

SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT
FRANÇAIS / ENGLISH

**STOCKAGE ET PRETRAITEMENTS DES INTRANTS AVANT
ALIMENTATION DE DIGESTEURS DE METHANISATION
ETAT DES CONNAISSANCES ET RECOMMANDATIONS**

***STORAGE AND PRE-TREATMENTS FOR BIOMASS, WASTE
AND RESIDUES BEFORE ANAEROBIC DIGESTION
STATE OF THE ART AND RECOMMENDATIONS***

septembre 2022

S. BERGER, I. DESNEULIN – SOLAGRO
F. MONLAU, C. PEYRELASSE – APESA
H. CARRERE – INRAE-LBE



Créée à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD est depuis 1989, le catalyseur d'une coopération entre industriels, institutionnels et chercheurs.

Acteur reconnu de la recherche appliquée dans le domaine des déchets, des sols pollués et de l'utilisation efficace des ressources, RECORD a comme objectif principal le financement et la réalisation d'études et de recherches dans une perspective d'économie circulaire.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et institutionnels) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :
RECORD, Stockage et prétraitements des intrants avant alimentation de digesteurs de méthanisation - Etat des connaissances et recommandations, 2022, 151 p, n°20-0420/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de la transition écologique)
www.ademe.fr

© RECORD, 2022

RESUME

L'introduction des matières en digestion et l'obtention de l'expression maximale du potentiel méthanogène des intrants sont des questions essentielles pour la faisabilité technique et économique des projets de méthanisation, qu'ils soient agricoles, territoriaux ou industriels.

L'analyse bibliographique montre que de nombreuses technologies (mécaniques, physiques, biologiques, thermique) existent et sont mises sur le marché. L'enquête auprès des exploitants d'unités montre que les pré-traitements apportent des bénéfices au niveau des performances de la méthanisation mais également sur des aspects plus techniques (facilité de mélange, réduction des pannes), même si les coûts d'investissement et les charges (maintenance, électricité) peuvent limiter leur mise en œuvre. En outre, le potentiel de développement de la méthanisation à l'horizon 2030 reposant sur des intrants agricoles, des efforts de R&D sur ce type de ressources, ainsi que sur l'analyse élargie des impacts des procédés d'un point de vue environnemental, énergétique et sanitaire ont notamment été identifiés comme des leviers pour l'amélioration de la filière.

MOTS CLES

Pré-traitement, méthanisation, stockage, broyage, sonication, cavitation, hydrolyse, biomasse agricole, boues urbaines, biodéchets, biogaz, potentiel méthanogène

SUMMARY

The introduction of resources into anaerobic digesters and the production of maximum of biogas are important technical and economic issues for biogas units, whether agricultural, territorial or industrial.

The literature review shows that many technologies (mechanical, physical, biological, thermal) exist and are available on the market. The survey of plant operators shows that pre-treatment brings benefits in terms of anaerobic digestion performance but also on more technical aspects (ease of mixing, reduction of breakdowns), even if investment costs and charges (maintenance, electricity) may limit their implementation. In addition, the development potential of anaerobic digestion by 2030 based on agricultural inputs, R&D efforts on this type of resource, as well as a broader analysis of the environmental, energy and health impacts of the processes have been identified as leverages for improving the sector.

KEY WORDS

Pre-treatment, anaerobic digestion, storage, shredding, sonication, cavitation, hydrolysis, agricultural biomass, urban sludge, biowaste, biogas, methanogenic potential

Contexte

La méthanisation, encouragée par la législation et le contexte sociétal, semble être une solution pertinente pour contribuer à la transition énergétique et à l'économie circulaire des territoires, par la production d'une énergie renouvelable (le biogaz) et d'un fertilisant organique (le digestat).

En fort développement en France depuis ces dernières années, notamment à partir de ressources agricoles, la méthanisation permet de valoriser une très large gamme de gisements de biomasses : résidus agricoles, liquides ou solides, cultures intermédiaires à vocation énergétique, productions agricoles dédiées, résidus lignocellulosiques, déchets des industries agro-alimentaires (IAA), boues de stations d'épuration des eaux usées, biodéchets domestiques issus d'une collecte sélective à la source, biodéchets issus de collectes spécifiques auprès des professionnels, fractions fermentescibles des ordures ménagères, etc.

La présence d'indésirables (plastiques), de fortes teneurs en azote ou en éléments ligneux (pailles), et/ou de polluants (métaux lourds, etc.), entraîne une réduction du pouvoir méthanogène des intrants couplée à l'impossibilité de traiter efficacement les digestats produits.

En outre, l'introduction des matières en digestion et l'obtention de l'expression maximale du potentiel méthanogène des intrants sont des questions essentielles pour la faisabilité technique et économique des projets de méthanisation, qu'ils soient agricoles, territoriaux ou industriels.

Les technologies de stockage et de pré-traitements des intrants sont des leviers intéressants pour optimiser les performances des installations.

De nombreuses technologies et équipements existent aujourd'hui, qu'ils bénéficient de nombreux retours d'expériences, ou qu'ils soient en cours de développement ou au stade de pilote de laboratoire.

Ainsi, afin d'alimenter les acteurs de la filière, des utilisateurs notamment, avec des informations à jour concernant les pré-traitements et le stockage des intrants avant alimentation en méthanisation, l'Association RECORD a souhaité la réalisation d'un état de l'art sur cette thématique.

Ce document issu du travail de bibliographie et de retours de terrain synthétise l'ensemble des données aujourd'hui à disposition sur les pré-traitements et le stockage de différents types d'intrants.

Ce travail a abouti à la réalisation d'une synthèse, d'un rapport complet détaillé et de fiches synthétiques par intrant et par technologie.

Objectifs et méthode

Afin d'identifier les enjeux concernant le pré-traitement des intrants en méthanisation, une première étape de quantification de la ressource accessible en méthanisation à court et moyen terme ainsi que d'identification des facteurs limitant l'utilisation optimale des intrants été réalisée (**volet 1**).

Ce volet est basé sur des éléments bibliographiques nationaux et sur les hypothèses prospectives du scénario Afterres2050 (<https://afterres2050.solagro.org>), ainsi que sur les données de potentiels méthanogènes issus de la banque de données de l'APESA (plus de 2000 échantillons).

Ensuite, la mission s'est poursuivie par la réalisation d'une synthèse bibliographique (**volet 2**) recensant l'ensemble des solutions expérimentées dans le cadre d'essais en laboratoire à travers l'étude des publications scientifiques.

Context

Anaerobic digestion, encouraged by legislation and the societal context, seems to be a relevant solution to contribute to the energy transition and the circular economy of territories, through the production of renewable energy (biogas) and organic fertilizer (digestate).

Since few years, french biogas units have been developed rapidly, in particular based on agricultural resources, but methanization could be applied on very wide range of biomass resources : agricultural residues, liquid or solid, intermediate crops, dedicated crops, lignocellulosic residues, waste from agro-food industries, sludge from wastewater treatment plants, domestic bio-waste, bio-waste from specific collections from professionals, etc.

The presence of undesirables (plastics), high levels of nitrogen or ligneous elements (straw), and/or pollutants (heavy metals, etc.), could lead to a reduction of the methanogenic potential of inputs coupled with the impossibility to valorize the digestates produced.

Furthermore, technical and economic feasibility of biogas projects depends on optimized methanogenic potential, whether agricultural, territorial or industrial units.

Input storage and pre-treatment technologies are interesting leverages for optimizing the performance of facilities. Many technologies and equipment are in operation today, whether they benefit from extensive feedback, whether they are under development or at the laboratory pilot stage.

Thus, in order to supply the actors of the sector, the users in particular, with up-to-date information concerning the pre-treatments and the storage of the inputs before feeding in methanization, the RECORD Association wished to carry out a state of the art on this theme.

This document resulting from a work of bibliography and feedback of biogas units synthesizes all the data available today on the pre-treatments and storage of different types of inputs.

This work resulted in the production of a summary, a complete detailed report and summary sheets by input and by technology.

Objectives and method

*In order to identify the issues concerning the pre-treatment of methanisation inputs, a first stage of quantification of the resource available for methanization in the short and medium term and identification of the factors limiting the optimal use of inputs was carried out (**part 1**).*

This part is based on national bibliographical elements and on the prospective hypotheses of the Afterres2050 scenario (<https://afterres2050.solagro.org>), as well as on data on methanogenic potential from the APESA database (more than 2000 samples).

*Then, the mission continued with a bibliographical synthesis (**part 2**) listing all the solutions tested in laboratory trials through the study of scientific publications.*

*In order to challenge the results of the R&D, a survey (**part 3**) was carried out: interviews with 20 operators of agricultural, territorial and WWTP biogas units with a pre-treatment*

Afin de confronter les résultats de la R&D au terrain, une phase d'enquête (**volet 3**) auprès des acteurs de la filière a été réalisée : entretien avec 20 exploitants d'unités de méthanisation agricole, territoriale et de STEP ayant un dispositif de prétraitement, une quinzaine d'entretiens avec des constructeurs et fournisseurs d'équipements.

Enfin la synthèse des éléments des phases précédentes couplée à une analyse bibliométrique a permis d'aboutir à la proposition de recommandations (**volet 4**).

Principaux résultats

Volet 1 : Identification des gisements et des facteurs limitants

Basé sur le croisement des tonnages et du potentiel méthanogène moyen ramené à la matière sèche (Nm³ CH₄/tMS) pour la liste des ressources identifiées, le **gisement méthanisable à l'horizon 2030** est évalué à **136 TWh/an**.

Cette valeur prend en considération un scénario agricole reposant sur une augmentation de la mobilisation des ressources agricoles végétales (CIVE) et une baisse de la quantité de déjections d'élevage liée à la diminution progressive de l'élevage.

Les matières agricoles représentent 85% du gisement mobilisable en tonnage et en énergie à l'horizon 2030, avec 2/3 du fait de la méthanisation des résidus de culture, des CIVE et cultures et près de 20% issus de la méthanisation des déjections animales. Quant au biogaz produit à partir des déchets, il représente 15% restants, dont 10% pour les déchets des collectivités et 5% pour les déchets des industriels.

Les enjeux des prétraitements se concentrent donc sur les matières agricoles représentant la proportion la plus importante du gisement mobilisable, en tonnage et en énergie. De plus, il s'agit de **matières majoritairement fibreuses** nécessitant une première étape de dégradation en amont du processus de digestion anaérobie.

Les facteurs limitant l'expression du potentiel méthanogène se caractérisent soit par des **facteurs physiques** (viscosité, cristallinité, surface accessible, homogénéité, croûte en surface,...), des **facteurs de composition** (présence d'inhibiteurs ou contaminants, forte teneur en ammonium, C/N, présence de fibres ou lipides, faible accessibilité de la matière biodégradable), des **facteurs réactionnels et biologiques** (moussage, perte à l'ensilage...), ou encore des **facteurs opérationnels** (contraintes réglementaires, de coûts...).

Les principaux facteurs limitants ont été recensés pour les différents types d'intrants :

Déjections animales :

- Présence régulière d'indésirables (pierres, sables, bois, ficelles, métaux)
- Pertes au stockage
- Contraintes mécaniques (introduction, pompage, agitation)
- Flottaison et faible cinétique de dégradation (paille)
- Faible C/N (sauf fumier pailleux)
- Présence de soufre (lisier porcin, fientes)

Productions végétales : CIVE / Herbe :

- Ensilage pour la conservation de la matière
- Présence d'indésirables (pierres, sables)
- Flottaison si ensilage grossier (> 25mm)
- Cinétiques de dégradation

system, and about fifteen interviews with equipment manufacturers and suppliers.

Finally, a synthesis of the elements of the previous parts, coupled with a bibliometric analysis, led to the proposal of recommendations (**part 4**).

Main results

Part 1: Resources and limiting factors

Based on tonnages and average methanogenic potential on a dry matter basis (Nm³ CH₄/tMS) for identified resources, **the biogas potential by 2030 is evaluated at 136 TWh/year**.

This value takes into account an agricultural scenario based on an increase of the introduction of intermediate crops in biogas units and a decrease of livestock manure as inputs on biogas units linked to the gradual reduction in livestock farming.

Agricultural resources represent 85% of the available deposit, in tonnage and energy by 2030, with 2/3 from crop residues, intermediate crops and dedicated crops and nearly 20% from manure. Waste represent the remaining 15% of the potential, of which 10% from urban waste (sewage sludge, biowaste) and 5% from industrial waste.

The challenges of pre-treatment are therefore concentrated on agricultural materials, which represent the largest proportion of the potential. Moreover, these are **mostly fibrous materials** requiring a first degradation stage before entering the digestion process.

The factors limiting the expression of the methanogenic potential are **physical factors** (viscosity, crystallinity, accessible surface, homogeneity, surface crust, etc.), **compositional factors** (presence of inhibitors or contaminants, high ammonium content, C/N, presence of fibers or lipids, low accessibility of the biodegradable material), **reactional and biological factors** (foaming, loss during ensiling, etc.), or **operational factors** (regulatory constraints, costs, etc.).

The main limiting factors were identified for the different types of inputs:

Animal manure:

- Regular presence of undesirables (stones, sand, wood, string, metals)
- Losses during storage
- Mechanical stresses (introduction, pumping, agitation)
- Floating and low degradation kinetics (straw)
- Low C/N (except straw manure)
- Presence of sulphur (pig manure, poultry manure)

Crop production: intermediate crops / grass:

- Silage for material conservation
- Presence of undesirable elements (stones, sand)
- Floating if silage > 25mm
- Degradation kinetics

Green waste from communities: grass clippings / green waste shreds / mowings:

- Degradation kinetics: high presence of lignin (green waste shreds)
- Presence of undesirable substances (stones, sand, plastics)

Déchets verts des collectivités : tontes / broyats de déchets verts / fauches :

- Cinétique de dégradation : forte présence de lignine (broyats de déchets verts)
- Présence d'indésirables (pierres, sables, plastiques)

Résidus agricoles : pailles de céréales / cannes de maïs / menues-pailles :

- Fortes contraintes mécaniques (introduction, pompage, agitation)
- Présence d'indésirables (pierres, sables)
- Cinétique de dégradation (lignine)
- Flottaison
- C/N élevé, soufre (colza)

Volet 2 : Synthèse bibliographique des technologies

Afin d'améliorer l'expression ou la conservation du potentiel méthanogène des biomasses méthanisables, différentes technologies de prétraitements existent, qu'elles soient mécaniques, physiques, thermiques, chimiques ou biologiques, envisagées seules ou en synergie.

Outre l'amélioration du pouvoir méthanogène, celles-ci peuvent avoir un impact positif sur le fonctionnement et l'entretien des outils (pompes, canalisation, mélangeur, agitateur) ainsi que sur leur consommation énergétique.

Les prétraitements mécaniques regroupent les différentes typologies de broyeurs, les systèmes d'extrusion, les malaxeurs en entrée de méthaniseur et les pompes dilacératrices. Parmi les **broyeurs**, nous retrouvons notamment : broyeurs à marteaux, à couteaux, à flux croisé... **La pompe dilacératrice** pompe et broie en une seule fonction, ce qui empêche le colmatage ou le blocage. Parmi les prétraitements mécaniques, l'**extrusion** bi-vis est un **procédé** de prétraitement physique prometteur pour la conversion de la **biomasse lignocellulosique**.

Les prétraitements physiques rassemblent les procédés de cavitation, d'ultrasons, de micro-ondes, de désintégration électrocyclique. Le prétraitement **micro-ondes** est l'une des méthodes de prétraitement physique. Le principal mécanisme est le rayonnement électromagnétique utilisant une large gamme de fréquences de 300 MHz à 300 GHz avec des longueurs d'onde allant de 1 mm à 1 m, respectivement. **Les procédés de cavitation**, aujourd'hui commercialisés sont des solutions en pleine expansion. On appelle cavitation la naissance et l'oscillation radiale de bulles de gaz ou de vapeur dans un liquide soumis à une dépression. Les **prétraitements ultrasons (sonication)** ont aussi été appliqués notamment sur les filières boues. La sonication consiste en la propagation d'ondes de pression dans un milieu liquide et en la formation de bulles de cavitation qui implosent violemment lorsqu'elles atteignent une taille critique. Une grande quantité d'énergie mécanique est alors libérée entraînant des phénomènes de fortes turbulences et de forts cisaillements au sein du liquide. Le prétraitement par **désintégration électrocyclique**, utilise des champs électriques de tension élevée (jusqu'à quelques dizaines de kilovolts) sur des pulses de quelques millisecondes. Finalement, le **procédé de centrifugeuse lyseuse** est une centrifugeuse traditionnelle à laquelle un système de lyse cellulaire a été ajouté. Les forces de cisaillement entre des lames fixes solidaires de la paroi interne de la centrifugeuse et des lames mobiles fixées sur le rotor conduisent à la désintégration partielle.

Les prétraitements thermiques et thermo-chimiques peuvent aussi être appliqués. Aujourd'hui, ce sont majoritairement des procédés thermiques à hautes températures qui sont appliqués notamment dans le cadre des

Agricultural residues: cereal straws / corn stalks / chaff:

- High mechanical stress (introduction, pumping, agitation)
- Presence of undesirables (stones, sand)
- Degradation kinetics (lignin)
- Floating
- High C/N, sulphur (rapeseed)

Part 2: Bibliographical summary of technologies

In order to improve the expression or conservation of the methanogenic potential of biomasses, various pre-treatment technologies exist, whether mechanical, physical, thermal, chemical or biological, considered alone or in synergy.

In addition to improve the biogas production, these technologies can have a positive impact on the operation and maintenance of equipment (pumps, pipes, mixers, agitators) as well as on their energy consumption.

Mechanical pretreatment includes different types of shredders, extrusion systems, mixers before anaerobic digester and dilution pumps. Among the shredders, we find in particular: hammer mills, knife mills, cross-flow shredders... The grinder pump pumps and grinds in a single function, which prevents clogging or blockage. Among mechanical pretreatments, twin-screw extrusion is a promising physical pretreatment process for lignocellulosic biomass conversion.

Physical pretreatments include cavitation, ultrasonic, microwave and electrokinetic disintegration processes. Microwave pre-treatment is one of the physical pre-treatment methods. The main mechanism is electromagnetic radiation using a wide range of frequencies from 300 MHz to 300 GHz with wavelengths ranging from 1 mm to 1 m, respectively. Cavitation processes, which are now commercially available, are a rapidly growing solution. Cavitation is the formation and radial oscillation of gas or vapour bubbles in a liquid under vacuum. Ultrasonic pre-treatment (sonication) has also been applied to sludge treatment. Sonication consists of the propagation of pressure waves in a liquid medium and the formation of cavitation bubbles which implode violently when they reach a critical size. A large amount of mechanical energy is then released, leading to strong turbulence and shear phenomena within the liquid. Pre-treatment by electrokinetic decay uses high voltage electric fields (up to a few tens of kilovolts) over pulses of a few milliseconds. Finally, the lysis centrifuge process is a traditional centrifuge to which a cell lysis system has been added. Shear forces between fixed blades attached to the inner wall of the centrifuge and moving blades attached to the rotor lead to partial disintegration.

Thermal and thermo-chemical pre-treatments can also be applied. Today, it is mainly high-temperature thermal processes that are applied, particularly in anaerobic digestion units treating urban sludge. Thermal hydrolysis can take place at high temperature, between 140 and 180°C under pressure or at low temperature. Thermal hydrolysis at temperatures below 80°C has also been studied, as these processes involve biological reactions and the duration is about ten hours to several days. In parallel, a chemical agent (acid, oxidant, alkaline) can also be added. Theoretical and chemical pre-treatments are used until now mainly at laboratory level and the chemicals used are sulphuric acid, phosphoric acid, soda, lime, etc.

Biological pre-treatments concern pre-treatments that involve micro-organisms or enzymes. This category includes silage, pre-composting, enzymatic or fungal pre-treatments.

unités de méthanisation traitant des boues urbaines. L'hydrolyse thermique peut avoir lieu à haute température, entre 140 et 180°C sous pression ou à faible température. L'hydrolyse thermique à des températures inférieures à 80°C a également été étudiée, ces procédés impliquant des réactions biologiques, les durées sont de l'ordre de la dizaine d'heures à quelques journées. En parallèle, un agent chimique (acide, oxydant, alcalin) peut aussi être ajouté. Les prétraitements thermo-chimiques sont jusqu'à présent majoritairement utilisés à l'échelle du laboratoire et les agents utilisés sont l'acide sulfurique, acide phosphorique, soude, chaux...

Les prétraitements biologiques concernent les prétraitements qui engagent des microorganismes ou des enzymes. Sont comptés dans cette catégorie l'ensilage, le pré-compostage de la matière, les prétraitements enzymatiques ou fongiques. Les prétraitements biologiques présentent l'avantage de CAPEX faibles, de simplicité de mise en œuvre mais certains nécessitent de travailler dans des conditions de stérilité afin d'éviter la consommation de la matière soluble par les organismes endogènes.

Volet 3 : Retours d'expériences terrain sur l'application de technologies de stockage et prétraitements

L'enquête a porté sur les équipements en fonctionnement sur des unités de méthanisation en France ou en Europe, on retrouve les principaux équipements de pré-traitements et de stockage : broyage, pré-compostage, inoculation, hydrolyse thermique, sonication, cavitation.

La série d'entretiens a permis de mettre en évidence les principaux **bénéfices** constatés grâce à la mise en œuvre d'un pré-traitement : **extraction** emballages et indésirables, réduction de la **croûte** en surface des cuves de digestion, diminution des pannes **d'agitation**, diminution du temps de **maintenance** sur la ligne de digestion, diminution de la quantité **d'indésirables** en digestion (cailloux, ferrailles, bouts de bois...), augmentation de la **cinétique de production** de biométhane, **concentration** des problèmes techniques en un seul point de l'installation, diminution des phénomènes de **bouchons** dans les canalisations coudées, possibilité d'intégrer une ration plus **fibreuse**, peu d'entretien quotidien, diminution des pertes de **potentiel méthanogène** au stockage (conservateurs et inoculants).

Les principales **limites** ont également été rapportées et ont porté sur un coût **d'investissement** élevé, des **charges** de maintenance importantes, une **consommation électrique** élevée, des concentrations des **contaminants** dans les digestats pouvant impacter leur épandage (hydrolyse thermique).

Volet 4 : Perspectives R&D sur les prétraitements en méthanisation

Les analyses et entretiens ont abouti à l'élaboration de **8 propositions** sur les perspectives de R&D sur ce thème.

- Disposer de données de référence sur les coûts

Aujourd'hui, aucune base de données exhaustive ne référence les coûts d'investissement et de fonctionnement (dont les consommations énergétiques) des différents prétraitements à l'échelle industrielle. Il pourrait être intéressant, à l'avenir de réaliser une étude dédiée spécifiquement à ce volet économique.

- Mettre en œuvre des projets à l'échelle industrielle

D'une manière générale, il est nécessaire que ces technologies de prétraitements puissent être testées sur des unités de méthanisation semi-industrielles voir industrielles afin d'en tirer

Biological pre-treatments have the advantage of low CAPEX and simplicity of implementation, but some require working under sterile conditions to avoid consumption of the soluble material by endogenous organisms.

Part 3: Feedback from users on storage and pre-treatment technologies

The survey focused on equipment in operation in anaerobic digestion units in France and Europe, and included the main pre-treatment and storage equipments: grinding, pre-composting, inoculation, thermal hydrolysis, sonication and cavitation.

*The series of interviews highlighted the main **benefits** of implementing pre-treatment : extraction of packaging and undesirable materials, reduction of the surface crust of the digestion tanks, reduction of agitation breakdowns, reduction of maintenance time on the digestion line, reduction of the quantity of undesirable materials in digestion (stones, scrap metal, pieces of wood...), increased biomethane production kinetics, concentration of technical problems in a single point of the installation, reduction of clogging phenomena in elbow pipes, possibility of integrating a more fibrous ration, little daily maintenance, reduction of losses of methanogenic potential in storage (preservatives and inoculants).*

*The main **limitations** were also reported and concerned a high investment cost, high maintenance costs, high electricity consumption, and concentrations of contaminants in the digestate that could have an impact on its spreading (thermal hydrolysis).*

Part 4: R&D perspectives for storage and pretreatment before anaerobic digestion

The analyses and interviews led to the development of 8 proposals.

- Get data references on costs

At present, there is no exhaustive database that references the investment and operating costs (including energy consumption) of the various pretreatments on an industrial scale. It could be interesting, in the future, to carry out a study specifically dedicated to this economic aspect.

- Implementing projects at industrial scale

Generally speaking, it is necessary for these pre-treatment technologies to be tested on semi-industrial or even industrial anaerobic digestion units in order to obtain information on their operation, implementation and energy consumption (CAPEX and especially OPEX).

- Identify the barriers limiting the development of pretreatment of atypical biomass

As regards atypical biomasses (lignocellulosic matrices, algae, biodegradable plastics, etc.), there is a lack of hindsight on the pretreatment technologies to be applied and their transfer to the industrial scale. Some technologies that have demonstrated their interest at the laboratory scale have not been transferred to the industrial scale and it is important to understand the technical or operational obstacles limiting these scale-ups. Steam explosion, already applied to sewage sludge, has shown promising results for the treatment of lignocellulosic matrices but its industrial implementation is more complex. Some pre-treatments used on an industrial scale, such as biological pre-treatments (enzymes/micro-organisms), do not have sufficient data on their overall economic interest in relation to the potential benefits.

des informations sur leur exploitation, mise en pratique et leur consommation énergétique (CAPEX et surtout OPEX).

- Identifier les **verrous limitant le développement** des prétraitements sur les biomasses atypiques

En ce qui concerne les biomasses atypiques (matrices lignocellulosiques, algues, plastiques biodégradables...), il y a un manque de recul sur les technologies de prétraitement à appliquer et leur transfert à l'échelle industrielle. Certaines technologies ayant démontré des intérêts à l'échelle laboratoire n'ont pas été transférées à l'échelle industrielle et il est important de comprendre les verrous techniques ou opérationnels limitant ces montées en échelle. L'explosion à la vapeur, déjà appliquée sur les boues d'épuration, a montré des résultats prometteurs pour le traitement des matrices lignocellulosiques mais sa mise en œuvre industrielle est plus complexe. Certains prétraitements utilisés à l'échelle industrielle tels que les prétraitements biologiques (enzymes/micro-organismes) ne disposent pas de suffisamment de données sur leur intérêt économique global au regard des bénéfices potentiels.

- Analyser les prétraitements sous le prisme de l'**amélioration de la rhéologie/viscosité** pour la diminution de la consommation énergétique

Les technologies de prétraitement peuvent modifier la rhéologie/viscosité des mélanges de biomasse, réduisant l'énergie relative au pompage et au mélange des cuves de méthanisation. Les technologies de prétraitement peuvent également contribuer à la réduction des croûtes et des dépôts de surface améliorant les transferts dans le méthaniseur. Plusieurs technologies de prétraitement telles que les traitements mécaniques, thermiques et enzymatiques ont montré leurs intérêts pour améliorer la rhéologie des intrants ou du digestat, limitant ainsi les consommations énergétiques (mélange, déshydratation).

- Analyser les impacts des prétraitements sur les **communautés microbiennes**

Une meilleure compréhension de l'impact des technologies de prétraitements sur les communautés microbiennes présentes dans les méthaniseurs est nécessaire. En effet, certaines technologies de prétraitement pourraient avoir un impact sur les communautés microbiennes et donc par conséquent sur les performances des méthaniseurs.

- Analyser les impacts des prétraitements sur les **digestats**

Une meilleure compréhension de l'impact des technologies de prétraitements sur la qualité agronomique des digestats et leur pouvoir de fertilisation et d'amendement organique. Les technologies de prétraitement peuvent pour certaines affecter la teneur en éléments nutritifs et la stabilité de la matière organique du digestat. À l'heure actuelle, peu d'études de recherche ont étudié l'impact des technologies de prétraitements sur ces paramètres.

- Analyser les impacts des prétraitements sur **les sols, les eaux**

Les technologies de prétraitements peuvent avoir une incidence positive ou négative sur les propriétés sanitaires des digestats. Il sera aussi important de pouvoir mesurer l'impact possible de certaines technologies de prétraitements sur les écosystèmes terrestres (vers de terre, bactéries, champignons...) et aquatiques (microalgues, daphnies, lentilles d'eau...) lors du retour au sol du digestat. Dans le cas des flux de biodéchets et/ou plastiques biodégradables, une attention toute particulière devra être portée sur le devenir des additifs et des microplastiques.

- *Analyse pre-treatments in terms of **improved rheology/viscosity** for energy reduction*

Pre-treatment technologies can modify the rheology/viscosity of biomass inputs, reducing the energy required for pumping and mixing the anaerobic digestion tanks. Pre-treatment technologies can also contribute to the reduction of surface crusting and deposition, improving transfer to the anaerobic digester. Several pre-treatment technologies such as mechanical, thermal and enzymatic treatments have been shown to improve the rheology of inputs or digestate, thus limiting energy consumption (mixing, dehydration).

- *Analyse the impact of pretreatments on **microbial communities***

A better understanding is needed of the impact of pretreatment technologies on the microbial communities present in anaerobic digesters. Indeed, some pre-treatment technologies could have an impact on microbial communities and therefore on the performance of anaerobic digesters.

- *Analyse the impact of pre-treatment on **digestates***

A better understanding is needed of the impact of pre-treatment technologies on the agronomic quality of digestates and their fertilising and organic amendment capacity. Some pre-treatment technologies can affect the nutrient content and organic matter stability of digestate. At present, few research studies have investigated the impact of pre-treatment technologies on these parameters.

- *Analysing the impacts of pretreatment on **soil, water and air***

Pre-treatment technologies can have a positive or negative impact on the health properties of digestates. It will also be important to be able to measure the possible impact of certain pre-treatment technologies on terrestrial (earthworms, bacteria, fungi, etc.) and aquatic (microalgae, daphnia, duckweed, etc.) ecosystems when the digestate is returned to the soil. In the case of biowaste and/or biodegradable plastic streams, particular attention should be paid to the fate of additives and microplastics.

- *Measuring the impacts of pre-treatment using **Life Cycle Assessment (LCA)***

A better understanding of the environmental benefit of these pre-treatment technologies is needed by carrying out life cycle analyses of the methanization process with and without the pre-treatment step.

Conclusion

This RECORD study has enabled us to highlight scientific advances at the laboratory and industrial levels concerning pretreatment applied to biogas units.

Some recommendations have been identified in order to improve the deployment and use of pretreatment technologies on an industrial scale.

The benefit of pretreatment cannot be judged solely on the gain in methanogenic potential or the improvement in degradation kinetics. In order to understand its full potential, it is important to look at the impact that pre-treatment can have on the rheology of the medium, the microbial communities, the quality of the digestate and the environment.

- Mesurer les impacts des prétraitements à partir d'**Analyses du Cycle de Vie (ACV)**

Une meilleure compréhension du bénéfice environnemental de ces technologies de prétraitements en réalisant notamment des analyses du cycle de vie de la filière méthanisation avec et sans la brique de prétraitements.

Conclusion

Cette étude RECORD a permis de mettre en évidence les avancées scientifiques aux échelles laboratoire et industrielle dans le domaine des prétraitements appliqués à la filière méthanisation.

Que ce soit à un niveau général ou selon les substrats, des pistes de développement ont été identifiées afin d'améliorer le déploiement et l'utilisation des technologies de prétraitements à l'échelle industrielle.

Le bénéfice d'un prétraitement ne peut se juger uniquement au gain de potentiel méthanogène ou à l'amélioration de la cinétique de dégradation. Afin de cerner tout son potentiel, il est important de regarder l'impact que peut avoir le prétraitement sur : la rhéologie du milieu, les communautés microbiennes, la qualité des digestats et l'environnement.