une installation de biogaz agricole à taille réelle. Le processus est accompagné scientifiquement et optimisé par plusieurs campagnes de mesures. L'objectif de la préfermentation microbienne anaérobie est principalement d'obtenir une fermentation plus stable (Rüsch *et al.* 2021).

Les procédés de prétraitement microbien sont les mieux adaptés aux substrats difficiles et lents à dégrader, tels que ceux contenant de la lignocellulose. Ils offrent une augmentation de 20 à 30% de l'efficacité énergétique des installations DA sans créer de flux de sous-produits supplémentaires. Une grande flexibilité conceptuelle et un NMT de 6-7 permettent une intégration immédiate dans les structures agricoles existantes, une utilisation facile et donc une large application.

3.3 Prétraitement par vapeur

L'engrais de ferme contient les composants indigestes des fourrages, notamment fibres lignocellulosiques, et est donc difficile à dégrader lors de la digestion anaérobie, c'est-à-dire que seuls 20 à 50% environ de la matière organique sont convertis en biogaz (Nasir *et al.* 2012). En tenant compte également de la faible teneur en matière sèche et de la forte teneur en cendres de nombreux types d'engrais de ferme, il est difficile d'exploiter économiquement des installations de digestion anaérobie sans co-substrats. Diverses méthodes de prétraitement biologique, mécanique, chimique et thermique ont été proposées pour augmenter le rendement en biogaz de l'engrais de ferme (Li *et al.* 2021). Dans le cadre du programme SCCER BIOSWEET et avec un financement supplémentaire de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN; projet ManuMax), le prétraitement par ex-

plosion de vapeur des lisiers bovins a été étudié. Dans ce procédé, le lisier est chauffé à haute température (160 à 230°C) par injection directe de vapeur, ce qui dissout déjà une partie de la biomasse, et après un temps de réaction déterminé (5 à 45 minutes), il est dépressurisé de manière explosive, ce qui réduit fortement la taille des particules restantes sans dépenses importantes d'énergie. Une étude approfondie à l'échelle du laboratoire réalisée par Li *et al.* (2021) a montré que seuls les solides bénéficiaient du prétraitement par explosion de vapeur et que le rendement en méthane pouvait être augmenté jusqu'à 50%. Celui-ci pourrait encore être amélioré au moyen d'un prétraitement en deux étapes, la première ayant lieu à une température inférieure à celle de la seconde. En séparant le condensat contenant des composés dissous thermolabiles tels que les sucres hémicellulosiques entre les étapes, la dégradation thermique indésirable de ces composés à des températures plus élevées pourrait être évitée. Le prétraitement de la phase liquide, même dans des conditions très douces, a entraîné une réduction des rendements en biogaz. Cependant, les calculs de rentabilité financière ont montré que le prétraitement par la vapeur permettait un fonctionnement plus économique d'une installation de biogaz qui fonctionnerait uniquement avec du lisier de bovin. Sur la base de ces résultats globalement prometteurs de la Haute école spécialisée de Berne, une installation pilote avec le financement de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN, projet ManuMax II, TRL 6) est en cours de développement à la ZHAW pour être installée et testée à l'Institut agricole de Grangeneuve. Ici, le prétraitement est effectué par explosion de vapeur en continu avec intégration de la chaleur et ne nécessite pas plus d'énergie que si le lisier était fermenté dans une installation standard. Le prétraitement par la vapeur a donc un grand potentiel pour augmenter considérablement le rendement en biogaz, en particulier du fumier et du lisier de bovins - les plus difficiles à dégrader par anaérobiose, mais aussi les engrais de ferme les plus courants. Cela augmente les chances d'exploiter économiquement les installations de biogaz uniquement avec du lisier et fumier de ferme et sans co-substrats à l'avenir.

3.4 Gazéification hydrothermale

La gazéification hydrothermale (GHT) peut permettre une valorisation énergétique plus complète de la biomasse tout en minimisant les résidus et en maximisant la récupération des nutriments. Comme il s'agit d'une technologie thermo-chimique, c'est-à-dire non biologique, elle peut convertir presque entièrement la biomasse humide en un biogaz riche en méthane. Les boues de biomasse sont amenées à haute température à pression élevée et, tout en gardant l'eau à l'état liquide. Cette eau chaude pressurisée décompose les composants inorganiques (minéraux) de la biomasse en une phase liquide huileuse mélangée à l'eau et aux

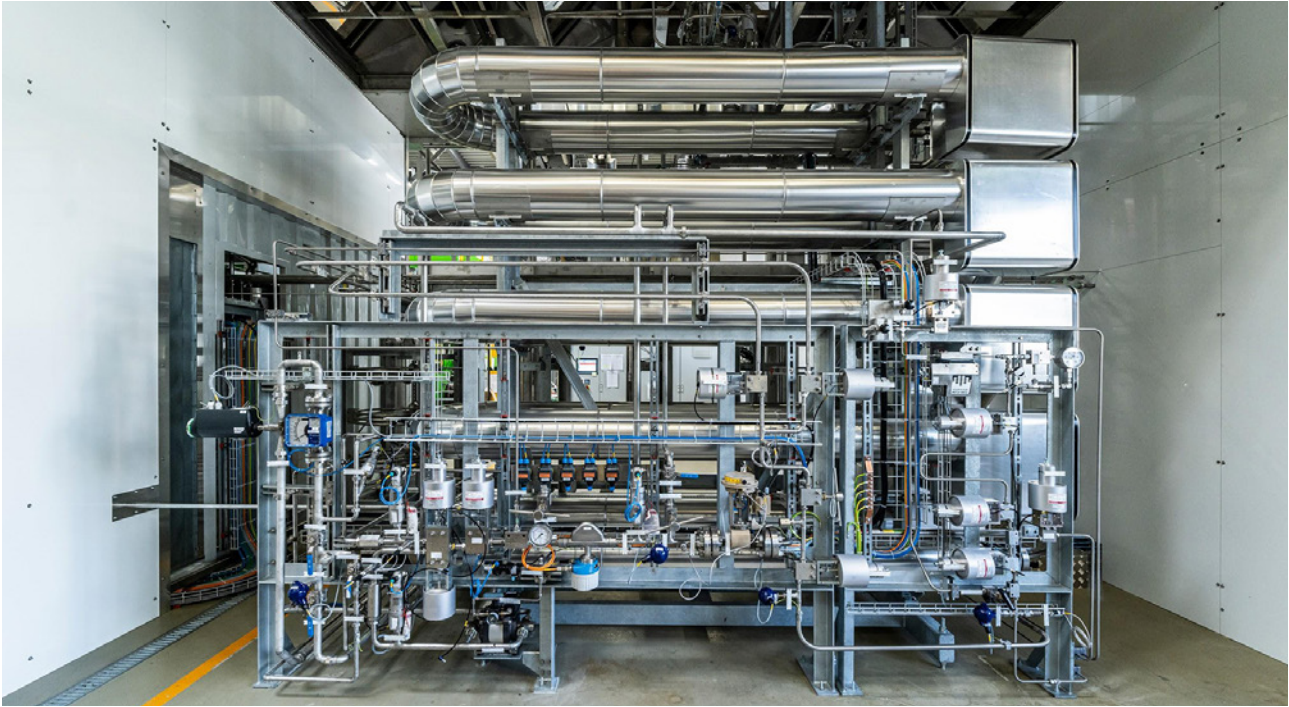


Figure 5: Installation pilote au PSI pour la gazéification hydrothermale de la biomasse humide (Photo M. Fischer, PSI).

minéraux. Cette phase huileuse organique peut être convertie très efficacement en un cocktail de méthane, d'hydrogène et de dioxyde de carbone à l'aide d'un catalyseur. Les composants inorganiques sont récupérés et peuvent être transformés en engrais. Les produits finaux sont un biogaz riche en méthane et un écoulement d'eau de traitement pauvre en matières organiques et en minéraux, mais chargé d'ammonium, un autre nutriment important.

Le processus de gazéification hydrothermale a été développé et optimisé au sein de SCCER BIOSWEET afin d'atteindre un plus haut degré de maturité technologique. Une étape importante a été franchie avec la construction d'une installation pilote au PSI, en collaboration avec les partenaires industriels et avec le soutien de l'OFEN (projet HydroPilot) (fig. 5). Cette installation semi-industrielle a une capacité de 110 kg/h de biomasse humide et peut produire jusqu'à 100 kW de biogaz. Environ 60% de l'énergie contenue dans cette biomasse peut être convertie en biogaz, extrait sous haute pression et ne nécessitant qu'une purification minimale. Des nutriments tels que le phosphore sont tirés de l'écoulement riche en minéraux. Le résidu minéral qui reste après l'extraction peut alimenter une cimenterie. L'utilisation de la gazéification hydrothermale avec une pile à combustible à haute température ou un moteur à gaz augmente l'efficacité du système global, car l'émission de chaleur de la pile ou du moteur peut être utilisée pour chauffer le processus de gazéification hydrothermale. Pour un tel processus combiné, un rendement électrique allant jusqu'à 43% a été calculé (Vogel *et al.* 2016).

La technologie GHT peut être appliquée à la plupart des boues pompables contenant plus d'une dizaine de pour cent de matières organiques (en poids). Les engrais de ferme déshydratés mécaniquement en sont un exemple. Des restrictions s'imposent dans le cas de matières premières corrosives, par exemple à forte teneur en halogénures, ou à très forte teneur en soufre. Pour évaluer l'adéquation d'une matière particulière, une matrice de décision a été élaborée au sein du SCCER BIOSWEET. Cet outil d'expertise couvre à la fois la gazéification hydrothermale et la digestion anaérobie. Un avantage important de la GHT est sa capacité à traiter des matières qui ne peuvent pas être fermentées en anaérobiose, comme les parties ligneuses. Cela offre la possibilité d'absorber de nombreux flux de déchets au niveau régional, non seulement les engrais de ferme, mais aussi, par exemple, les déchets verts contaminés par des plastiques. Les nutriments, y compris les substances volatiles telles que NH_3 , étant entièrement récupérés dans une installation GHT, les émissions de cette technologie sont très faibles. Le bilan global du cycle de vie s'est avéré très bénéfique. La conversion des engrais de ferme et leur remplacement en tant qu'engrais par le sous-produit minéral du processus se traduit par une réduction des émissions de N_2O et par une amélioration des performances environnementales, pouvant être exprimées en termes de potentiel d'effet de serre: $-0,6 \text{ kg CO}_2\text{-eq./MJ}_{\text{SNG}}$ (Luterbacher *et al.* 2009). En raison de sa polyvalence, le procédé GHT pourrait convertir une grande partie du volume total des engrais de ferme (et d'autres types de biomasse résiduelle) en Suisse avec une efficacité élevée et un faible impact en-

vironnemental. La technologie a été amenée au NMT 6 dans le cadre du SCCER BIOSWEET, de sorte que l'entrée sur le marché est prévisible dans les prochaines années.

3.5 Valorisation du carbone dans le biochar

Dans une optique d'utilisation énergétique des engrais de ferme et des résidus agricoles, l'objectif est souvent d'atteindre un rendement maximal. Cela revient à convertir en CO₂ le plus complètement possible le carbone lié à des éléments organiques et à éliminer ainsi le carbone du système. Dans le cas d'engrais de ferme, par exemple, on arrive à une efficacité carbone de 40 à 50%. Mais le cycle du carbone organique ne doit pas être totalement interrompu, car les sols ont besoin de l'apport et de l'accumulation de composés carbonés stables sous forme d'humus afin de conserver leur fertilité et leur capacité de stockage de l'eau et des nutriments. Le biochar résultant de la carbonisation peut être utilisé, parallèlement au compost issu de fumier solide et de résidus agricoles, dans le traitement des sols.

La carbonisation hydrothermale (CHT) de l'engrais de ferme ou du digestat offre un moyen de produire du biochar qui peut être utilisé comme amendement du sol. Grâce à l'efficacité élevée du processus CHT, 80 à 90% du carbone du digestat peut être réinjecté dans le cycle du sol sous une forme stable, contre 40 à 50% lorsque le digestat brut ou composté est épandu directement. Lors de la carbonisation du digestat, le biochar peut même être renvoyé dans le digesteur, ce qui ouvre la possibilité d'effets synergiques et d'une production accrue de méthane (Sunyoto *et al.* 2016) sans sacrifier son utilisation bénéfique pour l'amélioration des sols.

Dans le cadre du projet BIOSWEET HTC Rheinmühle, les chercheurs se sont lancés dans le développement d'un réacteur CHT pour les substrats liquides (Mehli *et al.* 2020). La production d'un biochar de qualité constante pour l'amendement des sols, ainsi que le traitement de l'eau fortement chargée issue du processus, se sont avérés être un défi majeur. Les projets Innosuisse CarbonVALUE et CarboPHOS de la ZHAW étudient par ailleurs les possibilités de récupération du phosphore et d'autres produits à valeur ajoutée de la carbonisation hydrothermale (FFA 2020; Merkle *et al.* 2021). Ces deux projets combinent donc la valorisation des matières et la génération d'énergie. D'importantes économies d'énergie sont réalisées grâce à une déshydratation considérablement améliorée des produits.

Il est apparu au cours du projet que les conditions de réaction sont difficiles et la complexité du procédé est élevée. Si l'on ajoute à cela les problèmes de qualité du biochar et de traitement des eaux de processus, cette technologie se heurte encore à des obstacles importants. Ceux-ci doivent être surmontés avant de pouvoir être mis en œuvre dans un cadre agricole.

3.6 Purification du gaz

Les principaux composants du biogaz sont le méthane et le dioxyde de carbone, le premier représentant la ressource énergétique utilisable. En outre, le biogaz peut contenir de petites quantités (0–10%, en volume) d'azote et d'oxygène ainsi que des traces (proportions de l'ordre de ppbv-ppmv) de composés soufrés (par ex. H₂S, mercaptan, sulfures), de composés de silicium (siloxanes, silanes), d'ammoniac, de composés halogénés et autres composés organiques volatils. La part d'éléments-traces dans le biogaz dépend de divers facteurs. La composition de la biomasse peut varier, même si le constituant principal est l'engrais de ferme: ce dernier peut provenir d'animaux divers élevés dans différentes conditions et il peut être plus ou moins abondant selon la période de l'année et selon la situation des animaux à l'étable ou dans les prés. En outre, suivant leur disponibilité, des co-substrats de différentes origines peuvent être ajoutés. Les conditions du digesteur (température de fonctionnement, type d'appareil, temps de rétention) ont également une influence. Par ailleurs, des procédés de désulfuration basés sur la micro-aération ou l'addition de composés de fer peuvent être utilisés dans le système pour réduire la teneur en H₂S du biogaz.

Les éléments-traces présents dans le biogaz peuvent constituer un défi important pour la valorisation énergétique. En particulier, les composés sulfurés à des concentrations de quelques ppmv (ou même ppbv) peuvent affecter de manière significative tout processus catalytique appliqué au biogaz. Cela concerne également les nouveaux procédés à rendement élevé tels que les piles à combustible à haute température (solid oxide fuel cell, SOFC) ou les installations de traitement catalytique des combustibles. Il a été démontré que le soufre dans la plage de 0,5–2 ppmv perturbe la performance des SOFC (Lanzini *et al.* 2019) et désactive les catalyseurs de méthanisation à base de nickel. Pour les petites échelles, c'est-à-dire les installations de moins de 150 kW_e, il n'existe toujours pas de technologie d'épuration du biogaz économiquement viable pour ces nouvelles technologies. Comme la plupart des exploitations respectivement des installations agricoles suisses sont dans cette plage, il est nécessaire de trouver des solutions d'épuration des gaz robustes et rentables pour les SOFC (section 2.9). Dans le cas contraire, il n'y aura pas de bénéfice économique de cette utilisation finale.

Dans le cadre du SCCER BIOSWEET, un dispositif de test de purification et de conditionnement des gaz (COSYMA, NMT 5) a été construit au PSI, et peut être déplacé vers différentes installations de biogaz pour des tests sur le terrain. Le système fonctionne aussi bien à température et pression ambiantes qu'à des températures élevées allant jusqu'à 400°C et des pressions allant jusqu'à 7 bars. Ces caractéristiques ont permis de trouver une solution optimale d'épuration des gaz pour chaque installation de biogaz. COSYMA est main-

tenant (2021) connecté à l'installation de biogaz à Inwil (fig. 6). Ce dernier est prélevé dans les digesteurs et acheminé par le système d'épuration des gaz vers COSYMA, où il est conduit dans le conteneur de diagnostic pour contrôler la présence d'impuretés. COSYMA et les outils de diagnostic sont déjà mis en œuvre dans plusieurs projets dans des processus de différents niveaux de maturité technologique et ainsi continuellement améliorés. Par exemple, Calbry-Muzika *et al.* (2019) ont déjà appliqué avec succès les outils de diagnostic pour analyser la composition du biogaz de cinq sites agricoles. Dans le cadre du projet européen Waste2Watts (<https://waste2watts-project.net>), différents matériaux de sorption ont été évalués pour l'élimination de H₂S, des composés organiques sulfurés et des terpènes, grâce à COSYMA et aux conteneurs de diagnostic. Des solutions ont été trouvées pour certaines impuretés telles que H₂S, les siloxanes et les terpènes, mais des études supplémentaires sont nécessaires pour les composés organiques du soufre tels que les sulfures de diméthyle (DMS).

3.7 Méthanisation catalytique

Le biogaz peut être utilisé comme source de méthane, pour injection directe dans le réseau de gaz naturel. À cette fin, le fluide doit contenir plus de 96% de méthane en volume. Par conséquent, le biogaz purifié (c'est-à-dire exempt d'impuretés telles que les composés sulfurés et les siloxanes) nécessite un traitement supplémentaire pour éliminer le CO₂ et obtenir un mélange riche en méthane. Pour ceci, plusieurs technologies sont disponibles sur le marché, les plus couramment utilisées étant le lavage à l'eau, l'absorption chimique, l'adsorption à pression alternée et les membranes (Kapoor *et al.* 2019).

Le lavage à l'eau élimine sélectivement le CO₂ et le H₂S du biogaz. Ce procédé permet d'obtenir un rendement élevé en méthane (>98%) avec une pureté acceptable (plus de 97% de méthane en volume dans le produit). Son principal inconvénient est la grande quantité d'eau nécessaire, ce qui entraîne des coûts considérables pour la régénération de celle-ci. Il en résulte d'importants investissements de 2500–5000 €/Nm³_{Biogaz}/h. Néanmoins, cette technologie est la plus répandue dans la production de biogaz avec une part de marché de 40% des installations. Le fonctionnement peut être amélioré en utilisant des produits chimiques au lieu de l'eau pour l'étape d'absorption (par ex. des amines). De cette manière, des volumes plus faibles sont nécessaires, ce qui permet de réduire le coût d'investissement de l'installation à 1500–3000 €/Nm³_{Biogaz}/h et d'obtenir une plus grande pureté du produit. Cependant, le pilotage de ces installations est complexe, car une température plus élevée est obligatoire dans l'étape d'absorption et pendant la régénération de l'agent de sorption. La part de marché des laveurs chimiques dans la production de biogaz est d'environ 22%.

L'adsorption à pression modulée (APM) est l'adsorption sélective de CO₂ dans un matériau solide. Le taux de récupération du méthane pour l'APM est plus faible car une quantité importante de CH₄ est perdue dans les gaz d'échappement. Dans les meilleurs cas, cela correspond à une conservation de 96% de CH₄. Pour cette raison et en raison de la complexité de la conception, la part de marché de l'APM est d'environ 20% et le coût d'investissement d'une installation est de 1500–3000 €/Nm³_{Biogaz}/h.

Les membranes sont des matériaux qui séparent sélectivement l'écoulement en un flux riche en CH₄ et un flux riche en CO₂. Leurs principaux avantages sont leur application directe dans le flux gazeux (sans nécessité d'unités supplémentaires pour la régénération) et

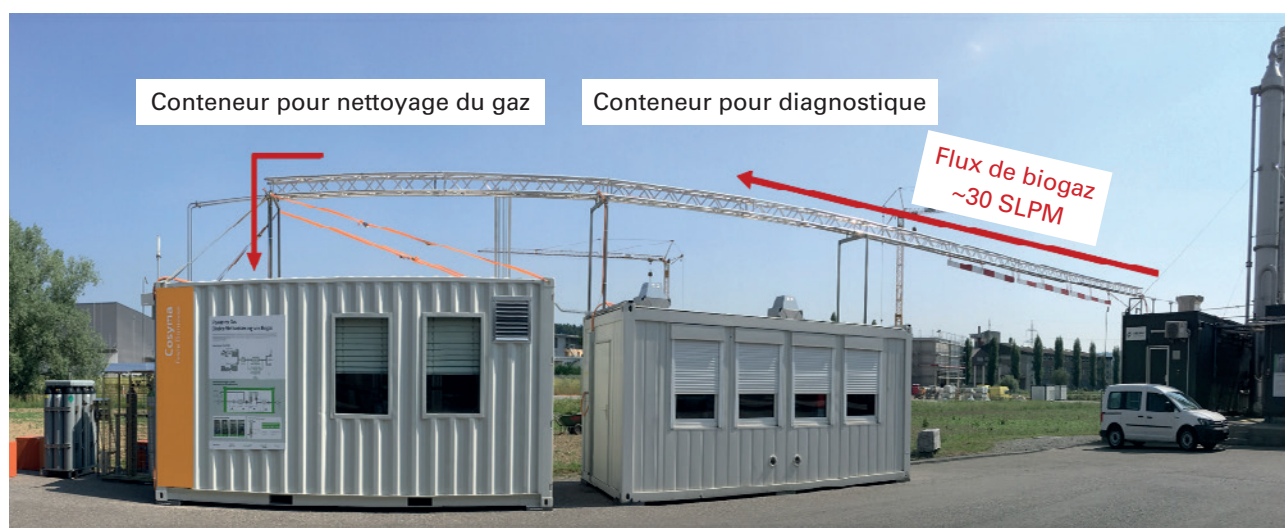


Figure 6: Dispositif de test COSYMA pour la purification et le conditionnement des gaz (LSPM, litres standard par minute; Photo S. Biollaz, PSI).

leur modularité (adaptation facile à la taille de l'installation). Par conséquent, les plus petites installations de valorisation du biogaz disponibles dans le commerce aujourd'hui sont des installations à membrane dont le débit est de $10 \text{ Nm}^3_{\text{Biogaz}}/\text{h}$ ou plus. Cependant, les matériaux des membranes sont coûteux et la quantité importante de méthane qui reste dans le flux riche en CO_2 rend nécessaire une purification supplémentaire.

Une nouvelle technologie de production de biogaz en cours de développement est la méthanisation du CO_2 . Dans ce procédé, le CO_2 n'est pas éliminé du flux gazeux, mais est converti sélectivement en CH_4 par l'ajout de H_2 . Cette opération est réalisée dans des réacteurs catalytiques (le plus souvent sur des catalyseurs à base de Ni) à environ 300°C et 5–10 bars. Le principal avantage de cette méthode est minoré par des coûts d'investissement et d'exploitation élevés, surtout si le H_2 est issu d'une électrolyse. Cette technologie devrait gagner en importance à l'avenir, car elle permet de stocker l'énergie renouvelable excédentaire dans le réseau de gaz naturel.

Dans le cadre de SCCER BIOSWEET, la faisabilité de la technologie a été démontrée en pratique par l'installation et l'exploitation du banc d'essai de purification et de traitement des gaz COSYMA (NMT 5, $20 \text{ kW}_{\text{SNG}}$) à la station de Werdhölzli (ZH). Les expériences ont montré un fonctionnement stable de la réaction de méthanisation pour la production du biogaz pendant plus de 1000 h, avec un rendement moyen en méthane de 96% (Witte *et al.* 2018, 2019). Par conséquent, la méthanisation du CO_2 est éprouvée pour la production du biogaz, mais la possibilité de commercialisation est limitée par le développement d'une solution rentable pour obtenir le H_2 . Le projet mis en œuvre à Werdhölzli a été récompensé par le Watt d'Or 2018 de l'OFEN.

3.8 Méthanisation biologique

Un autre moyen d'accroître l'efficacité de la digestion anaérobie des engrais de ferme consiste à générer du méthane supplémentaire en utilisant le dioxyde de carbone renouvelable du biogaz, qui est converti en présence d'hydrogène par méthanisation microbologique. L'ajout de cette étape du processus permet théoriquement d'augmenter de 40 à 50% le rendement énergétique, à quantité de biomasse et taille de digesteur inchangées. En outre, elle délivre un biométhane prêt à l'emploi sans autres étapes de traitement, ce qui fait économiser 4 à 6% de l'énergie du biogaz brut.

Dans le cadre du projet binational ERA-Net Carbon-ATE, les partenaires suisses caractérisent, développent et évaluent un procédé microbologique à l'échelle du laboratoire pour convertir en CH_4 le biogaz brut issu de digesteurs anaérobies, le gaz pauvre composé principalement de CO_2 venant de la valorisation du biométhane ou les flux riches en CO_2 provenant d'autres sources par ajout de H_2 (Baier *et al.* 2020). L'objectif est de produire un gaz dont la teneur en CH_4 est supérieure à 96% et qui

peut être injecté directement dans le réseau. Le projet se concentre sur la méthanisation ex-situ, dans laquelle le processus microbologique se déroule indépendamment de la digestion anaérobie dans un réacteur séparé et dans des conditions contrôlées. Cela conduit à une configuration optimale de ce réacteur avec des taux de transfert élevés de H_2 , une meilleure conversion de gaz et une faible empreinte carbone. En raison de la disponibilité d'électrolyseurs de petite et moyenne taille, cette technologie offre des possibilités d'utilisation supplémentaire du CO_2 issu de la digestion d'engrais de ferme pour la génération d'énergie. Si l'on tient compte de la consommation énergétique du processus pour l'électrolyse et la méthanisation, l'excédent théorique de la génération de bioénergie est de 20 à 30%. Outre la fourniture efficace d'électricité renouvelable pour l'électrolyse, la mise au point de composants d'entrée et de transfert de H_2 très performants est l'un des défis techniques du développement de ces procédés. Relever ce défi ouvrirait la voie à des solutions innovantes pour moderniser les installations de biogaz en utilisant la méthanisation in situ dans le digesteur existant.

La méthanisation microbienne ex-situ peut être adaptée à tous les types de systèmes DA agricoles dans de nombreux domaines et augmente fortement la production de biométhane, jusqu'à 50%. Dans des conditions de traitement douces, les incidences négatives sur l'environnement sont faibles. La complexité relativement élevée des processus et la dépendance importante à l'égard de l'électricité renouvelable empêchent actuellement une mise en œuvre généralisée dans les milieux agricoles.

3.9 Piles à combustible

Le développement des piles à combustible à oxyde solide (solid oxide fuel cell, SOFC) pour la production d'électricité ne cessent de progresser. Plusieurs développeurs ont mis sur le marché des SOFC allant des micro-installations (1 kW_e) aux systèmes de plusieurs centaines de kW_e . Ces dernières années, les ventes mondiales de SOFC ont atteint 25 000 unités/an, ce qui correspond à une production totale supérieure à $140 \text{ MW}_e/\text{an}$ (E4Tech 2020). Elles convertissent avant tout le gaz naturel, mais grâce à leur flexibilité en matière de carburant, elles peuvent également transformer le biogaz sans équipements supplémentaires importants. Leurs principaux avantages par rapport aux moteurs sont les suivants: (i) un rendement électrique plus élevé, (ii) des émissions polluantes nettement moindres (pas de SO_x , pas de NO_x , pas de fuite de méthane), (iii) des coûts de maintenance plus bas et (iv) un faible niveau sonore. Cela est particulièrement vrai pour les applications de petite puissance ($<100 \text{ kW}_e$), utilisées en raison de l'éparpillement d'engrais de ferme et du biogaz disponibles. Cette estimation se base sur un rendement électrique de 50%. Lors de tests en laboratoire, les piles SOFC avec des mélanges de biogaz atteignent

un rendement de 60% en courant continu (Madi *et al.* 2018). Dans des installations réelles, même les SOFC de 1–2 kW_e avec du gaz naturel arrivent à un rendement de 63% net en courant alternatif (AC) avec du gaz naturel. Dans le cadre du projet DEMOSOFC de l'UE, des SOFC de 58 kW_e ont atteint une efficacité AC nette de 52–56% avec du biogaz d'eaux usées. Des estimations montrent que la quantité totale d'engrais de ferme actuellement collectée en Suisse (potentiel intermédiaire, fig. 1 et 2) pourrait être utilisée dans plus de 5000 unités SOFC de 50 kW_e.

Il y a trois défis principaux à la mise en œuvre des SOFC à petite échelle dans les exploitations agricoles : (i) les coûts d'épuration du gaz sont nettement plus élevés que pour d'autres systèmes utilisant le biogaz, (ii) le prix des SOFC est important, et (iii) les coûts de la DA eux-mêmes sont également élevés. En ce qui concerne la purification, des valeurs limites pour les différents contaminants concernés ont été définies et elles sont actuellement affinées non seulement pour le catalyseur de combustible SOFC, mais aussi pour le catalyseur de pré-reformage du biogaz (cf. 2.6) (<https://waste2watts-project.net>). Le contaminant critique dans le biogaz d'engrais de ferme est le soufre total, plus précisément le soufre organique (quelques ppm), car ses composés sont plus difficiles à éliminer avec les sorbants classiques que le sulfure d'hydrogène. Les coûts des SOFC diminuent lorsque le volume de production

augmente. Pour l'installation SOFC de 50 MW_e/an que SOLIDpower (Italie, Suisse) a mis en service en 2020, les coûts tendent vers 2000 €/kW_e. Des calculs de dépenses pour les systèmes SOFC dans les exploitations agricoles par rapport aux centrales de production combinée de chaleur et d'électricité ont été réalisés pour différents cas et pays, dont la Suisse (Majerus *et al.* 2017, 2018). En ce qui concerne les coûts de la DA plusieurs petits fabricants proposant des solutions compétitives sont présents sur le marché européen, comme Bioelectric, qui vend chaque année une centaine d'installations de biogaz entre 11 et 73 kW_e/an pour les engrais de ferme. Les partenaires suisses EPFL, SOLIDpower, PSI et EREP SA préparent un modèle pilote pour faire fonctionner un système SOFC de 6 kW_e sur une installation de production de biogaz agricole (principalement lisiers et fumiers bovins). Il s'agit d'un tremplin vers des systèmes de 25 kW_e et 50 kW_e, la pile de 6 kW_e étant une sous-unité du module de 25 kW_e déjà validé par SOLIDpower à cette échelle.

Enfin, la technologie des oxydes solides présente l'avantage de pouvoir être exploitée de manière totalement réversible, c'est-à-dire également comme électrolyseur de vapeur (et de CO₂) pour produire du H₂ (et du CO). Là encore, d'intéressantes possibilités d'intégration pour la préparation du biogaz sont envisageables (Jeanmonod *et al.* 2019; Wang *et al.* 2018).

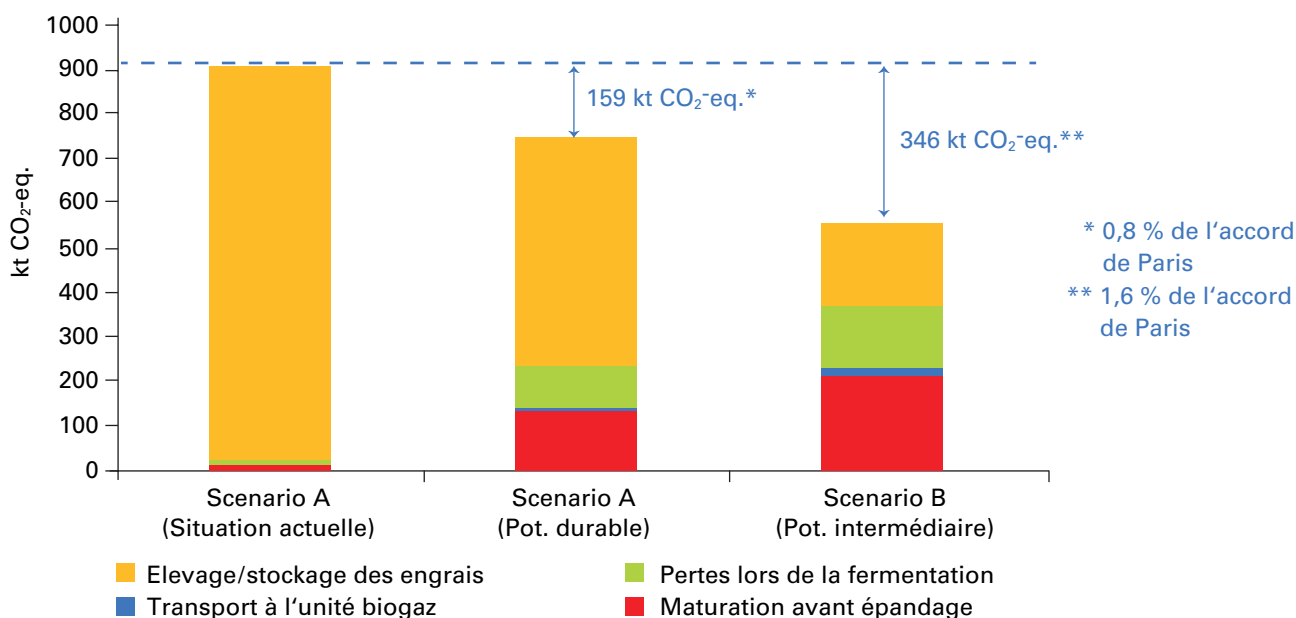


Figure 7: Émissions directes totales de l'exploitation des engrais de ferme (CO₂+CH₄+N₂O) en kt/an CO₂-eq., en fonction du pourcentage d'engrais de ferme digéré dans une installation de biogaz en Suisse (A: situation actuelle avec 6% de digestion, C: réalisable avec 65% de digestion, B: utilisation maximale avec une digestion à 100%).

4 Chances et obstacles pour la bioénergie à partir d'engrais de ferme

Il faut également tenir compte d'aspects non technologiques, qui peuvent favoriser ou freiner l'approvisionnement en génération de bioénergie à partir d'engrais de ferme. Celle-ci peut en effet avoir, au-delà des implications énergétiques, de nombreux effets externes positifs.

En ce qui concerne le potentiel d'atténuation du changement climatique, 3% des émissions de GES de l'agriculture suisse pourraient être évitées si les engrais de ferme durablement disponibles étaient fermentés (fig. 7; Burg *et al.* 2018b). Aujourd'hui, l'agriculture contribue à 12,7% des émissions anthropiques totales de GES de la Suisse. Plusieurs technologies décrites ici pourraient faire baisser ces GES. Par exemple, on estime que la DA du potentiel durable d'engrais de ferme pourrait participer à hauteur de 0,8% à la réduction des émissions de GES en Suisse pour atteindre l'objectif de l'Accord de Paris de limiter le réchauffement climatique à moins de 2°C. Ces réductions pourraient être encore plus importantes si l'on considère que le biogaz produit à partir d'engrais de ferme peut remplacer les combustibles à forte intensité d'émissions (par exemple le fioul) dans le secteur de l'énergie et les engrais minéraux dans le domaine agricole, en particulier en combinaison avec des co-substrats.

Cependant, de nombreux obstacles limitent actuellement l'utilisation efficace des engrais de ferme pour la génération d'énergie.

Sur la base d'une enquête exhaustive comprenant une expérience de choix, l'attitude des agriculteurs suisses envers la DA (individuelle et communautaire) a été étudiée à différents niveaux (Burg *et al.* 2021). Quelque 190 agriculteurs de toute la Suisse ont participé à ce sondage. Les réponses ont confirmé que les engrais de ferme sont une ressource précieuse pour les fermiers qui peuvent ainsi fertiliser naturellement leurs champs, et que la DA de cette matière est généralement considérée comme positive par plus de 80% d'entre eux. Cependant, de nombreux commentaires (par exemple concernant la rentabilité, la qualité du digestat, l'utilisation de co-substrats) ont également reflété une certaine réticence, et un digestat de haute qualité (sans contamination par exemple plastiques, métaux lourds, germes) serait un plus pour être accepté par les personnes sondées. De plus, la DA peut contribuer à l'autosuffisance des agriculteurs en Suisse, ce qui est considéré comme très important. En outre, les agriculteurs préfèrent généralement construire des installations de biogaz avec le moins de copropriétaires possible. À partir des résultats de l'enquête, un modèle à base d'agents (ABM) a été conçu et appliqué pour simuler l'évolution des installations de biogaz dans différentes conditions-cadres. Les caractéristiques des agents (agriculteurs) ont été tirées de l'entretien avec ceux-ci. Les simulations ont montré que le revenu de l'énergie fournie est le facteur le plus important, mais pas le seul. Une augmentation des recettes énergé-

tiques de 0,10 CHF/kWh_e (en plus d'une rémunération actuelle de 0,45 CHF/kWh_e avec la prime agricole pour l'électricité injectée dans le réseau incluse) permettrait de construire uniquement dix installations de biogaz supplémentaires dans toute la Suisse (10% de plus qu'aujourd'hui). L'influence d'une subvention unique semble avoir un impact nettement moindre sur la décision de construire une installation de biogaz. Afin d'exploiter pleinement le potentiel énergétique et d'atténuation des GES de la conversion d'engrais de ferme en biogaz, d'autres stratégies doivent être développées à différents niveaux et les décideurs politiques doivent prendre en compte tous les aspects qui pèsent sur la mise en œuvre des technologies bioénergétiques. Au niveau organisationnel, l'initiative de construire des installations plus grandes (avec de nombreux fournisseurs de ressources) ne peut pas être attendue uniquement des agriculteurs. Il convient d'étudier les mesures incitatives visant à soutenir la coopération entre les agriculteurs et, le cas échéant, les tiers (par exemple, les coopératives laitières, les communes) afin d'éviter les structures de production à petite échelle. Au niveau technico-économique, des mesures sont nécessaires pour rendre les installations moins coûteuses et plus faciles à exploiter pour les agriculteurs. Par exemple, les décideurs politiques devraient envisager de réduire les démarches administratives liées à la construction et à l'exploitation des installations de biogaz agricole. Il est également indispensable d'examiner l'effet de tarifs de rachat au-delà des 0,55 CHF/kWh_e testés jusqu'à présent. Au niveau juridique, pour éviter les émissions de GES, la digestion anaérobie pourrait devenir obligatoire dans le cadre de la gestion des engrais de ferme et être compensée par des subventions appropriées.

Le transport de la biomasse contribue aux émissions de GES et ses coûts représentent une part importante du prix total de ce type d'énergie. Une analyse technico-économique du transport des engrais de ferme solide et liquide a identifié les cinq chaînes logistiques les plus courantes du fournisseur à l'utilisateur final en Suisse (Schnorf *et al.* 2021). Suivant leur nature, les solutions techniques sont différentes. En général, les agriculteurs ou les prestataires de services professionnels (dont la capacité de chargement est plus élevée) apportent les engrais de ferme aux installations de biogaz, ce qui évite les trajets à vide. Les distances pour l'acheminement des engrais de ferme par la route varient entre 5 et 9 km en moyenne. Enfin, lorsque l'infrastructure le permet, les engrais de ferme peuvent être pompés directement depuis les fermes des fournisseurs vers le digesteur de l'installation via des canalisations souterraines. L'étude a montré que la longueur de telles conduites en Suisse serait d'environ 1,5 à 4,5 km, avec un maximum de 8,5 km. Par rapport à l'impact environnemental du transport (bilan CO₂, efficacité énergétique), les coûts sont le facteur limitant pour la centralisation des ressources locales, selon cette étude.

La surface nécessaire pour la transformation énergétique des engrais de ferme est faible : en Suisse, une superficie de 14,5 km² serait requise pour traiter durablement la quantité totale d'engrais de ferme disponible, dont 80% pour accueillir les installations de biogaz (Bowman *et al.* 2021).

Afin de promouvoir l'utilisation énergétique des engrais de ferme, il convient de rechercher d'autres valeurs ajoutées. Il s'agit, par exemple, de la chaleur des installations de DA, insuffisamment utilisée : actuellement, en Suisse, seuls 65% de la production brute de chaleur des installations de biogaz sont récupérés en moyenne. S'il n'y a pas de consommateurs de chaleur tels que des immeubles résidentiels ou des industries à proximité, la chaleur produite pourrait couvrir les besoins en chauffage de petites serres. Ainsi, une surface

maximale de 104 ha de serres pourrait être chauffée avec du biogaz issu d'engrais de ferme en exploitant le potentiel domestique. 20 800 tonnes de tomates pourraient ainsi être fournies chaque année (11% de la demande intérieure totale de tomates ; Burg *et al.* 2020), en renforçant de cette manière la production alimentaire locale, à faible émission de carbone, avec une chaîne d'approvisionnement plus courte. Ces serres devraient être construites en parallèle avec les nouvelles installations de biogaz afin d'optimiser l'utilisation de la chaleur. En été, le surplus de chaleur pourrait également être utilisé pour d'autres processus tels que le séchage du bois. La valeur du digestat lui-même ne doit pas non plus être sous-estimée et pourrait contribuer à rendre les installations de biogaz économiquement viables.

5 La génération de bioénergie à partir des engrais de ferme dans le système énergétique

L'engrais de ferme est à la fois source d'énergie et de carbone. Compte tenu de son potentiel largement inexploité, il est important d'analyser son rôle en tant que source d'énergie dans le système suisse. Cela peut être modélisé pour déterminer la portée de l'utilisation de l'engrais de ferme pour l'énergie. Le schéma de conversion considéré dans son ensemble montre l'ampleur des flux d'énergie et de CO₂ (fig. 8). Il convient de noter qu'en raison du paramétrage des processus individuels du système électrique, des sous-systèmes

variés peuvent faire partie des différentes solutions de modélisation. Comme déjà indiqué, l'engrais de ferme est principalement converti en biogaz par DA, puis transformé en biométhane, ou bien directement en biométhane par gazéification hydrothermale (GHT). Les résidus non digérés de la DA peuvent également être soumis à la GHT pour produire du méthane supplémentaire. Le CO₂ libéré par ces processus peut ensuite être utilisé avec de l'hydrogène d'origine renouvelable pour former un gaz naturel synthétique en appliquant le

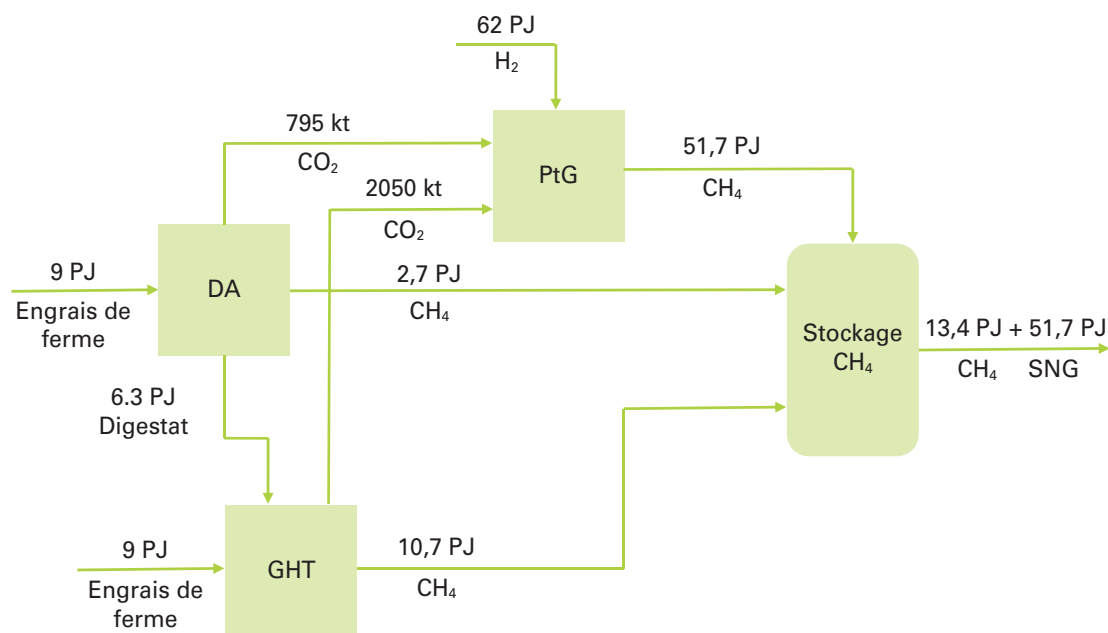


Figure 8: Voies de conversion de l'engrais de ferme utilisées dans les études de modélisation (DA: digestion anaérobie; GHT: gazéification hydrothermale; PtG: Power to Gas; SNG: gaz naturel synthétique) et les flux quantifiés d'énergie et de CO₂ basés sur un apport de 18 PJ/an d'engrais de ferme.

concept de power-to-gas, exploitant ainsi tout le potentiel de carbone de l'engrais de ferme.

Plusieurs scénarios ont été créés et scrutés à l'aide d'EnergyScope, un modèle d'analyse à code source ouvert du système énergétique régional (www.energyscope.ch), pour envisager sa décarbonisation complète pour 2050 (Li *et al.* 2020). Les résultats du modèle montrent qu'avec un apport d'engrais de ferme variant entre 18 et 30 PJ/an en tenant compte des incertitudes, sa conversion par DA et GHT peut couvrir jusqu'à 17% de la production totale de biométhane. Cela représente environ 10–11,5% de la production totale de biocarburants dans le système énergétique suisse pour 2050 et correspond à 2–3% de l'énergie totale fournie par ce

dernier. Des simulations se traduisent par une contribution très limitée des options Power-to-Gas et la conversion directe en biométhane est privilégiée. Au cours de ce processus de conversion du potentiel disponible, 2,5 à 4 Mt/an de CO₂ sont libérés, ce qui exige à terme la mise en oeuvre de technologies de capture appropriées pour l'utilisation ou la séquestration du CO₂ afin d'atteindre l'objectif de décarbonisation. Enfin, les coûts d'investissement pour la conversion des engrais de ferme semblent négligeables par rapport à ceux des grands contributeurs du système énergétique tels que l'hydroélectricité et le photovoltaïque; ils ne représentent que 1% des coûts d'investissement totaux de tous ces moyens de production.

6 Promotion du biogaz issu des engrais de ferme et recommandations

Les Perspectives énergétiques 2050+ pour la Suisse (OFEN *et al.* 2020) indiquent qu'il faudrait utiliser l'ensemble du potentiel national de biomasse durable afin d'atteindre zéro émission nette de GES d'ici 2050 tout en garantissant un approvisionnement énergétique sûr. Ceci s'applique à tous les scénarios analysés; selon le scénario, envisagé, une importation supplémentaire de bioénergie d'un maximum de 60 PJ pourrait même être nécessaire. La bioénergie a donc un rôle à jouer dans la réalisation des objectifs de la Suisse en matière d'énergies renouvelables pour 2050 et au-delà. Alors que l'énergie à base de biomasse fournit actuellement moins de 5% de la consommation brute d'énergie, cette part devrait atteindre près de 20% d'ici 2050 dans les scénarios « net zéro » (OFEN *et al.* 2020). Cette ressource durable peut aider le pays à réduire ses émissions de GES dans la mesure envisagée et de sécuriser son approvisionnement énergétique. Pour parvenir à cela, l'utilisation de la biomasse doit être continuellement accrue, et la production de biogaz représente une technologie très prometteuse.

L'industrie du gaz vise une part de 30% de biométhane renouvelable pour le chauffage des ménages d'ici 2030 (Gazenergie.ch 2020). En supposant que la demande continue à augmenter légèrement d'ici là, cela correspond à un volume total d'environ 5000 GWh (18 PJ). Sur la base des données du WSL, il a été estimé qu'en principe, la biomasse humide disponible en Suisse serait suffisante pour produire cette quantité de biogaz avant 2030 (Gazenergie.ch 2020). Pour des raisons économiques, l'utilisation de ce potentiel est toutefois limitée. La contribution nationale pour répondre à la demande devrait donc osciller entre 30 et 50% et le biogaz supplémentaire devra être importé pour atteindre l'objectif de l'industrie. En ce qui concerne ces importations, il reste à savoir d'où elles viendront, si cette quantité peut être produite de manière durable et si l'approvisionnement peut être garanti à long terme.

En Suisse, le biogaz agricole est aujourd'hui utilisé principalement pour la production d'électricité. En

raison de la forte proportion d'énergie nucléaire et hydraulique, la génération électrique suisse n'émet déjà que peu de CO₂. Par conséquent, les émissions anthropiques de GES ne peuvent être encore réduites que par le remplacement ciblé de combustibles fossiles tels que le gaz naturel. En outre, l'utilisation du biométhane en subsitut du diesel devrait, au-delà de son impact positif sur le climat, améliorer la qualité de l'air, car la quantité de particules fines émise lors de la combustion par le méthane est jusqu'à dix fois inférieure à celle des carburants liquides. Avec la sortie progressive de la production d'énergie nucléaire et une consommation d'électricité qui devrait augmenter de 11% d'ici 2050 (OFEN *et al.* 2020), le biogaz peut constituer une source complémentaire intéressante pour compenser partiellement les fluctuations de la génération d'énergie photovoltaïque et éolienne. La génération d'électricité est particulièrement critique en hiver, car la Suisse est dépendante des importations pendant cette période, et cette situation s'aggraverait avec la fermeture des centrales nucléaires qui ne pourra être entièrement palliée par le photovoltaïque. La production d'électricité à partir de biogaz d'engrais de ferme pourrait apporter une contribution précieuse pendant la saison froide et constituerait une source fiable, les animaux étant à l'étable et de plus grandes quantités d'engrais de ferme étant ainsi disponibles. Pour maximiser la production d'électricité, les piles à combustible sont une option prometteuse.

Comme le montre la section 3 qui concerne les résultats du SCCER BIOSWEET, une grande variété d'approches prometteuses permettrait d'améliorer l'efficacité et la viabilité économique de l'approvisionnement en énergie à partir d'engrais de ferme et de résidus agricoles et ainsi d'augmenter les volumes. La poursuite du développement des installations et des technologies de biogaz existantes bénéficiera des procédés de prétraitement tels que la séparation solide-liquide, le prétraitement microbien ainsi que thermo-chimique. Ils garantissent un traitement plus efficace du biogaz et peuvent

contribuer de manière significative à l'augmentation de la production. Ces technologies seront disponibles pour une mise en œuvre à court et moyen terme (NMT 6–8). Des procédés innovants pour la transformation de la biomasse en énergie renouvelable (par exemple la gazéification hydrothermale, NMT 6, ou l'utilisation de piles à combustible, NMT 8), mais aussi des analyses différenciées de potentiel et des concepts globaux pour la valorisation des engrais de ferme et des résidus agricoles pourraient favoriser une meilleure utilisation du potentiel énergétique durable considérable de toute la biomasse agricole à moyen et long terme.

Afin d'exploiter pleinement le potentiel énergétique et de réduction des émissions de gaz à effet de serre grâce à la transformation des engrais de ferme en biogaz, et éventuellement améliorer la suffisance énergétique de la Suisse, des stratégies doivent être développées à différents niveaux. Au niveau organisationnel, il ne faut pas s'attendre à ce que l'initiative de construire des installations de biogaz plus grandes (avec de nombreux fournisseurs) vienne uniquement des agriculteurs, et il est essentiel que les municipalités ou les opérateurs énergétiques s'impliquent dans ce domaine. La disponibilité limitée de co-substrats (provenant par exemple de l'industrie ou de la restauration) montre qu'il est pertinent de les utiliser efficacement et de manière coordonnée pour la génération

d'énergie au lieu de s'en servir aussi dans les compostières comme c'est encore le cas aujourd'hui. C'est pourquoi, afin d'augmenter la rentabilité des installations de biogaz agricole, on les alimente souvent aussi de biodéchets, ce que l'on appelle la co-fermentation. Les rendements plus élevés en biogaz et les revenus provenant des éventuels frais d'élimination améliorent en effet cette rentabilité. En outre, il convient de développer et d'introduire d'autres mesures. De telles mesures pourraient être des systèmes de coordination qui soutiennent la coopération entre les agriculteurs pour éviter les structures de production à trop petite échelle ou des incitations financières comme des prix de rachat sensiblement plus élevés pourraient être proposés pour l'énergie fournie.

Enfin, des améliorations au niveau technico-économique peuvent conduire à une exploitation plus efficace et plus rentable des installations pour les agriculteurs. Les parties prenantes invoquent souvent des arguments financiers pour expliquer leur manque d'intérêt pour les investissements: coûts élevés, manque de consommateurs de chaleur, absence de tarifs de rachat et expiration des subventions. En outre, la compensation financière pour l'atténuation des GES (compensation CO₂) pourrait être améliorée afin d'accroître la faisabilité économique des installations de biogaz agricole.

7 Conclusion

En Suisse, les engrais de ferme pourraient être utilisés à des fins énergétiques et de politique pour le climat à une échelle beaucoup plus grande qu'aujourd'hui. La digestion de l'engrais de ferme pourrait fournir des quantités importantes d'énergie renouvelable tout en évitant les émissions de gaz à effet de serre. Toutefois, cela nécessiterait une expansion de l'infrastructure du biogaz et des changements dans le cadre actuel de la génération énergétique.

La génération d'énergie à partir d'engrais de ferme pourrait être améliorée par l'introduction de nouvelles technologies pour la séparation solide-liquide. Les processus de digestion anaérobie pourraient être perfectionnés par des prétraitements de la matière première qui augmentent l'efficacité globale et par des post-traitements qui accroissent la qualité du biogaz. Le faible rendement des petits convertisseurs pour la transformation du gaz en électricité pourrait également être amélioré. Enfin, de plus grands efforts pourraient être faits pour utiliser la chaleur résiduelle.

La gazéification hydrothermale est une nouvelle technologie capable de convertir le potentiel disponible d'engrais de ferme en biogaz de manière encore plus efficace, en récupérant des nutriments tels que le phosphore, parfois même sous forme pure. La valorisation

du biogaz en gaz naturel synthétique pour obtenir un combustible écologique est une option intéressante à court terme pour le bilan des gaz à effet de serre de la Suisse. Un moyen d'utilisation parallèle est la production ciblée d'électricité de base en hiver grâce à des piles à combustible efficaces. La modélisation de l'ensemble du système montre la grande importance de l'utilisation des engrais de ferme pour l'approvisionnement en énergie et le bilan CO₂. Les caractéristiques de l'engrais de ferme rendent difficile sa mise en œuvre pour d'autres produits durables, tels que des produits chimiques ou des matériaux. Par conséquent, l'utilisation des engrais de ferme à des fins énergétiques semble particulièrement avantageuse. La génération d'énergie à partir des engrais de ferme peut donc aussi contribuer dans une certaine mesure à la stabilisation du système énergétique du pays, en combinaison avec d'autres sources renouvelables, et à une plus grande indépendance énergétique vis-à-vis des importations, notamment de combustibles fossiles. En outre, elle réduit les effets néfastes sur le climat et la consommation de ressources.

Remerciements

Ce projet de recherche a été soutenu financièrement par l'agence suisse pour l'innovation Innosuisse et fait partie du programme BIOSWEET du Centre de compétences suisse pour la recherche énergétique SCCER. Nous tenons à remercier les autres organisations pour leurs subventions: Fondation Ernst Göhner, OFEN, WSL et Fondation Ernst Göhner Stiftung, OFEN, programme P&D de l'OFEN et WSL, ainsi que les partenaires indus-

triels Afry AG, ExerGo sàrl, KASAG Swiss AG et Treatech sàrl, et enfin Fuel Cells & Hydrogen Joint Undertaking (projet Waste2Watts, subvention 826243). Nous tenons également à remercier Prof. Dr. Karl Keilen (keilenANALYTICS) pour ses commentaires utiles sur le document, Martin Moritzi (WSL) pour la relecture de la version allemande et Sandra Gurzeler (WSL) pour la mise en page.

Références

- Baier, U.; Antalfy, I.; Burg, V.; Hölzel, B.; Krautwald, J.; Moser, Y.; Rüschi, F.; Schmid Lüdi, K.; Treichler, A.; Warthmann, R., 2019: Projekt Mikroaerobe Hydrolyse faserreicher Biomasse zur Steigerung der Biogasproduktion (HYDROFIB), Swisspower AG, FBI First Biogas Int'l, Allmig, WSL, SVGW FOGA, BFE. <https://www.zhaw.ch/de/forschung/forschungsdatenbank/projektdetail/projektid/1422>.
- Baier, U.; Corbin, A.; Merkle, W., 2020: Projekt CarbonATE – Entwicklung einer enzymatischen CO₂-Abtrennungsstrategie für eine optimierte mikrobiologische Methanisierung. Intermediate Report ZHAW, Wädenswil (unpublished data).
- Bowman, G.; Burg, V.; Erni, M.; Lemm, R.; Thee, O.; Björnson Gurung, A., 2021: How much land does bioenergy require? An assessment for land-scarce Switzerland. *Glob. Chang. Biol. Bioenergy*, 00: 1–15. <http://doi.org/10.1111/gcbb.12869>.
- Burg, V.; Bowman, G.; Erni, M.; Lemm, R.; Thees, O., 2018a: Analyzing the potential of domestic biomass resources for the energy transition in Switzerland. *Biom. Bioenerg.* 111, 60–69.
- Burg, V.; Bowman, G.; Haubensak, M.; Baier, U.; Thees, O., 2018b: Valorization of an untapped resource: Energy and greenhouse gas emissions benefits of converting manure to biogas through anaerobic digestion. *Res. Cons. Recycl.* 136: 53–62.
- Burg, V.; Bowman, G.; Hellweg, S.; Thees, O., 2019: Long term wet bioenergy resources in Switzerland: Drivers and projections until 2050. *Energies* 12, 18: 3585. <http://doi.org/10.3390/en12183585>.
- Burg, V.; Golzar, F.; Bowman, G.; Hellweg, S.; Roshandel, R., 2020: Symbiosis opportunities between food and energy system: The potential of manure-based biogas as heating source for greenhouse production. *J. Ind. Ecol.* <http://doi.org/10.1111/jiec.13078>.
- Burg, V.; Troitzsch, K.G.; Akyol, D.; Baier, U.; Hellweg, S.; Thees, O., 2021: Farmer's willingness to adopt private and collective biogas facilities: an agent-based modeling approach. *Res. Cons. Recycl.* 167: 105400. <http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105400>.
- Calbry-Muzyka, A.; Madi, H.; Biollaz, S., 2019: Cleaning agricultural biogas for high temperature fuel cells at pilot scale, SFOE. <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=40684>.
- E4Tech, 2020: The Fuel Cell Industry Review 2020 edition. www.FuelCellIndustryReview.com.
- FFA Forschungsfonds Aargau 20200331_10
- CarbonVALUE, 2020: Nutzbarmachung des energetischen und des stofflichen Potenzials von Prozesswässern aus der hydrothermalen Karbonisierung.
- Jeanmonod, G.; Wang, L.; Diethelm, S.; Maréchal, F.; Van herle, J., 2019: Trade-off designs of power-to-methane systems via solid-oxide electrolyzer and the application to biogas upgrading. *Appl. Energy* 247: 57–581.
- Kapoor, R.; Ghosh, P.; Kumar, M.; Vijay, V.K., 2019: Evaluation of biogas upgrading technologies and future perspectives: a review. *Env. Sci. Pollut. Res.* 26: 11631–11661.
- Lanzini, A.; Madi, H.; Chiodo, V.; Papurello, D.; Maisano, S.; Santarelli, M.; Van herle, J., 2017: Dealing with fuel contaminants in biogas-fed solid oxide fuel cell (SOFC) and molten carbonate fuel cell (MCFC) plants: Degradation of catalytic and electro-catalytic active surfaces and related gas purification methods. *Prog. Energy Combust. Sci.* 61. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.04.002>.
- Li, X.; Damartzis, T.; Stadler, Z.; Moret, S.; Meier, B.; Friedl, M.; Maréchal, F., 2020: Decarbonization in complex energy systems: A study on the feasibility of carbon neutrality for Switzerland in 2050. *Front. Energy Res.* 8, 274. <http://doi.org/10.3389/fenrg.2020.549615>.
- Li, Y.; Zhao, J.; Krooneman, J.; Euverink, G.; Jan, W., 2021: Strategies to boost anaerobic digestion performance of cow manure: Laboratory achievements and their full-scale application potential. *Sci. Total Env.* 755 (Pt 1), S. 142940.
- Luterbacher, J.S.; Fröling, M.; Vogel, F.; Maréchal, F.; Tester, J.W., 2009: Hydrothermal gasification of waste biomass: process design and life cycle assessment. *Environ. Sci. Technol.* 43, 5: 1578–1583. <https://doi.org/10.1021/es801532f>.

- Madi, H.; Diethelm, S.; Constantin, D.; Van herle, J., 2018: Biogas-fed SOFC: Performance investigation with variable CH₄/CO₂ composition, 13th European Solid Oxide Fuel Cell & Electrolyser Forum, Lucerne (CH), Paper A1110, 67–74.
- Majerus, S.; Lauinger, D.; Van herle, J., 2017: Cost requirements for a small-scale SOFC fed from agricultural-derived biogas. *J. Electrochem. Energy Conv. Stor.* 14, 1: 011002.
- Majerus, S.; Lauinger, D.; Van herle, J., 2018: Taking advantage of the vastly underused European biogas potential: break-even conditions for a fuel Cell and an engine as biogas converters *J. Electrochem. Energy Conv. Stor.* 15, 3: 031006.
- Mehli, A.D.; Winkler, D.; Griffin, G.; Gerner, B.; Kulli, U.; Baier, M.; Kühni, A.; Treichler, S.; Garcia, A., 2020: Pilotanlage zur Hydrothermalen Karbonisierung. Prozessoptimierung & Verfahrenserkenntnisse. Final Report SFOE Project SI/501670-01. Bern.
- Meier, U.; Hersener, J.-L.; Bolli, S.; Anspach, V., 2018: "RAUS – REIN": Feststoffe "RAUS" aus der Gülle und "REIN" in die Vergärung, Neuartiges Konzept zur Verbreitung der Vergärung von Hofdünger in der Schweiz, Schlussbericht, im Auftrag von Bundesamt für Energie und Bundesamt für Landwirtschaft, Bern.
- Merkle, W.; Keller, R.; Treichler, A.; Ebert, J.; Edelmann, M.; Hüsch, S.; Kühni, M.; Stucki, M., 2021: Projekt CarboPHOS – Phosphorous recovery through hydrothermal carbonisation of sewage sludge Antaco AG, Ostschweizer Fachhochschule OST, Abwasserverband Aarau und Umgebung. AVA <https://www.zhaw.ch/en/research/research-database/project-detailview/projektid/4682>.
- Mohr, L.; Burg, V.; Thees, O.; Trutnevyte, E., 2019: Spatial hot spots and clusters of bioenergy combined with socio-economic analysis in Switzerland. *Renew. Energy* 140: 840–851.
- Nasir, I.M.; Mohd Ghazi, T.I.; Omar, R., 2012: Anaerobic digestion technology in livestock manure treatment for biogas production: A review. *Eng. Life Sci.* 12, 3: 258–269. <https://doi.org/10.1002/elsc.201100150>.
- Nägele, H.-J.; Rüschi, F.; Baier, U., 2020: Projekt Vorprojekt Netz: Nährstoff- und Energietechnik-Zentrum Ingenieurbüro HERSENER GmbH, LAVEBA Genossenschaft, GRegio Energie AG, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. <https://www.zhaw.ch/de/forschung/forschungsdatenbank/projektid/projektid/3778>.
- OFEN, 2020: Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2019. Retrieved from <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/gesamtenergiestatistik.html>.
- OFEN; Prognos AG; INFRAS AG; TEP Energy GmbH; Ecoplan AG, 2020: Energieperspektiven 2050+. Retrieved 14 January 2021 from <https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wd-WJKYi5iZmUuYWWRtaW4uY2gvZnVlcHVibGljYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvMTAzMjM=.html>. Kurzbericht, Bern. 112 p.
- Rüschi, F.; Huber, S.; Baier, U.; Nägele, H.-J.; Merkle, W.; Senn, M.N.; Wittwer, K., 2021: Projekt HYKOM – Energieoptimierte Kombination von Hygienisierung und Hydrolyse zur Vorbehandlung von Flüssigsubstraten vor der Vergärung, ZHAW, Gebr. Klaus und Urs Wittwer/wigako. <https://www.zhaw.ch/de/forschung/forschungsdatenbank/projektid/projektid/3838>.
- Schnorf, V.; Trutnevyte, E.; Bowman, G.; Burg, V., 2021: Biomass transport for energy: cost, energy and CO₂ performance of forest wood and manure transport chains in Switzerland. *J. Cleaner Prod.* 293: 125971. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125971>.
- Sunyoto, N.M.S.; Zhu, M.; Zhang, Z.; Zhang, D., 2016: Effect of biochar addition on hydrogen and methane production in two-phase anaerobic digestion of aqueous carbohydrates food waste. *Bioresour. Technol.* 219: 29–36.
- Thees, O.; Burg, V.; Erni, M.; Bowman, G.; Lemm, R., 2017: Biomassepotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung, Ergebnisse des Schweizerischen Energiekompetenzzentrums SCCER Biosweet. WSL Ber. 57, 299 p.
- Vogel, F., 2016: Hydrothermal production of SNG from wet biomass, In: Synthetic Natural Gas from Coal, Dry Biomass, and Power-to-Gas Applications. In: Schildhauer, T.J.; Biollaz, S.M.A. (eds). John Wiley & Sons, Inc.
- Wang, L.; Jeanmonod, G.; Pérez-Fortes, M.; Diethelm, S.; Van herle, J.; Maréchal, F., 2018: Technical evaluation of sustainable biogas upgrading via solid-oxide electrolysis. 13th European Solid Oxide Fuel Cell & Electrolyser Forum, Lucerne (CH). Paper A0910: 70–80.
- Warthmann, R.; Arioli, G.; Principi, P.; Baier, U.; König, R.; Treichler, A., 2021: Projekt MOSTCH4: Mini Onsite System To valorize manure in methane, ZHAW, Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana SUPSI, Laborex SA. <https://www.zhaw.ch/de/forschung/forschungsdatenbank/projektid/projektid/3541/>.
- Witte, J.; Kunz, A.; Biollaz, S.M.A.; Schildhauer, T.J., 2018: Direct catalytic methanation of biogas – Part II: Techno-economic process assessment and feasibility reflections. *Energy Convers. Manag.* 178: 26–43.
- Witte, J.; Calbry-Muzyka, A.; Wieseler, T.; Hottinger, P.; Biollaz, S.M.A.; Schildhauer, T.J., 2019: Demonstrating direct methanation of real biogas in a fluidised bed reactor. *Appl. Energy* 240: 359–71.

