



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement,
des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Office fédéral de l'énergie OFEN

ÉTAT DE L'ART DES MÉTHODES (RENTABLES) POUR L'ÉLIMINATION, LA CONCENTRATION OU LA TRANSFORMATION DE L'AZOTE POUR LES INSTALLATIONS DE BIOGAZ AGRICOLES DE TAILLE PETITE/MOYENNE

Rapport final

Élaboré par

Toine BAKX, Yves MEMBREZ, Adèle MOTTET - EREP SA

Chemin du Coteau 28, 1123 Aclens, info@erep.ch, www.erep.ch

Adriano JOSS, Marc BOEHLER - EAWAG

Ueberlandstrasse 133, 8600 Duebendorf, info@eawag.ch, www.eawag.ch

Impressum

Date : 24 09 2009

Sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie, section recherche énergétique

Mühlestrasse 4, CH - 3063 Ittigen

Adresse postale : CH - 3003 Berne

tél. +41 31 322 56 11, fax +41 31 323 25 00

www.bfe.admin.ch

Responsable du domaine à l'OFEN : Sandra Hermle, sandra.hermle@bfe.admin.ch

Numéro OFEN du projet : **153470**

Source d'acquisition de cette publication : www.recherche-energetique.ch

Le ou les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions de ce rapport.

Préface

La méthanisation est en plein développement, accentuant ainsi la nécessité du traitement du digestat. Avec cette étude nous avons voulu livrer une présentation relativement complète des principales techniques de traitement du digestat, en nous basant sur la littérature existante. Ensuite, nous avons tenté de valider la plausibilité des chiffres et données spécifiques concernant ces techniques. Beaucoup d'indications viennent des constructeurs / fournisseurs ou de la recherche pilote, et ne sont donc pas toujours fondées sur une longue expérience. Tous les détails techniques et économiques n'ont donc pas pu être validés.

Le but de cette recherche est avant tout de donner une présentation claire et comparative des possibilités de traitement du digestat en axant sur la description de la technique et les conditions spécifiques telles que la consommation énergétique, la clarification autour des produits sortants, la répartition des composants fertilisants et les aspects environnementaux par rapport à la solution de base d'évacuation du digestat, qui est l'épandage.

Nous espérons que ce rapport servira de base pour une fructueuse poursuite du développement technologique du traitement du digestat issu des installations de biogaz.

Aclens, septembre 2009

Résumé

La méthanisation des effluents organiques et des déjections animales permet de produire de l'énergie sous forme de biogaz, en utilisant pour cela la pollution carbonée. Toutefois la plupart des effluents ainsi que les déjections contiennent, en plus des composés carbonés, des composés azotés comme les protéines qui produisent au cours de la méthanisation de l'azote ammoniacal. Ceci représente un vrai problème pour le devenir des produits méthanisés car, non seulement la pollution azotée totale est inchangée, mais encore cet azote est transformé sous une forme soluble et volatile : l'ammoniac. Lors de l'épandage des digestats l'ammoniac se volatilise, contribuant aux pluies acides.

Il y a de nombreuses manières de traiter l'azote, mais ces techniques ne sont pas toujours adaptées pour traiter le digestat issu d'une installation de biogaz agricole de taille petite/moyenne. Une application agricole demande une technique qui n'est pas trop sophistiquée et qui n'est pas chère en investissement ou en exploitation afin que la production de biogaz reste rentable.

Le but du projet a été de réaliser un état de l'art des techniques (rentables) existantes ou en développement pour le traitement de l'azote venant du digestat de la méthanisation, soit par élimination, concentration ou transformation. Les techniques utilisées ont également leur influence sur d'autres composants fertilisants tels que le phosphore et le potassium, et donc ces deux composants sont également pris en compte. Les techniques ont été analysées pour une utilisation à la sortie d'une installation de biogaz agricole de taille petite/moyenne. La base de comparaison est le stockage et l'épandage du digestat non-traité.

Le digestat est la matière digérée sortant du procédé de méthanisation. Ce produit organique a une bonne valeur fertilisante. Les principaux avantages induits par la méthanisation sur les caractéristiques du digestat par rapport aux engrains de ferme (lisiers, fumiers) sont : l'amélioration de la valeur fertilisante directe grâce à la minéralisation des composants d'azote organique en ammonium, la réductions des odeurs, la suppression des germes pathogènes et des graines d'aventices, d'avantage de fluidité (liquéfaction), la conservation des quantités d'azote, de phosphore et de potassium et l'amélioration du calcul de la disponibilité de l'azote.

Le digestat est désapprovisionné de même façon que les engrains de ferme, à savoir il est épandu sur les surfaces agricoles selon la pratique de fumure. Les principales émissions produites (ou relâchées) pendant l'épandage et le stockage sont les émissions dans l'air d'ammoniac (NH_3), de protoxyde d'azote (N_2O) et de méthane (CH_4), ainsi que le lessivage dans le sol des nitrates (NO_3^-) et la pollution du sol et des eaux avec des micropolluants et métaux lourds. Ces deux derniers sont seulement dépendant des contenus de ceux-ci dans les substrats entrants dans l'installation de biogaz.

Comme pendant la méthanisation la concentration d'ammonium et également le pH augmentent par rapport à l'engrais de ferme traité conventionnellement, ceci augmente le potentiel d'émissions d'ammoniac ; l'utilisation de la rampe à pendillards est donc recommandée pour l'épandage du digestat liquide. Pour prévenir les blocages dans cette rampe, le taux de matière sèche du produit à épandre doit être d'environ 8% au maximum.

Une installation de biogaz de taille petite/moyenne typique pour la Suisse est d'une puissance électrique du couplage chaleur-force d'environ 100 kW_é.

Une installation de référence a été dimensionnée, traitant du lisier bovin, des lavures, des huiles, des déchets de boulangerie, du marc de café et des déchets de céréales. La production annuelle de digestat se monte à 2'450 m³, à un contenu d'azote total de 5.7 kg/m³ et de 3.4 kg/m³ d'azote soluble (principalement l'ammonium).

Beaucoup de techniques utilisées pour le traitement du digestat sont issues du traitement du lisier porcin, un produit comparable avec le digestat, afin d'éliminer son contenu en azote dans des régions qui connaissent déjà des excédents.

Une recherche bibliographique a permis de trouver des articles présentant les traitements disponibles pour le lisier et le digestat. Ceux-ci proviennent de la Suisse et de pays voisins, notamment la France, la Belgique, les Pays-Bas, l'Allemagne et l'Autriche. D'autres sources bibliographiques et des

catalogues de fournisseurs ont été trouvés grâce aux mots-clés dans différents outils de recherche et différentes langues.

Les techniques sont basées sur un traitement biologique, chimique, physique ou une combinaison de ces procédés pour le traitement soit de la phase liquide, soit de la phase solide du digestat. Une séparation mécanique de phases est donc dans la plupart de ces cas la première étape.

Par type de traitement les aspects suivants ont été abordés :

- Description du procédé. La base technique est expliquée avec un schéma de fonctionnement. Le début du procédé est fixé à l'endroit le moment où le digestat sort du digesteur.
- Conditions spécifiques telles que l'emprise de l'installation, la consommation en produits chimiques, les sources d'énergie utilisées ainsi que leurs consommations.
- Indications sur les coûts, exprimés en CHF par m³ ou tonne de digestat. Ces coûts comprennent les frais financiers relatifs à l'amortissement et les frais d'exploitation.
- Suite au schéma du procédé les produits finaux sortants sont présentés, ainsi qu'un bilan de masse par produit en pourcentage du poids de digestat entrant dans le traitement, ceci pour les éléments fertilisants, N, P et K.
- Les émissions atmosphériques (NH₃, CH₄, N₂O), à l'eau et au sol des produits sortants sont comparées à la technique de base qui est l'épandage par rampe à pendillards.
- Une brève comparaison des avantages / contraintes de la méthode.
- Le retour d'expérience, quelques références ainsi que les perspectives

Les techniques abordées ont été: la presse à vis, la centrifugeuse, la filtration membranaire, le strippage avec lavage acide, le strippage avec combustion catalytique, l'évaporation, le sécheur à bandes, la précipitation de struvite, le compostage et le traitement biologique. Ensuite une courte description a été présentée de quelques autres procédés (en développement).

Les émissions venant des différentes méthodes ont été comparées par rapport à l'épandage par la rampe à pendillards. La presse à vis et la centrifugeuse émettent autant que l'épandage ; le sécheur à bandes montre un peu moins d'émissions. La filtration membranaire, le strippage avec lavage acide, l'évaporation et la précipitation struvite, montrent beaucoup moins d'émissions grâce à la grande réduction d'ammonium dans le digestat et également à son immobilisation par baisse du pH (filtration membranaire, évaporation), par formation de sulfate d'ammonium (strippage avec lavage acide) ou une précipitation dans une phase solide (struvite précipitation). Le strippage avec combustion, le compostage et le traitement biologique émettent plus à cause des émissions de N₂O à l'air.

Les méthodes qui permettent de réduire fortement le contenu d'azote (plus de 50%) sont la filtration membranaire, le strippage avec lavage acide, l'évaporation, la précipitation struvite et le traitement biologique. Quatre méthodes permettent de bien conserver l'azote, à savoir la filtration membranaire, le strippage avec lavage acide, l'évaporation et la précipitation struvite.

Même si l'azote est bien réduit, les quantités toujours épandables et les volumes de stockage nécessaires ne changent guère par rapport à l'épandage du digestat non-traité. Seules l'évaporation et la filtration membranaire permettent de réduire significativement la quantité à épandre ainsi que son stockage.

Afin d'apprécier la facilité d'opération de la technique pour une application à une échelle d'une exploitation agricole, plusieurs aspects ont été évalués selon une analyse multicritère, à savoir : les équipements techniques (le nombre d'équipements augmente la complexité), la stabilité des procédés, le degré d'automatisation, la main d'œuvre nécessaire pour l'exploitation, la manutention et les réparations et les risques par rapport à la sécurité, dont l'utilisation des produits chimiques.

Si l'on considère la simplicité de la technique pour une application à une exploitation agricole, la presse à vis, la centrifugeuse et le traitement biologique sont les trois les plus évidentes ; la dernière étant la seule à vraiment réduire le contenu d'azote dans le digestat.

L'analyse économique et la comparaison entre les techniques est sommaire, car on s'est basé sur de nombreuses estimations. L'analyse économique de notre installation de référence montre une somme utilisable pour le financement du stockage, traitement et épandage du digestat de CHF 29.40 par m³ de digestat.

En regardant les frais de stockage, de traitement et d'épandage, les techniques rentables sont la presse à vis, la centrifugation et le compostage. En prenant compte des frais finaux (frais techniques, stockage /épandage *et redevance vente produit exporté*) les techniques de strippe à lavage acide, évaporation, et précipitation de struvite pourraient également devenir rentables. La filtration membranaire, le strippe avec combustion et le traitement biologique ne sont économiquement pas faisables. Il faut noter que les frais de chaleur ne sont pas pris en compte et seules les redevances estimées des produits exportés sont présentées, sans leurs charges.

Des nouvelles variantes sur le traitement biologique sont en développement, comme Anammox et le biofiltre en suspension, qui pourraient permettre de réduire les émissions de N₂O, la consommation énergétique et les coûts d'investissement afin de devenir attractif pour une application à petite échelle.

Les techniques de traitement du digestat les plus positives par rapport à la réduction des émissions à l'épandage du digestat non-traité, sont celles qui ne s'avèrent pas rentables pour une installation de biogaz de taille petite/moyenne (la filtration membranaire, le strippe avec lavage acide, l'évaporation, la précipitation de struvite). Les traitements précités engendrent une conservation / concentration de l'azote et permettent donc une exportation de celui-ci vers les régions en demande. De cette façon l'azote issu d'un traitement de digestat peut remplacer celui des engrains minéraux.

Zusammenfassung

Die Vergärung von organischen Abwässern und tierischen Ausscheidungen ermöglicht die Energieproduktion in Form von Biogas, wobei die Kohlenstoffbelastung genutzt wird. Allerdings enthalten diese Abwässer und Ausscheidungen neben Kohlenstoffverbindungen auch Stickstoffverbindungen wie Proteine, welche während der Vergärung zu Ammoniumstickstoff umgewandelt werden. Dies stellt im Hinblick auf die Verwendung der vergärten Produkte ein wichtiges Problem dar, denn während die Gesamt-Stickstoffbelastung unverändert bleibt, wird der Stickstoff in eine wasserlösliche und volatile Form gewandelt: Ammoniak. Beim Ausbringen des Gärkuchens verflüchtigt sich der Ammoniak und trägt damit zum sauren Regen bei.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, den Stickstoff zu behandeln, jedoch sind die Technologien oft nicht geeignet für die Behandlung von Gärkuchens aus kleinen/mittleren landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Für eine rentable Biogasproduktion im landwirtschaftlichen Sektor braucht es eine einfache Technik, für welche die Investitions- und Betriebskosten tief sind.

Das Ziel des Projekts war die Erstellung einer Übersicht der Stand der Technik, bestehend oder in Entwicklung, zur Behandlung des Stickstoffs im Gärkuchens durch Eliminierung, Konzentrierung oder Umwandlung. Dabei wurden nur wirtschaftlich interessante Varianten in Betracht gezogen. Die verwendeten Techniken haben auch einen Einfluss auf andere Komponenten mit Düngewert, wie Phosphor und Kalium. Letztere sind deshalb auch in die Studie einbezogen worden. Die Techniken wurden im Rahmen einer Anwendung am Auslass einer kleinen/mittleren landwirtschaftlichen Biogasanlage analysiert. Der Vergleich bezieht sich auf die Lagerung und die Ausbringung des Gärkuchens.

Die vergorene Masse, die aus dem Faulturm austritt, wird Gärkuchens genannt. Dieses organische Produkt hat einen hohen Düngewert. Die Vorteile von Gärkuchens im Vergleich zu herkömmlichem Hofdünger (Gülle, Mist) sind: der bessere Düngewert durch die Mineralisierung des organischen Stickstoffs zu Ammonium, die Verminderung der Geruchsemissionen, die Eliminierung von pathogenen Keimen und Unkraut, die bessere Fliessfähigkeit, die Erhaltung der Stickstoff-, Phosphor- und Kaliumfracht, und eine bessere Berechnung der Pflanzenverfügbarkeit des Stickstoffs.

Das Gärkuchens wird auf die gleiche Weise verwertet wie herkömmlicher Hofdünger, er wird auf den landwirtschaftlichen Nutzflächen ausgebracht. Die wichtigsten negativen Auswirkungen während der Lagerung und Ausbringung sind die Emissionen von Ammoniak (NH_3), Lachgas (N_2O), und Methan (CH_4), sowie die Auswaschung der Nitraten (NO_3) im Boden und die Verschmutzung des Bodens und Grundwassers mit Schwermetallen und Mikroverunreinigungen. Die letzten beiden Aspekte hängen direkt von der Belastung der in den Faulturm eintretenden Substrate ab.

Weil während der Vergärung die Ammoniumkonzentration und der pH ansteigen, erhöht sich auch das Emissionspotential des Ammoniaks; die Verwendung des Schleppschlauchverfahrens wird für die Ausbringung des flüssigen Gärkuchens empfohlen. Um Verstopfungen zu vermeiden, muss der Trockengehalt im Gärkuchens bei höchstens 8% liegen.

Eine kleine/mittlere Biogasanlage in der Schweiz beansprucht im Durchschnitt eine Wärme-Kraft-Koppelung mit einer elektrischen Leistung von ungefähr 100 kW_{el}.

Eine Referenzanlage, die Rindermist, Öle, Waschwasser, Abfälle einer Bäckerei, Kaffeesatz und Getreideabfälle vergärt, wurde dimensioniert. Jährlich produziert diese Anlage 2'450 Tonnen Gärkuchens mit einer Gesamt-Stickstoffkonzentration von 5.7 kg/m³ und 3.4 kg/m³ wasserlöslichem Stickstoff (hauptsächlich Ammonium).

Viele der verwendeten Techniken zur Behandlung von Gärkuchens stammen aus der Behandlung von Schweinegülle. In Regionen mit Überschüssen ist die Problematik der Eliminierung des Stickstoffs der Gülle vergleichbar mit jener von Gärkuchens.

Anhand einer Literaturrecherche konnten Artikel bezüglich der verfügbaren Behandlungsmöglichkeiten von Gülle und Gärkuchens ausfindig gemacht werden. Die Artikel stammen aus der Schweiz und Nachbarländern wie Frankreich, Belgien, Niederlanden, Deutschland und Österreich. Andere Literaturquellen und Herstellerkataloge wurden mit Hilfe von Schlüsselwörtern in verschiedenen Suchmaschinen und Sprachen gefunden.

Die Techniken basieren auf biologischen, chemischen und physischen Behandlungen der festen oder flüssigen Fraktion des Gärkörpers. Eine mechanische Separierung der Fraktionen ist also meist die erste Etappe der Behandlung.

Für jede Behandlungsmöglichkeit wurden die folgenden Aspekte beschrieben:

- Beschreibung des Prozesses. Die technischen Grundlagen werden anhand eines Schemas erklärt. Der Prozessbeginn wird beim Austritt des Gärkörpers aus dem Faulturm festgelegt.
- Die spezifischen Eigenschaften wie die Fläche, die in Anspruch genommen wird, der Verbrauch von Chemikalien, die verwendeten Energiequellen sowie deren Verbrauch.
- Angaben zu den Kosten, ausgedrückt in CHF pro m³ oder Tonne Gärkörper. In diesen Kosten sind Aufwände in Bezug auf die Amortisierung und die Betriebskosten enthalten.
- Die Endprodukte werden beschrieben. Je Produkt wird eine Massenbilanz erstellt; dies für die düngenden Elemente N, P und K. Die Masse wird in Prozent des zu behandelnden Gärkörpers ausgedrückt.
- Die Emissionen in die Atmosphäre (NH₃, CH₄, N₂O), ins Wasser und in den Boden durch die Endprodukte werden mit der herkömmlichen Technik, der Ausbringung mit dem Schleppschlauchverfahren, verglichen.
- Eine zusammenfassende Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile der Methode.
- Eine Zusammenfassung der Erfahrungen, einige Referenzen sowie die Perspektiven.

Die evaluierten Techniken waren: Schneckenpresse, Zentrifuge, Membranfiltration, Stripping mit saurer Wäsche, Stripping mit katalytischer Verbrennung, Evaporation, Bandrockner, Struvitfällung, Kompostierung und eine biologische Behandlung. Einige weitere Verfahren (in Entwicklung) wurden beschrieben.

Die Emissionen durch die verschiedenen Methoden wurden mit jenen durch das Schleppschlauchverfahren verglichen. Bei den Methoden mit der Schneckenpresse und der Zentrifuge entstehen gleich viele Emissionen wie bei der herkömmlichen Ausbringung; bei dem Bandrockner konnte eine leichte Verringerung gezeigt werden, während bei der Membranfiltration, Stripping mit saurer Wäsche, Evaporation und Struvitfällung eine beträchtliche Verringerung der Emissionen gezeigt werden konnte. Letztere konnte durch eine Reduzierung des Ammoniums im Gärkörper und seiner Immobilisierung folglich der pH-Senkung (Membranfiltration, Evaporation), durch die Bildung von Ammoniumsulfat (Stripping mit saurer Wäsche) oder durch die Fällung zu einer festen Fraktion (Fällung von Struvit) erreicht werden. Stripping mit katalytischer Verbrennung, Kompostierung und die biologische Behandlung verursachen sogar eine höhere Umweltbelastung wegen den N₂O-Emissionen.

Die Methoden, welche eine effiziente Reduzierung (mehr als 50%) des Stickstoffgehalts erlauben, sind die Membranfiltration, Stripping mit saurer Wäsche, Evaporation, Struvitfällung und die biologische Behandlung. Vier Methoden erlauben die Erhaltung des Stickstoffs, nämlich die Membranfiltration, Stripping mit katalytischer Verbrennung, Evaporation und Struvitfällung.

Auch wenn der Stickstoffgehalt reduziert wird, verändern sich die auszubringenden Mengen und die Lagervolumen kaum im Vergleich zur Ausbringung des unbehandelten Gärkörpers. Einzig die Evaporation und Membranfiltration bringen hier eine relevante Reduzierung.

Zur Evaluierung der Verwendbarkeit einer Technik auf einer landwirtschaftlichen Anlage wurden verschiedene Kriterien in Betracht gezogen: technische Ausrüstung (die Anzahl Apparate erhöht die Komplexität), Stabilität des Verfahrens, Automatisierungsgrad, Arbeitsaufwand für den Betrieb, Handhabung, Reparaturen sowie Sicherheitsrisiko, wie der Umgang mit Chemikalien.

Wenn man die Einfachheit der Techniken für die landwirtschaftliche Anwendung mit in Betracht zieht, schneiden die Schneckenpresse, die Zentrifuge und die biologische Behandlung am besten ab; wobei einzig letztere den Stickstoffgehalt relevant reduziert.

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse und der Vergleich der Techniken sind kurzgefasst, weil viele Schätzungen vorgenommen wurden. Die Wirtschaftlichkeitsanalyse der Referenzanlage zeigt, dass für Lagerung, Behandlung und Ausbringung mit CHF 29.40 pro m³ Gärgetreid gerechnet werden kann.

Bei Betrachtung der Lagerungs-, Behandlungs- und Ausbringungskosten, sind die Schneckenpresse, die Zentrifuge und die Kompostierung die rentabelsten Technologien. Bei Betrachtung der Endkosten (Kosten für Technik, Lagerung/Ausbringung *und* Einnahmen durch Verkauf der Produkte) zeigt sich, dass auch die Strippung mit saurer Wäsche, Evaporation und Struvitfällung rentabel sein könnten. Die Membranfiltration, Strippung mit katalytischer Verbrennung und die biologische Behandlung sind aus der ökonomischen Sicht nicht sinnvoll. Es ist zu bemerken, dass die Heizkosten nicht in Betracht gezogen wurden und nur die geschätzten Verkaufsgebühren der Produkte beachtet wurden.

Neue Methoden im Bereich der biologischen Behandlung, wie Anammox und wirbelbett Biofilmreaktor, sind im Entwicklungsstadium. Diese könnten die N₂O-Emissionen, den Energiekonsum und die Investitionskosten reduzieren, was sie für eine Anwendung in kleinem Rahmen attraktiv machen würde.

Die Behandlungstechniken mit den besten Resultaten bezüglich der Emissionen während der Ausbringung des unbehandelten Gärgetreides, sind jene, die sich als nicht rentabel erweisen für eine kleine/mittlere Biogasanlage (Membranfiltration, Strippung mit saurer Wäsche, Evaporation, Struvitfällung). Die erwähnten Behandlungsmöglichkeiten verursachen eine Erhaltung / Konzentrierung des Stickstoffs und ermöglichen somit eine Ausfuhr des letzteren in eine Region mit Stickstoffmangel. Auf diese Weise kann der aus einer Behandlung gewonnene Stickstoff einen Mineraldünger ersetzen.

Abstract

The digestion of organic effluents and animal excrements, while using their carbon pollution, results in an energy production in the form of biogas. However, most of these effluents and excrements contain beside carbon compounds nitrogen components, like proteins, which are converted into ammonium during the digestion process. This presents a real problem for the product leaving the digestion process, since not only the total nitrogen pollution remains unchanged, but also has the nitrogen been transformed in a soluble and volatile form: ammoniac. During the land spreading of the digestate the ammoniac volatilises and contributes to acid rains.

There are numerous ways to treat the nitrogen, but these technologies are not always adapted to treat the digestate from a small/middle size agricultural biogas plant. An application at farm level requires a technique not too sophisticated, cheap in investment or in operation in order to keep the biogas production economically feasible.

The goal of the project has been the conception of a state of the art on existing (economically feasible) technologies or processes in development, to treat the nitrogen from the digestate leaving the anaerobic digestion, by means of removal, concentration or transformation. The used technologies have also their influence on other fertilising elements present in the digestate like phosphorus and potassium and so these two components are also taken into account. The techniques have been analysed for an application following a small/medium size agricultural biogas plant. The basis for comparison between the techniques is the storage and land spreading of untreated digestate.

Digestate is the fermented matter leaving the anaerobic digestion process. This organic product has good fertilizing characteristics. The principal advantages induced by the anaerobic digestion on the digestate characteristics in comparison with livestock effluents (manures / slurries) are : improvement of the directly available fertilizing value due to the mineralisation of the organic nitrogen components into ammonium, odour reduction, the elimination of pathogens and weed seeds, increased fluidity (liquefaction), conservation of the nitrogen, phosphorus and potassium quantities and amelioration of the calculation of the nitrogen availability.

The digestate is recycled in the same way as the livestock effluents: it is spread on agricultural surface according to common manuring practice. The principal emissions produced (or released) during land spreading and storage are air emissions of ammoniac (NH_3), nitrous oxide (N_2O) and methane (CH_4), as well as leaching into the soils of nitrates (NO_3) and soil and water pollution with micro pollutants and heavy metals. The emissions of the last two depend only on their original content in the substrates begin fed to the biogas plant.

During the anaerobic digestion the ammonium concentration increases, as well as the pH, resulting in an increase of the emission potential of ammoniac in comparison with the livestock effluents conventionally treated. The use of a dribble bar with flexible hoses for the slurry spreading is the technique recommended for the land spreading of the liquid digestate. To prevent blockages, the dry matter content must be about 8% maximum.

A typical Swiss small/medium size agricultural biogas plant has an electrical power production of about 100 kW from its combined heat power plant (CHP) unit. A reference installation has been designed, treating cow slurry, organic restaurant waste, used plant oils, bakery waste, coffee marc, and cereal waste. The yearly digestate production mounts at $2'450 \text{ m}^3$, with a total nitrogen concentration of 5.7 kg/m^3 and 3.4 kg/m^3 of soluble nitrogen (mainly ammonium).

Many technologies in use for digestate treatment have their origins in the treatment of pig slurries, a product comparable with the digestate, in order to reduce its nitrogen content in regions that cope already with an excess of it.

A literature research was conducted to find information regarding available treatment techniques for slurry and digestate treatment. The information came from Switzerland and its surrounding countries, like France, Belgium, Netherlands, Germany and Austria. Other literature sources and catalogues of technology suppliers have been found using keywords in different search machines and in different languages.

The techniques are based on biological, chemical, physical processes or a combination of them for treating either the liquid phase, or the solid phase of the digestate. A mechanical separation of the liquid and solid phase is therefore in most cases the first treatment step.

Per technique the following aspects were presented:

- Description of the process. The basic principles of the process are explained and a process scheme is presented. The start of the treatment process is fixed at the point where the digestate leaves the anaerobic reactor.
- Specific conditions as required surface, chemical consumption, energy sources used, as well as their consumptions respectively.
- Costs indication, presented as CHF per m³ or tonne de digestate. These costs include expenses related to amortization and running costs.
- Following the process scheme, all products leaving the treatment are presented as well as a mass balance per product for the fertilizing elements N, P and K, expressed as weight percentage of its content in the digestate entering the process.
- The emissions into air (NH₃, CH₄ and N₂O), water and soil of the products are compared with the basic treatment which is the land spreading by dribble bar with flexible hoses.
- A brief listing of the advantages and constraints.
- Feedback from experience, some references as well as perspectives.

The techniques presented are: screw press separator, centrifuge, membrane filtration, air stripping with acid wash, air stripping with catalytic combustion, evaporation, band dryer, struvite precipitation, composting and biological treatment. Also a brief overview is presented showing some other processes (in development).

The emissions from the different treatment techniques have been compared with land spreading with a flexible hose dribbling bar. The screw press separator and centrifuge emit as much as the land spreading option; the band dryer emits less. The membrane filtration, air stripping with acid wash, evaporation and struvite precipitation show a lot less emissions thanks to a large reduction of the ammonium content in the digestate as well as its immobilisation by pH decrease (membrane filtration and evaporation), an ammonium sulphate formation (air stripping with acid wash) or thanks to a precipitation into a solid phase (struvite precipitation). The catalytic combustion air stripping, composting and biological treatment produce more emissions due to the air emission of nitrous oxide.

The methods allowing strongly reducing the nitrogen content (over 50%) are membrane filtration, air stripping with acid wash, evaporation, struvite precipitation and biological treatment. Four techniques permitting a good conservation of the nitrogen are membrane filtration, air stripping with acid wash, evaporation and struvite precipitation.

Even if the nitrogen content is well reduced, the total quantities still to be spread on land and the required storage volumes do not change a lot in relation to the amounts spread and stored of the untreated digestate. Only evaporation and membrane filtration allow a significant reduction of the quantities to be land spread as well as the storage volumes.

To appreciate the technique's ease of operation for an agricultural application, several aspects have been evaluated according to a multi criteria analysis taking into account: the amount of technical equipment (the more equipment the more its complexity), the process stability, the degree of automation, the labour required for exploitation, maintenance and repairs, and the security related risks, like the use of chemicals.

If the simplicity of the technique is considered for an application at farm level, the screw press separator, the centrifuge and the biological treatment are the three most evident; the last one is the only treatment which really reduces the nitrogen content in the digestat.

The economical analysis and the comparison between techniques are coarse because they are based on numerous assumptions. The economical analysis of our reference biogas plant shows an amount

attributable for financing the storage, treatment and land spreading of the digestate of CHF 29.40 per m³ digestate.

When looking at the expenses for storage, treatment and final land spreading, the economically feasible techniques are the screw press separator, the centrifuge and the composting. When looking at the final expenses (including income from sale of fertilizing products) techniques like air stripping with acid wash, evaporation and struvite precipitation might also become economically feasible. The membrane filtration, catalytic combustion air stripping and biological treatment are not. It must be noted that expenses for heating are not taken into account and only the income on sold fertilizer products is presented, without their corresponding charges.

New variants of biological treatment are being developed, like the Anammox process and moving bed biofilm reactor that allow reducing the N₂O emissions, the energy consumption and investment costs in order to become attractive for small scale applications.

The most positive treatment techniques with regard to the reduction of the emissions compared to the land spreading of untreated digestate are those who are not economically feasible for a small/medium size agricultural biogas plant (membrane filtration, air stripping with acid wash, evaporation and struvite precipitation). The cited techniques are able to conserve / concentrate the nitrogen and allow therefore an exportation of it to regions in deficit. In this way the nitrogen recovered for the digestate treatment can replace the mineral fertilizers.

Table des matières

1. Introduction.....	13
1.1 Contexte.....	13
1.2 But du projet	13
1.3 Démarche de travail.....	13
2. Le digestat	15
3. Émissions lors de l'épandage du digestat.....	17
3.1 L'ammoniac.....	18
3.2 Le protoxyde d'azote	18
3.3 Le méthane	19
3.4 Lessivage des nitrates	19
3.5 Micropolluants et métaux lourds.....	20
3.6 Technique de l'épandage du digestat liquide	20
3.7 Technique de l'épandage du digestat solide	20
4. Politique de l'azote	22
4.1 Suisse	22
4.1.1 Protection des eaux	22
4.1.2 Protection de l'air	24
4.1.3 Situation actuelle.....	25
4.1.4 Développement.....	26
4.2 Union Européenne.....	26
4.2.1 Protection des eaux	26
4.2.2 Protection de l'air	27
4.2.3 Développement.....	27
5. Définition d'une installation de méthanisation de type agricole de taille petite/moyenne	28
6. Méthode.....	31
6.1 Méthode de la recherche.....	31
6.2 Types de traitement	31
6.3 Valorisation des produits sortants	32
6.4 Méthodes de traitement d'azote	33
6.5 Structure de la description des procédés	33
7. Revue des techniques	35
7.1 Buts du traitement du digestat.....	35
7.2 Séparation mécanique de phases	35
7.2.1 Presse à vis.....	35
7.2.2 Centrifugation.....	37
7.3 Filtration membranaire par ultrafiltration/osmose inverse	40
7.4 Strippage d'ammoniac	44
7.4.1 Introduction	44
7.4.2 Strippage et combustion catalytique.....	46
7.4.3 Strippage et lavage acide	49

7.5 Évaporation/condensation	51
7.6 Séchage thermique.....	54
7.6.1 Introduction	54
7.6.2 sécheur à bandes.....	54
7.7 Précipitation de struvite	58
7.8 Compostage	61
7.9 Traitement biologique	64
7.10 Autres techniques	68
7.10.1 Strippage et lavage avec gypse.....	68
7.10.2 Pyrolyse	69
7.10.3 Anammox	69
7.10.4 Traitement biologique par un biofiltre en suspension	70
7.10.5 Bioréacteur à membranes.....	71
7.10.6 Digestaero.....	71
7.10.7 Traitement biologique extensif filtre à roseau	72
7.10.8 Séchage solaire sous serre	72
7.10.9 Combinaison des différentes techniques.....	73
8. Analyse.....	74
8.1 Facilité d'opération.....	74
8.2 Aspects environnementaux	75
8.3 Bilan matière	77
8.4 Coûts de stockage et d'épandage	78
8.5 Aspects énergétiques	79
8.5.1 Consommation énergétique	79
8.5.2 Substitution énergie pour production des engrais minéraux	81
8.6 Valorisation des produits exportés comme engrais.....	81
8.7 Analyse économique	83
8.7.1 Analyse économique installation biogaz sans traitement digestat.....	83
8.7.2 Analyse économique des techniques de traitement	84
8.8 Analyse finale	85
8.8.1 Analyse générale des méthodes de traitement	85
8.8.2 Installation de biogaz de taille petite/moyenne	86
8.8.3 Installation de biogaz de grande capacité	86
Bibliographie.....	87
Liste d'abréviations.....	89
Liste de figures et tableaux	90

1. Introduction

1.1 Contexte

La méthanisation des effluents organiques et des déjections animales permet de produire de l'énergie sous forme de biogaz, en utilisant pour cela la pollution carbonée. Toutefois la plupart des effluents ainsi que les déjections contiennent, en plus des composés carbonés, des composés azotés comme les protéines qui produisent au cours de la méthanisation de l'azote ammoniacal. Ceci représente un vrai problème pour le devenir des produits méthanisés car, non seulement la pollution azotée totale est inchangée, mais encore cet azote est transformé sous une forme soluble et volatile : l'ammoniac. Lors de l'épandage des digestats l'ammoniac se volatilise, contribuant aux pluies acides.

Il y a de nombreuses manières de traiter l'azote, mais ces techniques ne sont pas toutes adaptées pour traiter le digestat issu d'une installation de biogaz agricole de taille petite/moyenne. Une application agricole demande une technique qui n'est pas trop sophistiquée et qui n'est pas chère en investissement ou en exploitation afin que la production de biogaz reste rentable.

1.2 But du projet

Le but du projet est de réaliser un état de l'art des techniques (rentables) existantes ou en développement pour le traitement de l'azote venant du digestat de la méthanisation, soit par élimination, concentration ou transformation.

Les techniques utilisées ont également leur influence sur d'autres composants fertilisants tels que le phosphore et le potassium, et donc ces deux composants sont également pris en compte.

Ensuite ces techniques sont analysées pour une utilisation dans une installation de biogaz agricoles de taille petite/moyenne. Dans cette analyse, une attention spécifique est focalisée sur les aspects suivants:

- La facilité d'opération
- Les aspects environnementaux
- Le bilan matière
- Les coûts de stockage et d'épandage
- Les aspects énergétiques
- La valorisation des produits exportés comme engrains
- L'analyse économique :
 - Analyse économique de l'installation de biogaz
 - Analyse économique des techniques de traitement de l'azote
- L'analyse finale

Parallèlement à l'inventaire et l'analyse des techniques, on passera en revue la politique par rapport à l'azote en Suisse mais aussi en Europe.

1.3 Démarche de travail

La démarche de travail est définie comme suit :

- **Chapitre 2** : Définition du digestat et ses composants fertilisants
Les principales caractéristiques du digestat sont présentées
- **Chapitre 3** : Les principales émissions lors de l'épandage du digestat sont décrites

La méthode de base pour le désapprovisionnement du digestat est l'épandage dans les alentours de l'installation de biogaz, comme pour les engrains de ferme. Les émissions sont principalement de l'ammoniac (NH_3), du protoxyde d'azote (N_2O) et du méthane (CH_4) relâchés dans l'air.

Il y a aussi le lessivage dans le sol des nitrates (NO_3^-) et la pollution du sol et des eaux par des micropolluants et métaux lourds.

- **Chapitre 4** : La politique suisse et européenne concernant les principales émissions
Toute une politique suisse et européenne est mise en place pour régler/prévenir la contamination des eaux (souterraines) par les nitrates, à cause de la surfertilisation avec des effluents d'élevage. Un rappel de la politique est présenté dans cette démarche ainsi que son développement.
- **Chapitre 5** : Définition d'une installation de méthanisation de type agricole de taille petite/moyenne et les caractéristiques de son digestat
À part quelques exceptions, la Suisse, à cause de sa structure agricole, ne peut pas vraiment accueillir des grandes installations. La plupart des installations sont donc de taille petite/moyenne. Cette démarche permet de définir une installation de taille typique. Suivant cette définition, la quantité et qualité du digestat sortant sont elles aussi définies.
- **Chapitre 6** : Méthode de la recherche
- **Chapitre 7** : Revue des techniques de traitement de l'azote
Une recherche bibliographique a permis de donner un aperçu des techniques en se basant sur des articles présentant également des techniques de traitement du digestat ou des lisiers.
- **Chapitre 8** : L'analyse des techniques pour l'installation agricole définie
Les techniques présentées dans la revue sont comparées au niveau de la facilité de la technique, des émissions, des coûts, de leur efficacité du traitement, c'est-à-dire la réduction de la quantité (en azote) à épandre et de la possibilité de la vente des produits sortants comme engrains minéraux ou engrais de recyclage. Ensuite, l'application de ces techniques pour l'installation de petite/moyenne taille définie avant, a été évaluée.

2. Le digestat

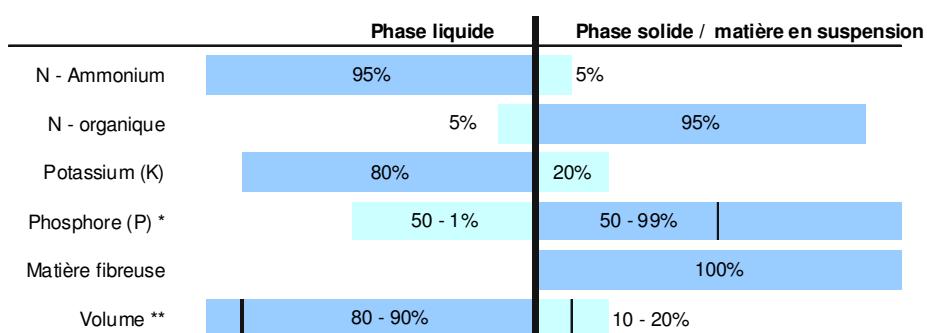
Le digestat représente la matière digérée sortant du procédé de méthanisation. Ce produit organique a une bonne valeur fertilisante et selon l'Ordonnance sur la mise en circulation des engrais (Ordonnance sur les engrais, OEng), il est défini comme engrais de recyclage (engrais d'origine végétale, animale, microbienne ou minérale ou provenant de l'épuration des eaux).

Les caractéristiques du digestat dépendent du type d'installation de méthanisation et des substrats digérés.

En général, pour ce qui concerne les éléments fertilisants et les amendements, le digestat se caractérise comme suit par rapport aux produits organiques entrants de l'installation de méthanisation:

- Matière organique : Environ 50 – 80% de la matière organique biodégradable est éliminée et est évacuée du digesteur sous forme de biogaz.
- Azote (N) : La quantité d'azote entrant dans l'installation en ressort dans le digestat.
La méthanisation provoque un changement de la distribution entre l'azote présent sous forme organique et l'azote présent sous forme d'ammonium, une de ses formes minérales. Lors du traitement biologique anaérobiose l'azote organique, donc l'azote incorporé dans la masse organique est transformé en ammonium, l'azote minéral. Le ratio de l'ammonification d'azote est environ proportionnel au rendement de l'élimination de la matière organique.
- Phosphore (P) : De même que pour l'azote, la quantité de phosphore entrant dans l'installation en ressort.
- Potassium (K) : De même que pour l'azote et le phosphore.
- Matières ligneuses/fibreuses : La méthanisation n'est pas capable d'éliminer toute la matière ligneuse/fibreuse. Cette matière sort également telle quelle du digesteur car elle a été broyée avant d'entrer en méthanisation pour prévenir des risques de blocages dans le système. La matière sortante contient donc des fibres fines qui peuvent servir comme amendement du sol.

La figure 1 suivante montre la répartition des éléments fertilisants entre la fraction solide et liquide du digestat.



* Dépend de l'utilisation des coagulants / flocculants pour la séparation de la phase solide

** Dépend de la technique utilisée

Figure 1: répartition des composants fertilisants dans le digestat liquide et solide [adapté IBBK]

La fraction liquide du digestat représente la plus grande partie du volume et contient la majorité de l'azote minéral (sous forme d'ammonium) et du potassium et, suivant le traitement et l'application des flocculants/coagulants pour améliorer la séparation, entre 1 et 50% du phosphore. Le phosphore est de façon homogène reparti entre la phase solide/ matière en suspension (non-dissout) et la phase liquide (dissout). En captant plus de matière en suspension par dosage de flocculants/coagulants, où se trouve également le phosphore non-dissout, celui-ci est aussi plus évacué dans la phase solide.

La phase solide est riche en matière fibreuse, ainsi qu'en phosphore et en azote organique.

En fait, selon leur solubilité les composants se trouvent soit dans la phase liquide soit dans la phase solide. La technique et liée à celle-ci le rendement de la séparation des ces phases, déterminent la répartition finale des fertilisants.

En général, la méthanisation ne change pas les quantités en macroéléments N, P et K, donc ces éléments sont conservés et elle induit une amélioration de la valeur fertilisante directe grâce à la minéralisation des composants d'azote organique en ammonium.

Le digestat issu d'une fermentation anaérobiose des engrains de ferme présente des caractéristiques différentes du lisier non fermenté. La teneur en matière sèche et la viscosité du lisier sont diminuées par la fermentation : le digestat liquide coule ainsi mieux que le lisier non fermenté et peut s'infiltrer plus rapidement dans le sol. Le processus fermentaire fait diminuer la teneur en azote lié à la matière organique du lisier et augmenter la teneur en azote ammoniacal. Il en résulte également une élévation du pH.

Les principaux avantages induits par la méthanisation sur les caractéristiques du digestat par rapport aux engrains de ferme (lisiers, fumiers) sont :

- Réductions des odeurs
- Réduction des germes pathogènes et des graines d'adventices
- D'avantage de fluidité (liquéfaction)
- Conservation des quantités d'azote, de phosphore et de potassium
- Amélioration du calcul de la disponibilité de l'azote pour les plantes grâce à l'augmentation de la partie d'ammonium par rapport à la teneur en l'azote total [Meier].

3. Émissions lors de l'épandage du digestat

Le digestat est désapprovisionné de même façon que les engrains de ferme, à savoir il est épandu sur les surfaces agricoles selon la pratique de fumure.

Vu que ses composants sont comparables à ceux se trouvant dans les engrains de ferme, les émissions dans l'environnement sont donc également comparables.

Les principales émissions produites (ou relâchées) ici sont les émissions dans l'air d'ammoniac (NH_3), de protoxyde d'azote (N_2O) et de méthane (CH_4), ainsi que le lessivage dans le sol des nitrates (NO_3^-) et la pollution du sol et des eaux avec des micropolluants et métaux lourds.

Les principaux gaz émis par l'agriculture sont l'ammoniac (NH_3), le méthane (CH_4) et le protoxyde d'azote (N_2O), les deux derniers sont des gaz à effet de serre, le premier étant connu pour la pluie acide et la problématique du lessivage des nitrates dans les sols : l'ammoniac n'est pas stable dans l'atmosphère et donc n'est pas relevant pour le réchauffement global. D'un autre côté, le CH_4 et le N_2O ont des potentiels de réchauffement climatique (GWP) 21 et 310 fois plus importants que le CO_2 .

L'émission des composants azotés est très dominante par rapport aux autres composés. La figure 2 suivante présente le cycle de l'azote à l'échelle d'une parcelle afin de montrer les sources d'émission de ces composants.

Concernant les substances organiques volatiles odorantes (par exemple les mercaptans et les acides organiques volatils), celles-ci sont éliminées pendant la digestion. La méthode de traitement du digestat ne change pas beaucoup au niveau de ces émissions.

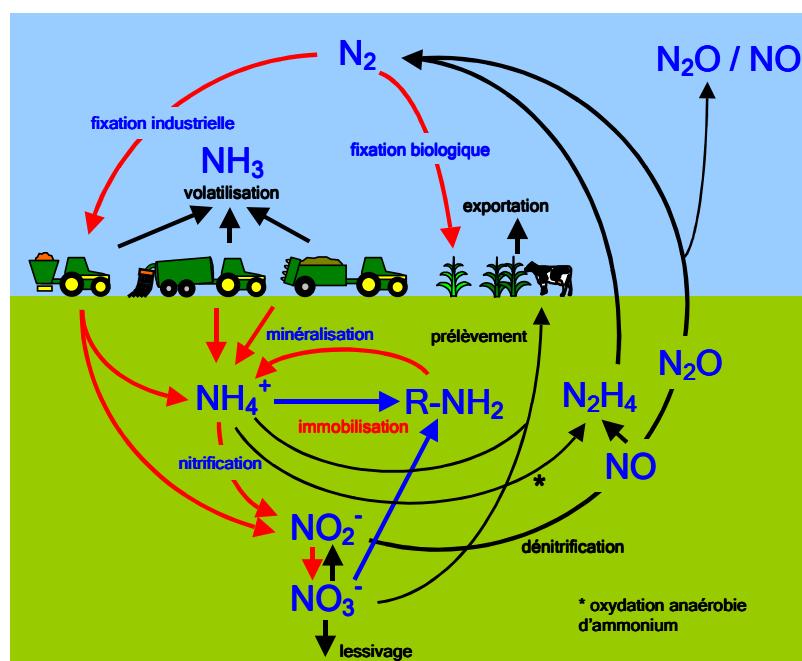
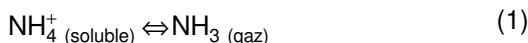


Figure 2: cycle de l'azote à l'échelle d'une parcelle [Revue Suisse d'Agirculture, adapté selon Jetten]

Les émissions d'ammoniac se produisent pendant et juste après l'épandage des produits contenant de l'ammonium, les émissions de protoxyde d'azote pendant la nitrification et la dénitrification de nitrate / nitrite ($\text{NO}_3^- / \text{NO}_2^-$) et le surdosage d'ammonium engendre un excès de nitrates non-utilisés par les plantes et donc le lessivage de celui-ci.

3.1 L'ammoniac

L'ammonium (dissous dans l'eau, NH_4^+) est en équilibre avec l'ammoniac (gaz, NH_3), sous dépendance du pH et mesure de la température :



La concentration en ammoniac par rapport à ammonium se calcule avec l'équation suivante :

$$\frac{[\text{NH}_3]}{[\text{TNH}_3]} = \frac{1}{1 + 10^{\frac{\text{pH} - 0.09018 + \frac{2729.29}{T(K)}}{}}}} \quad (2)$$

Avec :

- $[\text{NH}_3]$: concentration ammoniac libre
- $[\text{TNH}_3]$: somme des concentrations d'ammonium et d'ammoniac libre
- pH
- T : température en Kelvin

La figure 3 suivante montre la répartition entre l'ammonium et l'ammoniac à 10, 30 et 60°C, calculé sur la base de la formule ci-avant.

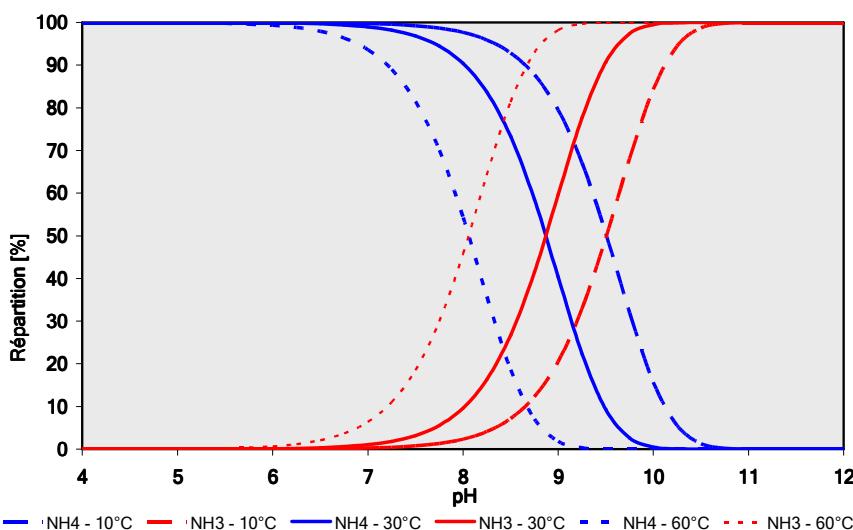


Figure 3: répartition entre ammonium (liquide) et ammoniac (gaz) en relation avec le pH

Jusqu'à un pH de 6 – 8 (dépendant la température) l'équilibre (selon formule 1) est 100% en direction de l'ammonium. À partir du pH 8 (30°C), la répartition change très rapidement en faveur de l'ammoniac. La température joue également un rôle important. À un pH 8, la répartition d'ammoniac est de 2%, 10% et 46% pour une température de 10, 30 et 60°C respectivement.

3.2 Le protoxyde d'azote

Le protoxyde d'azote (N_2O) est un produit intermédiaire du procédé de la dénitrification de nitrite (NO_2^-) / Nitrate (NO_3^-), ceux-ci formés dans la dénitrification qui est un procédé biologique aérobie, voir figure 2. L'émission de N_2O lors de la nitrification a également été documentée, mais son importance n'est aujourd'hui pas encore quantifiable (diverses études sont en cours).

Le protoxyde d'azote peut se former dans les procédés biologiques aérobies, donc par exemple à la surface liquide/air pendant le stockage du digestat (dont 75% réduction des émissions quand la surface est couverte avec une bâche, [Edelmann]) et dans le sol après l'épandage.

L'agriculture suisse est responsable pour 75 – 79% des émissions de N_2O en Suisse [OFEV(1)]. Il existe 2 sources d'émissions : la manutention (stockage inclus) des engrains de ferme (16% des émissions agricoles) et les terres agricoles (84% des émissions de l'agriculture et donc 65% du total

émis en Suisse). Les études sur la quantification d'autres sources d'émissions de N₂O, telles que le traitement biologique des eaux usées, la nitrification/dénitrification dans l'eau de surface et les terres non-agricoles sont en cours.

C'est en fait en utilisant les engrais de ferme et le digestat comme composants fertilisants, que la plupart des émissions se produisent, ce qui fait donc partie de la fermeture du cycle de l'azote.

La recherche sur les émissions azotées s'est portée sur les émissions de N₂O seulement depuis quelques années. Il n'y a pas beaucoup de données disponibles sur ces émissions.

Il existe des contrariétés entre les mesures pour réduire les émissions de NH₃ qui en même temps peuvent augmenter les émissions de N₂O. Par exemple, mélanger les fertilisants tout de suite dans le sol après épandage, ou épandre avec la rampe à pendillards, peut bloquer les pores du sol, créant des conditions anoxiques et donc augmentant la dénitrification, ce qui finalement peut provoquer l'augmentation des émissions en N₂O [Meier].

3.3 Le méthane

La méthanisation des engrais de fermes, donc la réduction de la matière organique encore présente, empêche la méthanisation préalable dans le stockage, ce qui donc réduit nettement les émissions de méthane [KTBL]. Il faut quand-même respecter un temps de séjour minimum dans le digesteur. Après la méthanisation mésophile (30 °C) et thermophile (50 °C) et un temps de séjour d'environ 60 jours, presque plus de méthane est produit et donc émis (voir la figure 4 ci-dessous).

Pour prévenir les émissions dans le stockage, il faut le couvrir de manière étanche.

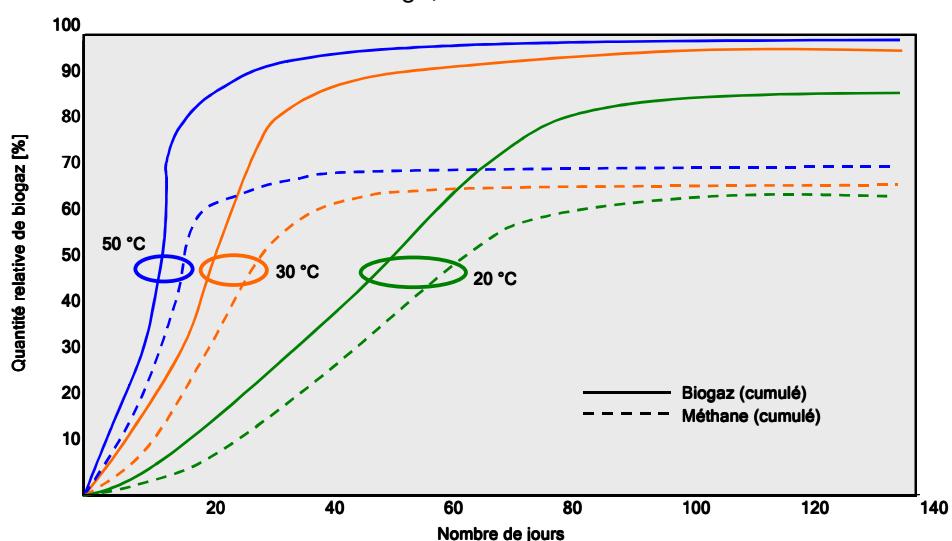


Figure 4: relation production de biogaz et la température [Eder]

3.4 Lessivage des nitrates

Les nitrates sont formés dans le sol par le processus microbien de la nitrification. Le nitrate est la forme la plus disponible de l'azote du sol mais, de ce fait, elle est très sujette au lessivage [Revue Suisse]. Le lessivage se produit quand le sol est en fait surfertilisé et tout nitrate n'est pas prélevé par les plantes. Le lessivage est donc directement lié aux quantités d'azote épandues, et des restrictions sont mises en place par la législation afin de minimiser l'impact sur l'environnement (voir chapitre sur la politique). Les techniques de traitement de l'azote du digestat n'y changent rien sur les quantités épandues par hectare, mais par contre les restrictions sur les quantités épandables en relation avec la surface disponible peuvent rendre nécessaire le traitement du digestat afin de pouvoir exporter le surplus d'azote dans d'autres régions.

3.5 Micropolluants et métaux lourds

Les micropolluants et métaux lourds ne sont pas produits pendant la méthanisation, mais font déjà partie des entrants. Pendant la digestion, les métaux lourds restent inchangés, ainsi que la plupart des micropolluants. On peut dire que ce qui entre, sort également, vu que très peu de ces polluants sont biodégradables par voie anaérobie. La seule façon donc de limiter ces émissions est d'être restrictif sur les produits entrants de la méthanisation.

3.6 Technique de l'épandage du digestat liquide

La technique de l'épandage a une très forte influence sur la volatilisation de l'ammoniac et une forte réduction est réalisée avec les techniques qui épandent directement sur ou dans le sol, comme la rampe à pendillards, l'enfouisseur à patins et l'injection. Une réduction d'émissions d'au moins 50% est possible. Pour la Suisse la meilleure technique pour l'épandage des engrais de ferme est la rampe à pendillards [Edelmann] et [Darbellay]. Elle n'est pas la meilleure technique vis-à-vis de la réduction de volatilisation d'ammoniac, mais elle présente le meilleur compromis entre réduction d'ammoniac et facilité de la technique [Darbellay].

Pendant la méthanisation la concentration d'ammonium et également le pH montent par rapport à l'engrais de ferme ce qui augmente le potentiel d'émissions d'ammoniac. [Hersener, Meier, Revue Suisse] recommandent donc également l'utilisation de la rampe à pendillards pour l'épandage du digestat liquide. La figure 5 suivante montre la rampe à pendillards. Pour prévenir les blocages dans cette rampe, le taux de matière sèche du produit à épandre doit être d'environ 8% au maximum.



Figure 5: rampe à pendillards [source Joskin]

Selon [Coûts machines 2008] l'investissement pour une tonne à lisier avec rampe à pendillards varie de CHF 44'000,- pour une citerne de 5'000 l avec rampe de 9m largeur à CHF 67'000,- pour une citerne 12'000 l avec rampe de 12m. Les coûts pour l'épandage (tracteur + rampe) de 2'500 tonnes/an sont calculés à CHF 5.80 / tonne. En plus une cuve de stockage pour une période de 3 - 4 mois doit être prévue. Celle-ci doit être couverte afin de prévenir les émissions de protoxyde d'azote et d'ammonium. Il n'est pas prévu une cuve 100% étanche pour récupérer tout le méthane encore émis, pour limiter les coûts de stockage. Les coûts d'investissement (cuve + couverture par bâche) sont estimés à CHF 70,- par m³ de volume et les frais d'amortissement sont estimés à CHF 5.60 / m³ de volume par an.

3.7 Technique de l'épandage du digestat solide

Cette variante est en fait l'option pour épandre du digestat solide quand une séparation de phase paraît nécessaire afin de ne pas causer des blocages dans les tuyaux de la rampe pendillards.

Les émissions d'ammonium pendant l'épandage sont environ 20% plus élevées que pour l'épandage du lisier. En revanche, la séparation de phases permet d'éliminer les grandes particules (> 300 micron) de matière qui réduirait la capacité d'infiltration après l'épandage et améliore la vitesse d'infiltration dans le sol et réduit donc l'émission d'ammoniac [Meier]. Au total une séparation de phases et l'épandage séparé de la phase liquide et solide pourrait donc réduire les émissions

d'ammoniac d'environ 17.5% pour le lisier bovin, selon [Hersener]. Le digestat est épandu par exemple depuis un épandeur de fumier à deux hérissons verticaux, voir la figure 6.



Figure 6: épandeur de fumier à deux hérissons verticaux [source Joskin]

Selon [Coûts machines 2008] l'investissement pour un épandeur de fumier varie entre CHF 17'000,- (1.5 – 3t) et CHF 72'000,- (10-15t). Les coûts d'investissement d'un épandeur moyen (6 – 8t) sont d'environ CHF 37'000,-. Les coûts pour l'épandage (tracteur et épandeur) de 500 tonnes/an sont calculés à CHF 12.90/ tonne. Également un stockage de 3 - 4 mois doit être prévu. Les coûts de celui-ci sont estimés à CHF 73.60 par m² [KTBL] et les frais d'amortissement sont estimés à CHF 5.90 / m² de surface par an.

4. Politique de l'azote

4.1 Suisse

On distingue deux axes dans la politique liée aux émissions d'azote en agriculture. Il est réglementé dans le cadre de la protection des eaux ainsi que dans celui de la protection de l'air.

4.1.1 Protection des eaux

Méfaits de l'azote émis par l'agriculture sur l'eau

L'azote ainsi que d'autres matières fertilisantes comme le phosphore entraînent une eutrophisation des eaux superficielles. Ce phénomène d'appauvrissement en oxygène et d'enrichissement en matières organiques est naturel à grande échelle temporelle mais est fortement accéléré par l'activité humaine et agricole, notamment l'apport de matière organique et d'éléments fertilisants. Comme source de nutriment la disponibilité sous forme de nitrate, d'ammonium ou d'azote organique est comparable.

En plus, l'ammoniac et le nitrite ont des effets toxiques au niveau cellulaire ce qui justifie les concentrations limites plus basse que pour les nitrates ou l'azote organique (voir tableau 1 à la page suivante)

Exigences pour l'épandage des engrains de ferme et des digestats

L'Ordonnance sur la mise en circulation des engrains (OEng) décrit la différence entre les engrains de ferme (lisier, fumier) et les engrains de recyclage (compost, digestat).

Les engrains de ferme sont : lisier, fumier, produits issus de la séparation du purin, coulage du tas de fumier et des silos et autres résidus provenant de la garde d'animaux ou de la production végétale de sa propre exploitation ou d'autres exploitations agricoles. Ils peuvent contenir 20% ou plus de matériel d'origine non-agricole. Ceux-ci doivent respecter les valeurs limites concernant les polluants.

Quant à l'azote, il est considéré comme un élément fertilisant majeur au même titre que le phosphore et le potassium.

Capacité de stockage et surface des exploitations agricoles

La Loi sur la protection des eaux (LEaux), afin de limiter la pression des excédents d'engrais de ferme sur les sols et les eaux, réglemente la taille des exploitations agricoles face aux surfaces d'épandage. Ainsi les exploitations agricoles doivent posséder une surface d'épandage utile suffisante pour l'épandage de 3 UGBF (Unité Gros Bétail de Fumure) par hectare. En agriculture biologique, cette quantité est diminuée à 2.5 UGBF/ha (Ordonnance sur l'agriculture biologique).

N.B. : 1 UGBF équivaut à la production annuelle moyenne d'engrais de ferme d'une vache de 600kg. Cette quantité d'engrais de ferme contient 105kg d'azote et 15kg de phosphore avant les pertes inévitables en étables et dues aux stockages.

De plus le capacité de stockage doit être suffisante pour stocker au minimum 3 mois de production d'engrais de ferme. Cette capacité de stockage peut être augmentée par l'autorité cantonale dans des cas particuliers (zones de montagne, zones aux conditions météorologiques défavorables, zones de production végétale particulières).

Épandage des engrais de ferme et de recyclage

L'utilisation de ces engrais est réglementée par l'Ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques (ORRChim). Outre les exigences sur la qualité des engrais de ferme et de recyclage, cette ordonnance dicte des principes d'emploi.

Doivent être pris en considération lors de l'épandage :

- Les éléments nutritifs présents dans le sol et les besoins des plantes en éléments nutritifs (recommandations de fumure)
- Le site (végétation, topographie et conditions pédologiques)
- Les conditions météorologiques
- Les restrictions imposées par les législations sur la protection des eaux, la protection de la nature et du paysage et la protection de l'environnement, ou ayant fait l'objet d'un accord sur la base de cette législation.

Il est interdit d'épandre des engrains contenant de l'azote en dehors des périodes pendant lesquelles les plantes peuvent l'absorber, sans précision sur la durée de cette période et quand elle intervient dans l'année. De plus, l'épandage d'engrais liquides est interdit lorsque les sols sont saturés d'eau, gelés, couverts de neige ou desséchés.

Concernant les composts et digestats solides, leur épandage en tant qu'engrais est autorisé à la hauteur de 25t par ha sur une durée maximale de 3 ans. Si leur épandage est effectué à des fins d'amendement, un ha de terre ne doit pas recevoir plus de 100t de matière sur une durée de 10 ans.

L'épandage du digestat liquide en tant qu'engrais est autorisé à la hauteur de 200 m³ par ha.

Dans le cadre de la protection des eaux, l'Ordonnance sur la protection des eaux (OEaux) fixe les teneurs suivantes dans les eaux de surface et souterraines (voir tableau 1)

Tableau 1 : Exigences sur les concentrations maximales en ammonium et nitrate, selon l'OEaux. Le nitrite est réglementé seulement dans les décharges (< 0.3 mg NO₂⁻ - N / l)

		Ammonium : NH ₄ ⁺ + NH ₃	Nitrate : NO ₃ ⁻
Cours d'eau	T>10°C	0,2mg _N /l	5,6mg _N /l
	T<10°C	0,4mg _N /l	
Eaux souterraines	Conditions oxydantes	0,08mg _N /l	5,6mg _N /l
	Conditions anoxiques	0,4mg _N /l	

Pour parvenir à respecter ces exigences, l'Ordonnance susmentionnée définit des zones de protection des eaux souterraines et superficielles sur lesquelles l'épandage est réglementé :

Tableau 2 : Définition des zones de protection des eaux particulièrement menacées et souterraines

Secteurs de protection des eaux particulièrement menacées	A _u	Secteur de protection des eaux souterraines	
	A _o	Secteur de protection des eaux superficielles	
	Z _u	Aire d'alimentation d'eaux souterraines prélevées par un captage	Épandage régit par les autorités cantonales
	Z _o	Aire d'alimentation d'eaux superficielles polluées	Épandage régit par les autorités cantonales
	S1	Zone de captage	Interdiction d'épandre les engrais de ferme et de recyclage
Périmètres de protection des eaux souterraines	S2	Zone de protection rapprochée	Interdiction d'épandre les engrais de ferme et de recyclage liquides
	S3	Zone de protection éloignée	

Il est interdit d'épandre des engrais de ferme dans les eaux superficielles (lacs, cours d'eau, etc.) et sur une bande de 3m le long de celles-ci. C'est également le cas pour les régions classées réserves naturelles, les roselières et marais, les hais et les bosquets ainsi que sur une bande de 3m le long de ceux-ci, les forêts ainsi que sur une bande de 3m le long de celles-ci.

En agriculture biologique l'Ordonnance du DFE sur l'agriculture biologique autorise l'utilisation des composts et digestats provenant de déchets ménagers si leur besoin a été mis en évidence. Les digestats d'engrais de ferme n'y sont pas explicitement autorisés. En revanche les excréments d'animaux et les fumiers compostés le sont ainsi que les excréments d'animaux liquides après fermentation contrôlée.

4.1.2 Protection de l'air

Méfaits de l'azote émis par l'agriculture sur l'air

L'**ammoniac** développe une forte odeur mais participe surtout à la formation de particules fines nocives pour les systèmes respiratoires. Mais ce n'est pas tant par son effet sur l'homme que l'ammoniac est dangereux mais surtout par son effet sur l'environnement.

D'une part l'ammoniac étant très soluble dans l'eau, il forme alors une solution acide qui est la cause des pluies acides. Celles-ci ont des conséquences fâcheuses sur la végétation et provoquent l'acidification des sols.

D'autre part cette déposition de composés atmosphériques azotés sur les sols participe également à la surfertilisation de certains écosystèmes comme les prairies naturelles, les marais et les forêts. Cela aboutit, comme pour les eaux, à une eutrophisation du sol et la prolifération d'espèces végétales privilégiant une nourriture riche en azote par rapport aux autres.

Les émissions d'ammoniac proviennent à 93% de l'agriculture et de la sylviculture, plus précisément du stockage et de l'épandage de purin et de fumier, comme montre la figure 7 suivante. L'épandage avec la rampe à pendillards a donc un potentiel pour réduire ces émissions.

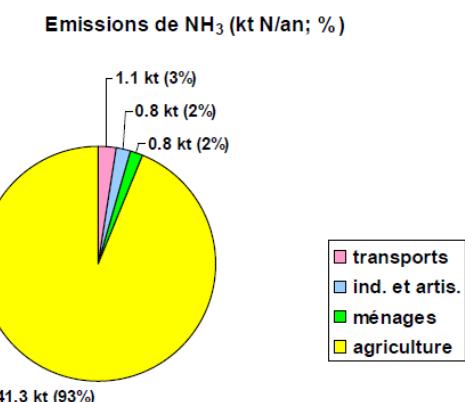


Figure 7: Emissions d'ammoniac en 2000, OFEFP

Le **protoxyde d'azote** (N_2O) est quant à lui inoffensif pour les êtres humains et animaux. En revanche, c'est un gaz à effet de serre dont le potentiel de réchauffement est 310 fois plus élevé que celui du CO_2 . Selon l'Office Fédéral de l'Energie [OFEN] les émissions de N_2O représenteraient 6% des émissions totales de gaz à effet de serre en Suisse. La figure 8 suivante illustre l'évolution de ces émissions de 1990 à 2007 [OFEN]. Depuis 1990 les émissions de N_2O sont diminuées et depuis 2003 elles restent stables.

Exigences pour l'épandage des engrains de ferme et digestats

Pour l'Ordonnance sur la protection de l'air (OPair), l'**ammoniac** (NH_3) est défini comme une substance inorganique sous forme de gaz ou de vapeur. Cependant, il ne fait pas partie des polluants atmosphériques pour lesquels une valeur limite d'immission a été fixée. En effet lors de l'entrée en vigueur de cette Ordonnance, les efforts se sont concentrés sur la réduction des émissions d'autres polluants atmosphériques comme les oxydes d'azote (NO_x), les composés organiques volatils (COV), etc. non émis par l'agriculture.

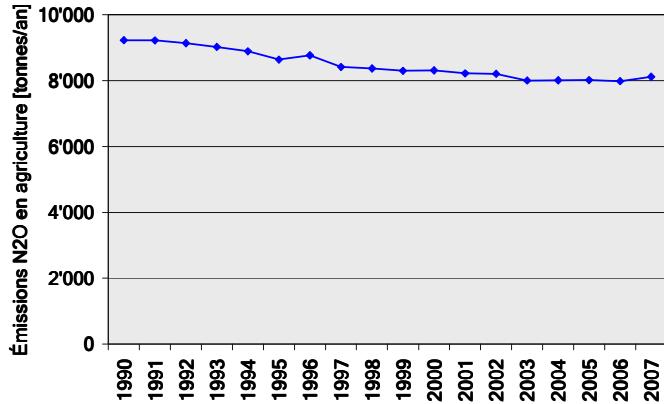


Figure 8: Evolution des émissions de N₂O provenant de l'agriculture en Suisse de 1990 à 2007 [OFEN]

L'immission est tout de même considérée comme excessive lorsqu'elle menace l'homme, les animaux, les plantes, leurs biocénoses ou leurs biotopes où qu'elle porte atteinte à la fertilité du sol, à la végétation, ou à la salubrité des eaux.

Les machines d'épandage sont considérées comme des installations stationnaires. Or, il n'existe de valeur limite d'émission d'ammoniac pour les installations stationnaires que lorsque ces émissions sont captées et évacuées, ce qui n'est pas le cas pour les machines d'épandage.

Pourtant, comme il est prouvé que l'épandage, notamment traditionnel, favorise la volatilisation de l'ammoniac contenu dans les engrains de ferme, l'Office Fédéral de l'Environnement se base sur la prise de position de Cercle Air (Société suisse des responsables de l'hygiène de l'air) dans son rapport sur les réductions des émissions d'ammoniac provenant de l'agriculture et promeut les techniques d'épandage qui y sont proposées afin de diminuer cette volatilisation (ex. rampe à pendillards).

La Suisse a ratifié le Protocole de Kyoto en juillet 2003. Cet acte l'engage à réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 5,2% en moyenne par rapport à 1990 de 2008 à 2012. Le **protoxyde d'azote** est concerné par ce Protocole. Cependant, les mesures adoptées ou prévues en Suisse comme l'entrée en vigueur de la Loi sur le CO₂ visent principalement les émissions de CO₂ et non celles de N₂O.

4.1.3 Situation actuelle

Malgré la réglementation, les terres agricoles sont en excédent d'azote, comme le montre la figure 9 suivante [OFS] :

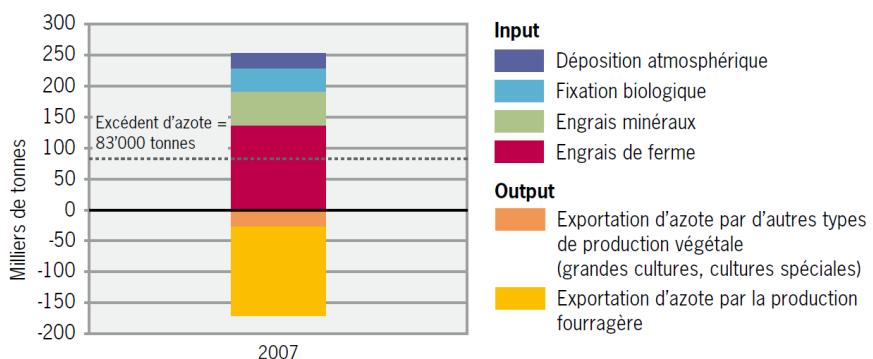


Figure 9: Bilan entre les entrants et les sortants d'azote sur les terres agricoles pour l'année 2007 [OFS]

Les mesures prises par la Confédération ont sans doute permis de diminuer les émissions d'azote provenant de l'agriculture mais il faut également considérer l'accroissement du cheptel qui malheureusement les compense.

De même, selon l'Office Fédéral de la Statistique, en 2005, les teneurs maximales en nitrate définies par l'Ordonnance sur la protection des eaux pour les eaux souterraines utilisées comme eau potable ont été dépassées dans 100 des 523 stations de mesure, soit dans 19,1% des cas. Ces

dépassements sont cependant les plus fréquents dans les zones dominées par les grandes cultures, ou jusqu'à 60% des stations connaissent de tels dépassements.

La Confédération a pour cela intégré l'art. 62a à la Loi sur la Protection des Eaux qui permet aux Cantons de mettre en place des mesures ciblées dans les zones dont les eaux sont polluées par les nitrates. Des compensations sont octroyées aux agriculteurs par la Confédération lorsqu'ils pâtissent de la mise en place de ces projets d'assainissement.

Les agriculteurs ont également la possibilité de recevoir des "paiements directs" au sens de l'Ordonnance sur les Paiements Directs lorsqu'ils effectuent des prestations fournies dans l'intérêt général (paiements directs généraux) ou dans le domaine de l'écologie (contributions écologiques). Ces paiements directs ont été mis en place par la Confédération pour plusieurs objectifs, dont réduire la pollution des eaux par les nitrates. Un plan de fumure équilibré et l'interdiction de fumure sur certaines surfaces agricoles sont, entre autres, des conditions pour l'octroi de ces paiements directs.

4.1.4 Développement

Des mesures restrictives sont bien en place pour la réduction des émissions d'azote (ammoniac, protoxyde d'azote, nitrates). Il reste à en contrôler l'application.

Malgré la réglementation, les terres agricoles sont en excédent d'azote. Il y a des régions plus concernées (surtout concernant les nitrates dans les eaux souterraines) en raison d'une forte concentration de bétail, ce qui les rend intéressantes pour la méthanisation.

4.2 Union Européenne

On distingue, comme pour la politique suisse, deux grands axes dans la politique européenne relative à l'azote : la protection des eaux et la protection de l'air.

4.2.1 Protection des eaux

La Directive n°91/676/CEE du 12 Décembre 1991 concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles est la principale mesure prise par l'Union Européenne concernant l'azote d'origine agricole. Elle vise à réduire la pollution des eaux provoquée ou induite par les nitrates à partir de sources agricoles et à prévenir toute nouvelle pollution de ce type. Une eau douce superficielle et une eau souterraine est atteinte par la pollution lorsque sa concentration en nitrate dépasse 50 mg/l (11.3 mg NO₃⁻ - N). En 2003 environ 17% des sites d'eaux souterraines ont une concentration de nitrate supérieur à la limite.

À titre préventif, les États membres ont établi des codes de bonnes pratiques agricoles et un programme pour promouvoir leur application.

Ces codes doivent contenir entre autre :

- Les périodes pendant lesquelles l'épandage des fertilisants est inapproprié
- Les conditions d'épandage des fertilisants sur les sols détrempés, inondés, gelés ou couverts de neige
- Les conditions d'épandage des fertilisants le long des cours d'eau
- La capacité et la construction des cuves destinées au stockage des effluents d'élevage

Pour les zones vulnérables alimentées par des eaux polluées, la directive enjoint les États membres d'établir des programmes d'action comportant notamment les règles suivantes :

- Les périodes durant lesquelles l'épandage de certains types de fertilisants est interdit
- La capacité des cuves destinées au stockage des effluents d'élevage
- La limitation de l'épandage des fertilisants conformément aux bonnes pratiques agricoles décrites ci-dessus et compte tenu des caractéristiques du sol des zones vulnérables

Pour ces régions sensibles, ces mesures doivent assurer une limite sur la quantité d'engrais de ferme épandue par hectare est donnée, à savoir la quantité d'engrais de ferme contenant 170 kg N après déduction des pertes en étables et dues aux stockages. Les Etats membres sont libres d'appliquer cette limite aux zones vulnérables ou à l'ensemble des régions.

4.2.2 Protection de l'air

Le 1^{er} décembre 1999, à Göteborg, est signé le Protocole de Göteborg relatif à la réduction de l'acidification, de l'eutrophisation et de l'ozone troposphérique. C'est un des premiers textes internationaux ciblant les émissions d'ammoniac. Alors signé par l'ensemble des Etats membres de l'Union Européenne (des 15), il fixe une réduction des émissions d'ammoniac en 2010 de 20% par rapport à celles de 1990. Pour y parvenir, des plafonds d'émission par pays ont été arrêtés. Les Etats signataires s'engagent à les respecter et à appliquer les mesures indiquées pour maîtriser les émissions d'ammoniac notamment de sources agricoles. Pour cela, ils doivent publier et diffuser un code indicatif de bonnes pratiques agricoles comprenant des dispositions concernant entre autre :

- Les techniques d'épandage du lisier et du fumier peu polluantes
- Les techniques de stockage du lisier et du fumier peu polluantes
- Les possibilités de limiter les émissions d'ammoniac provenant de l'utilisation d'engrais minéraux

En droit européen, ce protocole a été traduit par la directive 2001/81/CE le 23 octobre 2001. Cette directive fixe les plafonds d'émission nationaux pour certains polluants atmosphériques dont l'ammoniac. Les plafonds d'émission sont identiques à ceux du Protocole de Göteborg. La directive ne définit pas de mesures à prendre mais parle de programmes nationaux de réduction progressive des émissions nationales que les Etats membres doivent élaborer. Ils doivent rendre compte annuellement de l'inventaire des émissions et de leur projection.

4.2.3 Développement

Le contexte européen est comparable à celui de la Suisse. Il n'y pas de nouvelles mesures mais celles-ci sont bien en place. Des objectifs de réduction sont fixés afin de réduire les émissions toujours en excès (surtout concernant les nitrates) dans des zones à forte concentration d'élevage.

5. Définition d'une installation de méthanisation de type agricole de taille petite/moyenne

Pour déterminer une installation typique de biogaz suisse de taille petite/moyenne, les statistiques sur les installations de biogaz agricoles en Suisse ont été étudiées. Celles-ci ont été bien détaillées dans les [Schweizerische Statistik erneuerbarer Energieträger, Teilstatistik Biogas] jusqu'à 2004. Par la suite, elles sont présentées sous une forme synthétique. M Engeli, qui gère ces chiffres a été contacté.

La moyenne de la production d'électricité issue de couplages-chaleur-force (CCF) est, selon nos propres estimations, de 163 kW_{él} (voir la figure 10) ; basée sur la puissance électrique que l'unité de CCF peut produire. La moyenne depuis 10 ans est autour de 137 kW_{él} selon [Engeli] et cette puissance moyenne est en augmentation grâce à quelques grandes installations, dont une à 1'000 kW_{él}. Une installation de taille moyenne suisse se situe donc autour de 100 - 150 kW_{él}.

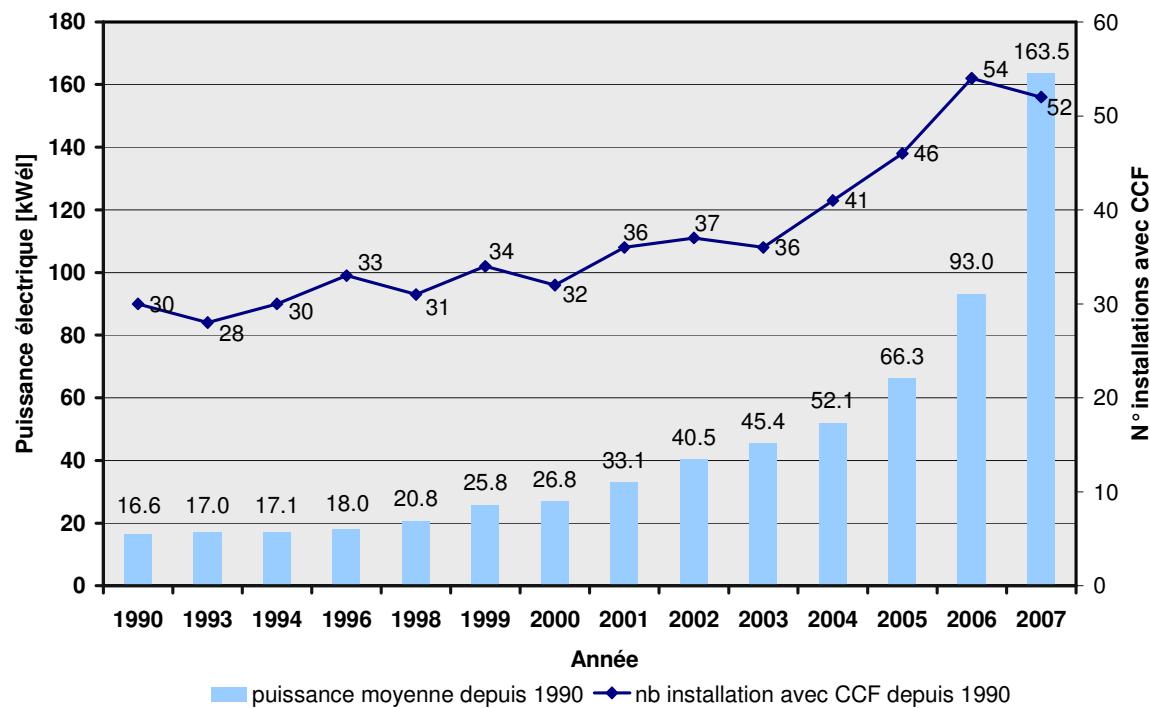


Figure 10: Évolution des installations de méthanisation agricole avec couplage-chaleur-force

Pour l'étude on a choisi une installation d'une puissance de 100 kW_{él}. Une telle installation est décrite dans [Sommerhalder] et ses caractéristiques sont présentées dans le tableau 3 suivant. Au total, cette installation traite 2'830 tonnes par an.

Tableau 3 : installation de biogaz agricole de taille moyenne suisse

Bétail UGB (bovin)	85
Mise en service	2004
Volume digesteur	470 m ³
Puissance CCF	100 kW _{él}
Engrais de ferme	2'320 t/an
Cosubstrats	510 t/an

Les types de cosubstrats utilisés dans des installations de biogaz agricole sont nombreux. On peut nommer les graisses flottantes, les lavures, le petit lait, les déchets (verts) communaux, et des résidus de l'industrie agroalimentaire (légumes, les marcs de café, etc.).

Le subventionnement d'une installation de biogaz se fait par un système qui fixe une redevance attractive pour la vente de l'électricité produite. Le système actuel en vigueur en Suisse, à part une

redevance fixée par le marché, est celui qui s'appelle la RPC, la rétribution à prix coûtant de l'électricité produite. Il comprend un bonus agricole, quand la quantité en cosubstrats ne dépasse pas 20% du total. La plupart des installations de type agricole profitent du bonus agricole, comme l'installation choisie.

Le tableau 4 suivant montre notre interprétation du gisement pour définir un mélange typique d'entrants afin d'obtenir une puissance de la cogénération de 100 kW_é.

Tableau 4 : gisement des effluents d'élevage et des cosubstrats

Produits	MF [tonnes / an]
Engrais de ferme	
Lisier bovin	2'320
Cosubstrats	
Lavures	200
Huiles	90
Déchets boulangerie	90
Marc de café	30
Déchets céréales	100
TOTAL	2'830

À partir des données sur la production de biogaz et des concentrations en composants fertilisants N, P et K par produit entrant, un bilan matière a été élaboré et présenté à la figure 11.

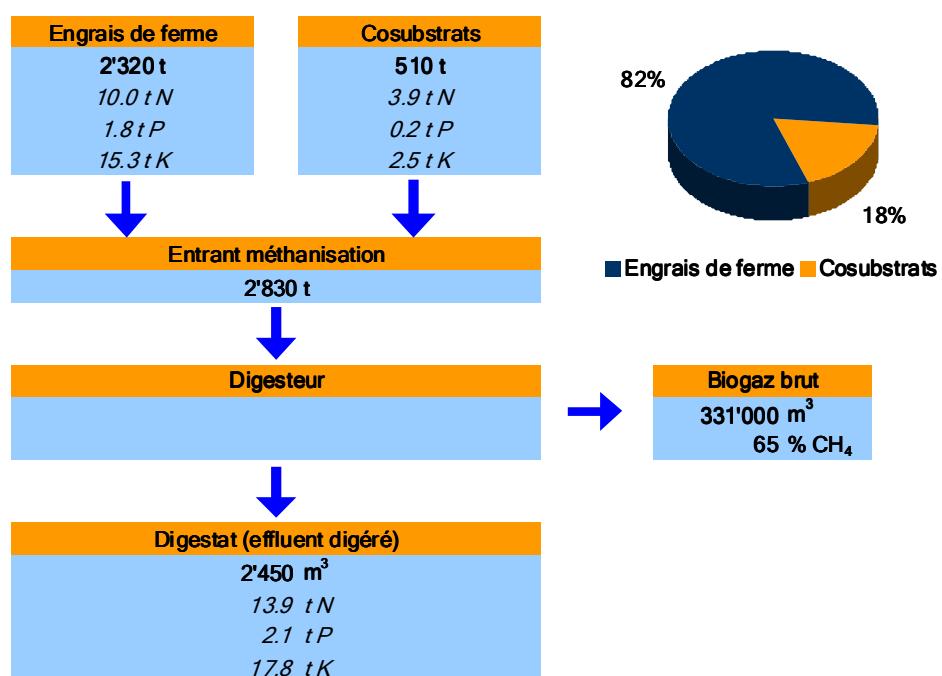


Figure 11: Bilan matière de la digestion

Au total 2'450 m³ de digestat sort annuellement de l'installation. Sur la base des entrants et sortants, les quantités en azote, phosphore et potassium dans le digestat ont été calculées ; elles sont présentées au tableau 5 en comparaison avec la composition typique du lisier de porc et de bovin, selon [Revue Suisse d'Agriculture].

Tableau 5 : qualité du digestat sortant de la méthanisation et du lisier

	Digestat	lisier bovin	lisier de porc	
MS	4.7	9.0	5.0	%
N tot	5.7	4.3	6.0	kg/m ³
N sol*	3.4 **	2.3	4.2	kg/m ³
P	0.8	0.8	1.7	kg/m ³
K	7.3	6.6	3.7	kg/m ³

* Azote soluble, dont principalement l'ammonium

** Selon nos propres données, le pourcentage d'ammonium de Ntot est environ 60%

Il faut noter que pour notre installation de référence, 72% de l'azote, 91% du phosphore et 86% du potassium présent dans le digestat proviennent du lisier bovin.

6. Méthode

6.1 Méthode de la recherche

Beaucoup de techniques utilisées pour le traitement du digestat viennent du traitement du lisier porcin, un produit comparable avec le digestat, afin d'éliminer son contenu en azote dans des régions qui connaissent déjà un excès.

Une recherche bibliographique nous a permis de trouver des articles présentant les traitements disponibles pour le lisier et le digestat. Ceux-ci proviennent de la Suisse et de pays voisins, notamment la France, la Belgique, les Pays-Bas, l'Allemagne et l'Autriche.

Ces articles sont :

France

- Coillard Jean, Différents modes de traitement de l'azote dans les effluents concentrés, cas des effluents d'élevage. Application au lisier de porc, actes du colloque Cemagref, 1996.
- Teffene, Les stations de traitement des effluents porcins, estimation des coûts et conséquences économiques, techniporc vol. 25 n°4, 2002
- Jean-Luc Farinet, Macsizut: un modèle d'aide au choix de techniques de traitement des lisiers de porc, actes du séminaire, juin 2002, Montpellier, France

Allemagne

- Döhler, Umweltverträgliche Gülleaufbereitung und – verwertung, Ktbl, Arbeitspapier 272, 1999
- Lootsma, Aktuelle Verfahren zur Aufbereitung und Verwertung von Gärresten, 2008
- Ktbl, Faustzahlen biogas, 2007
- Ktbl, Umweltverträgliche Gülleaufbereitung und- verwertung, Zusammenfassung der Ergebnisse und vergleichende Bewertung, 1999

Autriche

- LEA Oststeiermark, Möglichkeiten der Gärrestbehandlung von Biogasanlagen « Technologie-Screening », juin 2007

Pays-Bas

- WUR Wageningen, Quick scan van be- en verwerkingsmethoden voor dierlijke mest, 2004

Belgique

- Lemmens, Beste Beschikbare Technieken (BBT) voor mestwerking, 3ième édition, décembre 2006

Suisse

- Meier, Abklärung zu den Eigenschaften von Düngerprodukten aus der Gülleaufbereitung, 2008, OFAG

D'autres sources bibliographiques et catalogues de fournisseurs ont été trouvés grâce aux mots-clés dans différents outils de recherche et différentes langues.

6.2 Types de traitement

Les types de traitement sont basés sur 3 axes principaux :

- L'extraction /séparation et concentration des composants
- La transformation des fertilisants
- L'élimination des composants

Séparation/concentration

Cet axe comprend tous les procédés pour la séparation des phases liquide et solide et la concentration séparée de celles-ci. Le bilan matière ne montre pas de différence entre la quantité de

composants fertilisants sortants (le total des phases) par rapport à la quantité d'entrants. Ces techniques permettent une conservation des fertilisants (entrants = sortants).

Transformation

La transformation peut être définie comme le changement de la forme chimique du composant fertilisant, mais le bilan matière total ne montre pas vraiment une différence entre la quantité élémentaire de composants fertilisants sortants par rapport à la quantité entrante (entrants = sortants).

Élimination

L'élimination de l'azote aboutit à une diminution de la quantité de composants fertilisants sortants par rapport aux entrants (entrants > sortants).

La plupart des procédés sont adaptés pour le traitement de l'azote, puis du phosphore.

6.3 Valorisation des produits sortants

Les produits sortants du traitement du digestat peuvent, selon leurs caractéristiques, être commercialisés autre que comme des engrains de recyclage, comme défini dans l'Ordonnance sur la mise en circulation des engrais (OEng):

- **Les engrais minéraux:** produits dont les éléments nutritifs sont obtenus par extraction ou par des procédés industriels physiques et/ou chimiques, ou sont contenus sous forme de sels minéraux, ainsi que les substances cyanamide calcique, cyanamide, urée et ses produits de condensation et d'association, tels que:
 1. les engrais minéraux simples, qui:
 - ne contiennent qu'un macro-élément, à raison d'au moins 3 %, ou
 - ne contiennent qu'un macro-élément, à raison d'au moins 3 %, combiné avec du potassium, du magnésium ou du soufre comme ion d'accompagnement,
 2. les engrais minéraux composés (engrais NPK, NP, NK, PK), qui:
 - contiennent au moins deux ou trois éléments fertilisants majeurs, à raison d'au moins 3 %, ou
 - contiennent un élément fertilisant majeur et du calcium, du magnésium, du soufre ou du sodium ne servant pas uniquement d'ion d'accompagnement (au total au moins 3 % de ces éléments);
- **les engrais organiques:** produits composés essentiellement de matières carbonées d'origine végétale, animale ou microbienne contenant au moins 10 % de matière organique ainsi que les substances suivantes:
 - au moins 3 % de macro-éléments au total, ou
 - au total au moins 0,005 % de deux ou plusieurs oligo-éléments ou au moins 0,01 % d'un de ces oligo-éléments;
- **les engrais organo-minéraux:** mélanges d'engrais organiques et d'engrais minéraux et/ou d'amendements minéraux contenant au moins 10 % de matière organique ainsi que les substances suivantes:
 - au moins 3 % de macro-éléments au total, ou
 - au total au moins 0,005 % de deux ou plusieurs oligo-éléments ou au moins 0,01 % d'un de ces oligo-éléments;

La qualité du produit sortant du traitement détermine donc sa valeur commerciale pour la vente du produit.

6.4 Méthodes de traitement d'azote

Plusieurs méthodes existent pour le traitement du digestat. La figure 12 suivante montre une vue des techniques utilisées aujourd'hui soit dans le traitement du digestat, soit dans le traitement des lisiers. Ces techniques s'appliquent soit à la phase liquide, soit à la phase solide du digestat. Elles sont basées sur un traitement biologique, chimique, physique ou une combinaison de ces procédés. Une séparation mécanique de phases est dans la plupart de ces cas la première démarche.

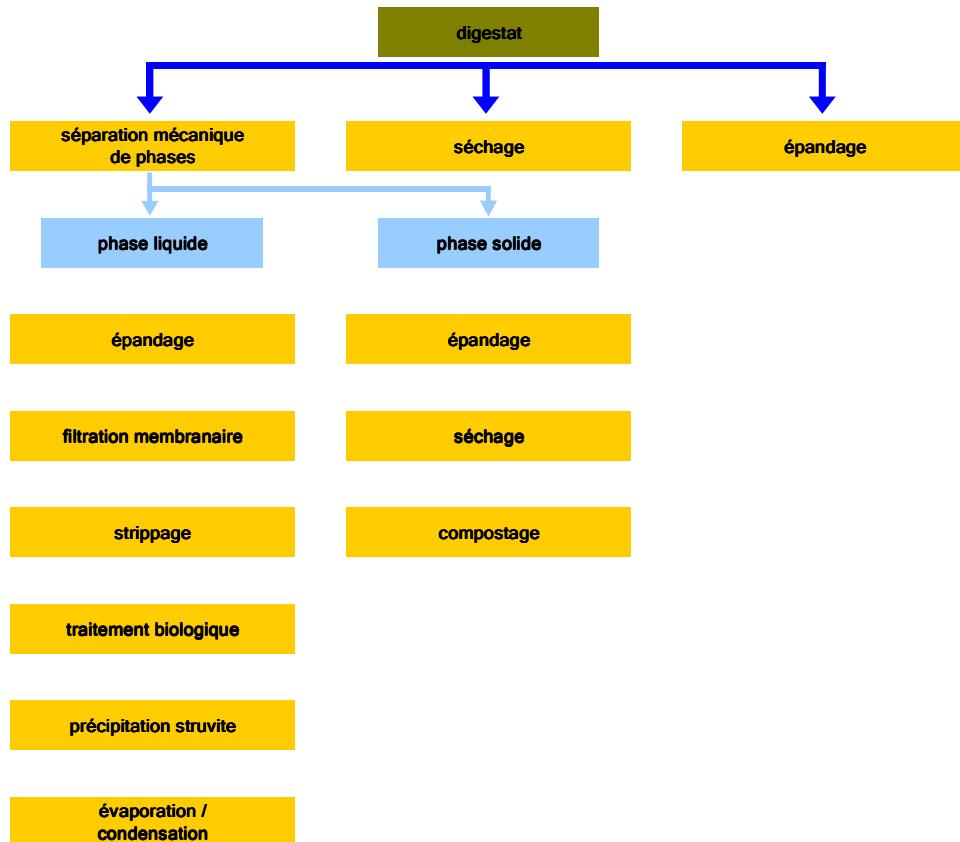


Figure 12: vue des techniques de traitement du digestat [adapté de Lemmens]

6.5 Structure de la description des procédés

Type de procédé

Les types de traitement (voir le paragraphe 6.2 précédent) sont présentés, ainsi que l'origine du procédé et le but de la technique.

Description du procédé

La base du procédé est expliquée avec un schéma de fonctionnement. Le début du procédé est le moment où le digestat sort du digesteur. La figure 13 montre un exemple du schéma. Les cases en orange représentent les différentes étapes, celles en bleu les produits intermédiaires, en vert les produits finaux sortant du procédé et en rouge clair les consommables.

Les noms commerciaux du procédé ainsi que ses fournisseurs sont présentés.

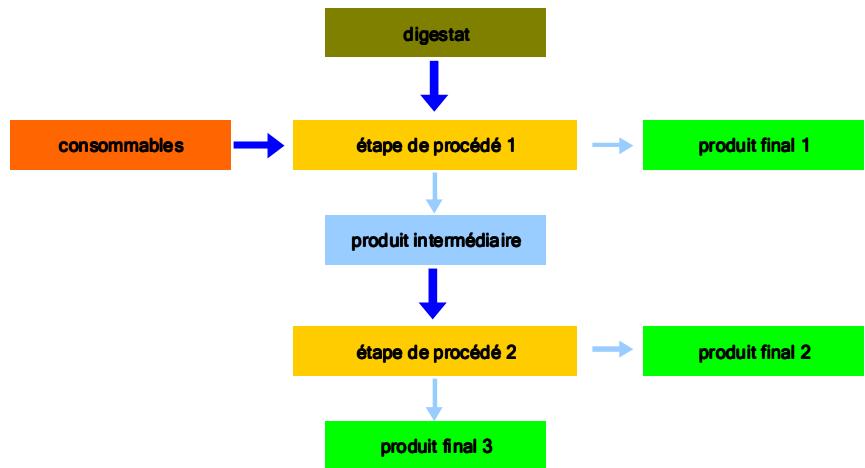


Figure 13: exemple schéma procédé

Conditions spécifiques

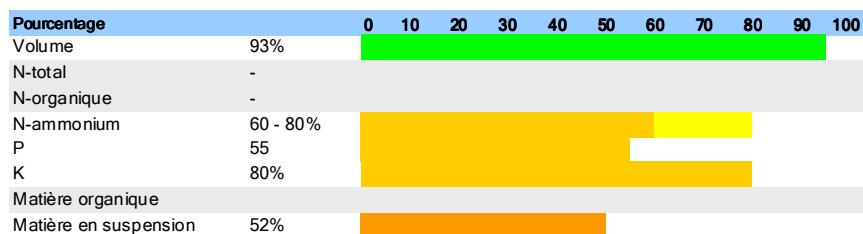
Pour bien comparer les différentes techniques, quelques conditions spécifiques telles que l'emprise de l'installation, la consommation en produits chimiques, les sources d'énergie utilisées ainsi que leurs consommations.

Indication sur les coûts

Indication sur les coûts du procédé, exprimés en CHF par m³ ou tonne de digestat. Ces coûts comprennent les frais financier relatifs à l'amortissement et les frais d'exploitation (coûts d'énergie, consommables, autres).

Produits sortants

Suite au schéma du procédé les produits finaux sortants sont présentés, ainsi qu'un bilan de masse par produit en pourcentage de masse du digestat entrant du traitement.



Les cases en vert montrent la répartition du volume, en orange clair la répartition de masse, en jaune la marge de variation des données et en orange foncé notre estimation. Les caractéristiques du produit sortant définissent sa plage d'utilisation : soit ses caractéristiques sont semblables au digestat non-traité et donc la seule application sera l'épandage, soit le produit pourrait être utilisé comme par exemple en substitution d'un engrais minéral.

Environnement

Les émissions atmosphériques (NH₃, CH₄, N₂O), à l'eau et au sol des produits sortants sont comparées à la technique de base qui est l'épandage par la rampe à pendillards.

Avantages / Contraintes

Une brève comparaison des avantages / contraintes de la méthode sont présentés ici.

Références / Perspectives

Le retour d'expérience, quelques références ainsi que les perspectives de la technique sont élaborés.

7. Revue des techniques

7.1 Buts du traitement du digestat

Les buts d'un traitement du digestat sont nombreux, parmi ceux-ci [Lootsma, LEA, Meier] :

- Réduction du volume à épandre
- Réduction des coûts de stockage et de l'épandage
- Préparer le digestat à être «exporté » des zones d'excès, par exemple dans le cas de manque de surface. Dans ce cadre-là, le but du traitement est plutôt la réduction du contenu en eau (sans fertilisants) pour réduire les transports et donc les coûts liés à celui-ci.
- Éliminer la quantité de fertilisants (NPK) afin que le solde puisse être épandu à proximité de l'installation.
- Améliorer la qualité du produit afin d'élargir les destinations des produits sortants comme engrains commerciaux.

7.2 Séparation mécanique de phases

Pour la séparation mécanique de phases les techniques suivantes sont adaptées : presse à vis, centrifugeuse, filtre tambour, ou presse à bandes [Lootsma], mais également autres variantes comme le tamis vibrant, le filtre à bandes etc. Les types décrits ici sont la presse à vis et la centrifugeuse. Non seulement ces techniques sont les plus répandus mais elles sont également beaucoup utilisées comme étape de prétraitement afin d'éliminer la fraction solide et fibreuse.

7.2.1 Presse à vis

Type de procédé

La presse à vis est un procédé de type séparation / concentration, qui a ses origines dans le traitement du lisier et des eaux usées.

Le but du procédé est la séparation des phases entre une fraction liquide, avec un contenu en matière sèche d'environ 5% et une fraction solide à un taux de matières sèches d'environ 25 – 30%, ceci pour :

- un prétraitement précédent d'autres techniques traitant le digestat
- réduire la fraction solide dans le digestat afin de l'épandre au moyen d'une rampe à pendillards.
En général la limite en matière sèche est de 8%.

Description du procédé

La figure 14 montre le schéma du procédé et une photo d'une presse. Le digestat est introduit dans un tamis cylindrique (avec pores de 0.15 – 1 mm [Lemmens]) sous pression atmosphérique. La fraction liquide traverse le tamis et est évacuée. La fraction solide reste dans le tamis et est transportée à l'aide d'une vis à l'extrémité du tamis. La sortie de la fraction solide est mise en contre-pression afin de déshydrater encore plus cette fraction. Quand la pression de la vis est plus grande que la contre-pression, cette sortie s'ouvre grâce à la surpression et la fraction solide peut sortir du tamis.

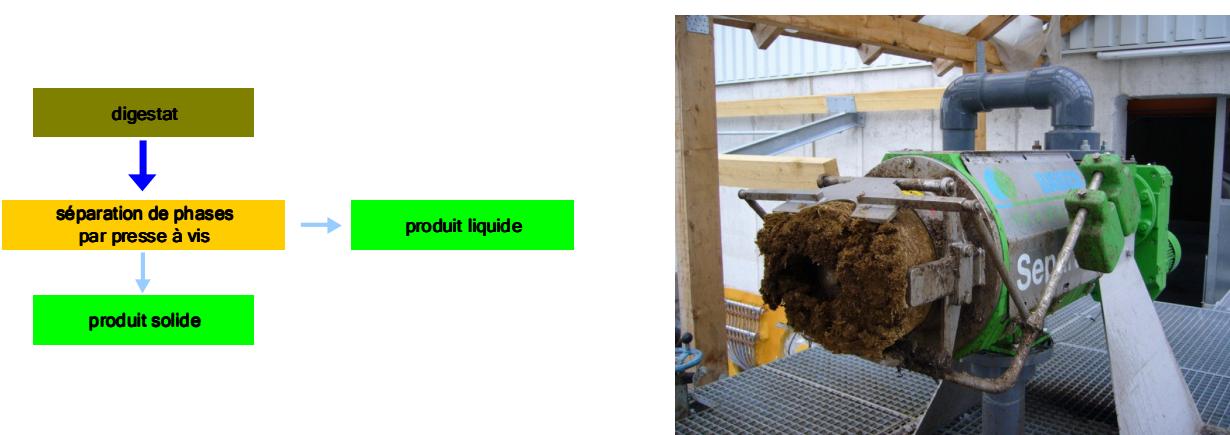


Figure 14: (schéma de) la presse à vis [Bauer]

Il existe de nombreux fournisseurs, parmi lesquels FAN, Bauer, Smicon et autres. La plage de capacité est de 0 – 30 m³/h par presse [Bauer].

Conditions spécifiques

- Emprise : 3 x 1 m pour la presse elle-même.
- Consommation produits chimiques : non
- Sources d'énergie utilisées : électricité
- Consommation énergétique : 0.4 - 0.5 kWh / tonne digestat [WUR, Lootsma/KTBL]

Indication sur les coûts

Selon [KTBL] les coûts pour une presse à vis seule, d'une capacité de 6 m³/h, sont estimés à CHF 35'000.-. En traitant 7'600 m³/an, ses frais sont estimés à CHF 1.30 / m³, dont CHF 0.53 de frais d'exploitation. En traitant 1'500 m³ /an les frais se montent à CHF 4.65 / m³. Les coûts pour traiter 2'500 m³/an sont estimés à CHF 4.10 / m³.

Produits sortants

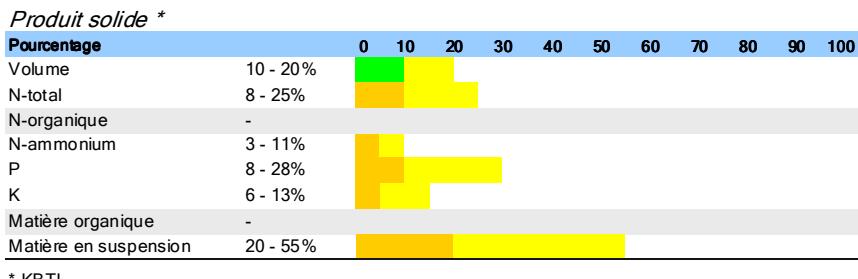
Il y a deux produits sortants du procédé :

- un produit liquide (concentration en MS environ 5%), qui sans traitement ultérieur est destiné à l'épandage par rampe à pendillards
- un produit solide (concentration en MS environ 25-30%), qui sans traitement ultérieur est destiné à l'épandage par épandeur de fumier.

Produit liquide *

Pourcentage	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Volume	80 - 90%										
N-total	75 - 92%										
N-organique	-										
N-ammonium	89 - 97%										
P	72 - 92%										
K	87 - 94%										
Matière organique	-										
Matière en suspension	45 - 80%										

* KBL



* KBTL

Environnement

Les émissions sont comparables à celles de l'épandage direct du digestat, vu que les volumes sont les mêmes et que les quantités d'azote sont égales.

Avantages / Contraintes

Avantages

- La technique est simple, robuste et peu coûteuse.
- La partie solide peut être transportée à moindre coût
- Étape de prétraitement afin d'éliminer toute matière fibreuse
- Amélioration de l'infiltration de la partie liquide

Contraintes

- Pas d'élimination d'azote possible.
- Le taux de matière sèche du produit solide est au maximum de 25-30%

Références / perspectives

Il y a beaucoup d'expérience avec cette technique simple et de nombreuses installations sont en opération.

7.2.2 Centrifugation

Type de procédé

La centrifugation est un procédé de type séparation / concentration, qui a également ses origines dans le traitement du lisier ou des eaux usées.

Le but du procédé est la séparation des phases entre une fraction liquide, avec un contenu en matière sèche d'environ 1 - 3% et une fraction solide à un taux de matières sèches d'environ 15 – 30%, ceci comme pré-étape pour autres techniques traitant le digestat.

Description du procédé

La centrifugation est un procédé de séparation qui utilise l'action d'une force centrifuge pour provoquer la décantation accélérée des particules d'un mélange solide-liquide. Le schéma du procédé est présenté à la figure 15 suivante.

Le type le plus utilisé est la décanteuse continue à bol cylindro-conique d'axe horizontal, dont le principe est montré dans la figure 16.

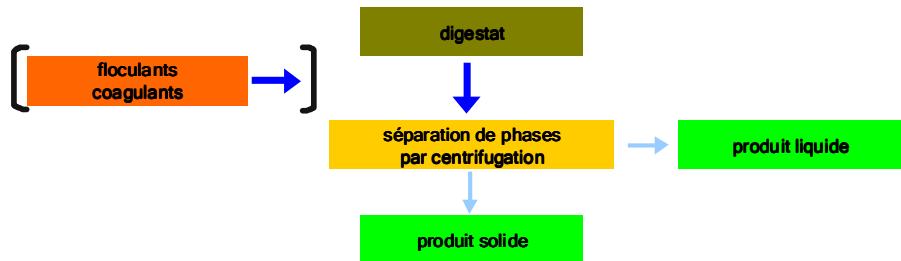


Figure 15: schéma du procédé de la centrifugation

L'introduction de la solution (1) se fait à l'intérieur de la centrifugeuse. La solution se met entre le bol tournant (2) et la vis. Sous l'action de la force centrifuge, les particules lourdes décarent et se déposent contre la paroi intérieure du bol. Elles sont raclées par la vis convoyeuse (3) et acheminées en continu vers la partie conique. La vis tourne légèrement plus vite que le bol (vitesse différentielle). Les sédiments compactés sont récupérés dans le carter à sédiment (4) et évacués du système (5). L'alimentation continue pousse le liquide qui s'évacue vers la sortie d'effluent (5).

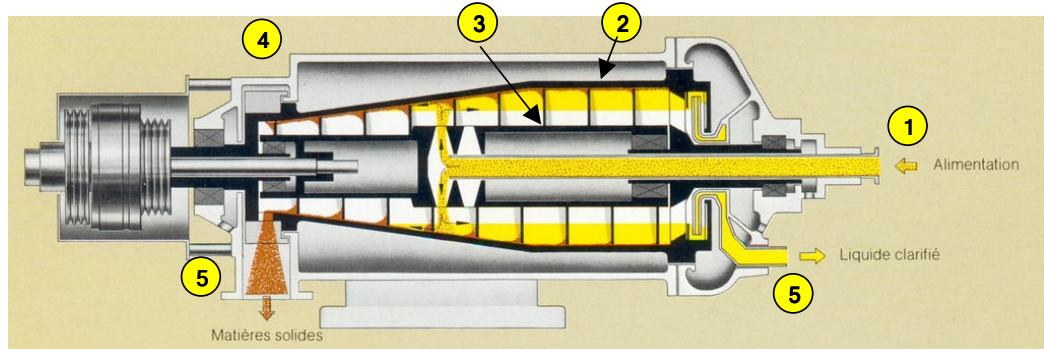


Figure 16: schéma de principe d'une décanteuse continue à bol cylindro-conique d'axe horizontal

Cette technique est plus coûteuse qu'une presse à vis et engendre une haute consommation d'énergie (électricité). En revanche, elle permet une meilleure séparation entre la phase solide et liquide, un atout nécessaire pour d'autres traitements supplémentaires des composants fertilisant. En général, cette technique est donc plutôt utilisée comme pré-traitement.

Elle est proposée par plusieurs fournisseurs, tels que Westfalia, Pieralisi, Alfa Laval, Andritz, entre autres. Pour le traitement des lisiers il existe des tailles de machine entre 2, 6 –16 et plus de 20 m³/h [Lemmens]. L'utilisation des coagulants / floculants améliore le résultat de la séparation. Également, en utilisant ces produits, on capte plus de phosphate dans le produit solide.

Conditions spécifiques

- Emprise : 3 x 1 m pour la centrifugeuse seulement
- Consommation produits chimiques : le résultat de la séparation peut être amélioré par l'addition des coagulants/floculants.
- Sources d'énergie utilisées : électricité
- Consommation énergétique : 7 kWh / tonne entrante [WUR/Lootsma]

Indication sur les coûts

Les coûts d'investissement sont estimés à CHF 185'000,- pour un décanteur centrifuge de 4 m³/h (pompe d'alimentation, centrifugeuse, automation). Les frais se montent à 14.30 CHF / m³ pour traiter 2'500 m³ par an.

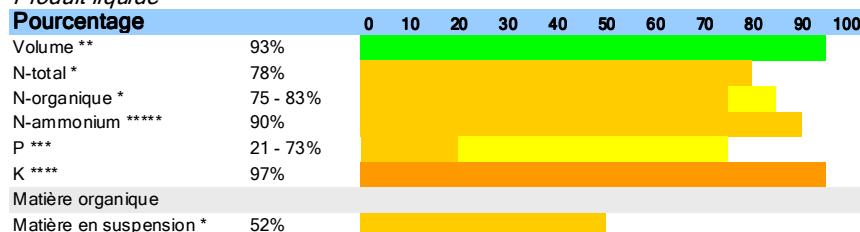
Produits sortants

Deux produits sortent du procédé, notamment:

- 1 produit liquide (MS environ 1-3%)
- 1 produit solide (MS environ 15-35%)

Les produits ne peuvent être exportés sans autre que pour l'épandage [Lemmens]

Produit liquide



* KBTL

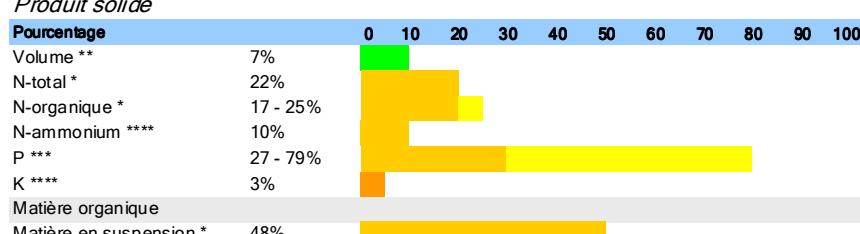
** présentation IBBK

*** La répartition du P dépend de l'utilisation ou pas de floculants / coagulants. L'utilisation permet de réduire le contenu du P dans le produit liquide

**** Estimé en comparaison avec la presse à vis

***** Selon IBBK 80%, mais augmenté à 90% en comparaison avec presse à vis et répartition ammoniac par rapport à la phase liquide

Produit solide



* KBTL

** présentation IBBK

*** La répartition du phosphore dépend de l'utilisation ou pas de floculants / coagulants. L'utilisation permet de réduire le contenu de P dans le produit liquide

**** 100% - pourcentage dans produit liquide

Environnement

Les émissions sont comparables à celles de l'épandage direct du digestat. La séparation se produit dans une installation fermée ou dans un bâtiment, donc peu d'émission. Pas de pertes de produits fertilisants ; plutôt émissions possibles pendant le stockage, surtout d'ammoniac [Lemmens].

Avantages / contraintes

Avantages

- Partie solide peut être transportée à moindre coût
- Phase de prétraitement afin d'éliminer toute matière fibreuse et une grande partie de la matière en suspension
- Amélioration d'infiltration de la partie liquide

Contraintes

- Pas d'élimination d'azote possible
- Taux de matière sèche produit solide limité à 25-35%
- Risque de formation de mousse par incorporation d'air
- Les meilleurs résultats de séparation sont obtenus en traitant du digestat frais.

Références / Perspectives

Il y a beaucoup d'expérience avec cette technique et de nombreuses d'installations sont en opération.

7.3 Filtration membranaire par ultrafiltration/osmose inverse

Type de procédé

La filtration membranaire est un procédé de type séparation / concentration, qui a ses origines entre autre dans le traitement du lisier ou des eaux usées. Le but de la filtration membranaire est, après la séparation entre une phase solide et liquide, une concentration supplémentaire de la phase liquide entre une phase liquide contenant toute matière en suspension et des composants fertilisants concentrés et une phase liquide contenant seulement de l'eau.

Seule l'osmose inverse permet d'effectuer une séparation entre l'eau et les ions dissous, comme l'ammonium et d'autres composants fertilisants dissous.

Description du procédé

La filtration membranaire est un type de filtration effectué sous l'effet d'un gradient de pression. Quatre catégories de membranes peuvent être définies, liées à la taille des pores notamment : microfiltration (taille des pores 0,1 - 2 µm), ultrafiltration (0,01 – 0,1 µm), nanofiltration (0,001 – 0,01 µm) et osmose inverse (<0,001 µm).

Micro- et ultrafiltration utilisent des membranes poreuses. La séparation a lieu en fonction de la grandeur de pore de la membrane. Nanofiltration et osmose inverse utilisent des membranes denses, qui n'ont pas de structure poreuse : la séparation est faite grâce à une différente solubilité des différents composés dans le matériel de la couche séparatrice. La figure 17 suivante montre les différents types de filtration membranaire.

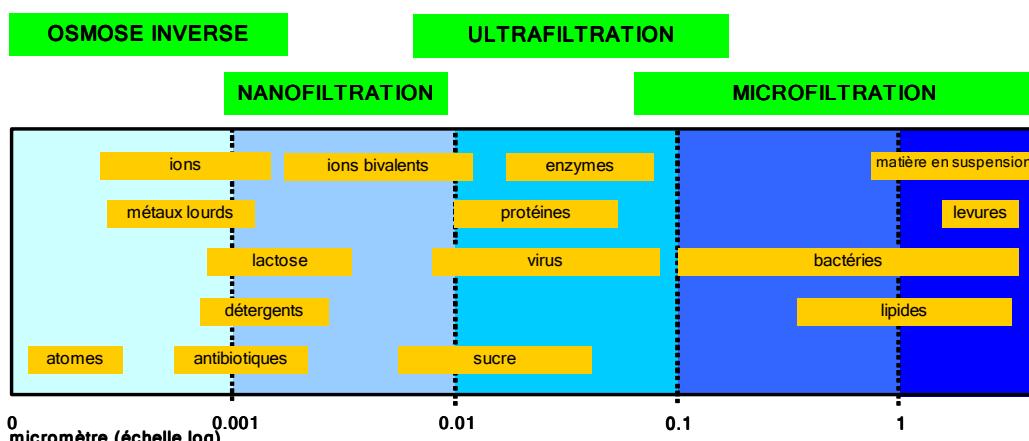


Figure 17: types de filtration membranaire et la limite de séparation des différents composants

L'ultrafiltration (UF) provoque l'élimination complète des bactéries et partiellement des virus et donc l'effluent après l'ultrafiltration est stérile, elle ne contient plus ni des micro-organismes ni virus. Les composants dissous ne sont pas retenus [Meier].

La figure 18 suivante présente une méthode de traitement par filtration membranaire. L'utilisation de la nanofiltration et de l'osmose inverse nécessite une pré-élimination presque totale de toute matière en suspension. La matière fibreuse est presque totalement éliminée dans une centrifugeuse. Une deuxième filtration par un filtre police, comme un tamis vibrant permet de retenir les dernières fibres. Les fibres peuvent causer des blocages et doivent donc être éliminés.

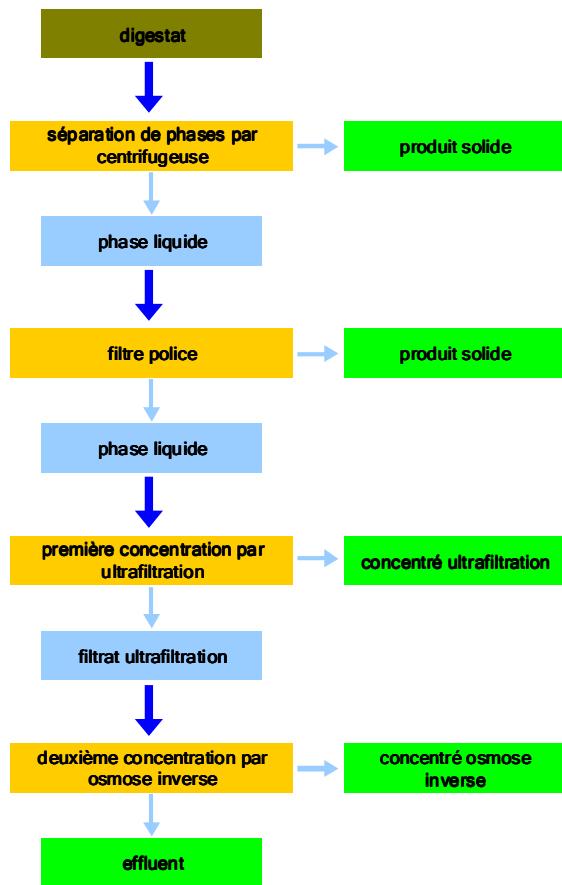


Figure 18: schéma d'un procédé de traitement membranaire

Ce filtre police (voir figure 19) est un dispositif de tamisage qui vibre sur son centre de gravité. Les vibrations sont obtenues au moyen de masses excentriques placées aux extrémités supérieure et inférieure de l'arbre moteur. La rotation de la masse supérieure crée les vibrations sur le plan horizontal ce qui déplace les matériaux près de la périphérie du tamis. La masse inférieure fait osciller la machine, ce qui produit des vibrations sur les plans vertical et tangentiel [site SWECO].



Figure 19: tamis vibrant [source SWECO]

Le reste de la matière en suspension est éliminé et concentré dans une unité d'ultrafiltration. Le liquide qui sort de l'ultrafiltration est translucide mais encore coloré.

Dans l'unité d'osmose inverse, le liquide est séparé en un concentré et un effluent. Les composants fertilisants dissous se trouvent dans ce concentré qui peut représenter, selon la méthode de traitement utilisée, environ un quart du volume initial.

Un dosage d'acide sulfurique (H_2SO_4) pourrait être nécessaire pour réduire le pH afin que l'ammonium reste dans le concentré. Les molécules d'ammoniac (NH_3) sont, par rapport aux molécules

d'ammonium (NH_4^+), mal retenues par l'osmose inverse [Lemmens], un dosage d'acide améliore le rendement sur N et DCO. Le nitrate est également retenu à 85 – 90 %.

Il existe plusieurs variantes du schéma présenté ci-avant, surtout par rapport au choix de l'unité de séparation de phase (centrifugeuse, presse à vis, tamis vibrant, etc.) et la première concentration pour la séparation de la matière en suspension (ultrafiltration type cross-flow, microfiltration immergée etc.). L'osmose inverse existe sous plusieurs variantes, selon le type de module utilisé, la mise en série/parallèle des modules, etc. Jusqu'à max 20 m^3/h ce procédé est techniquement / économiquement faisable [LEA Oststeiermark].

Les principaux fournisseurs sont : A3 Watersolutions GmbH, IMB+Frings (dont le procédé est présenté dans la figure 20), Haase, CUT membrane technology, GEA entre autres.

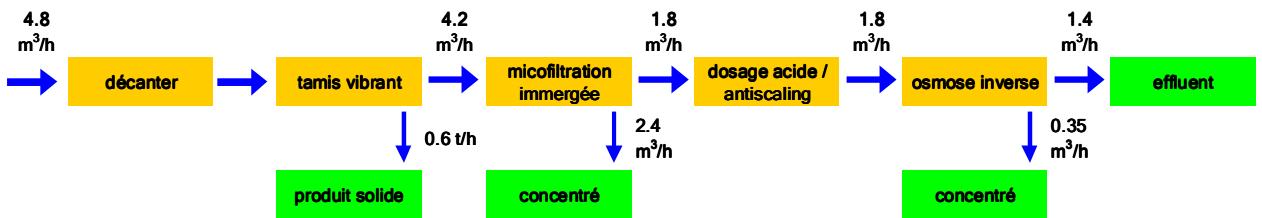


Figure 20: procédé de filtration membranaire selon IMB+Frings

Conditions spécifiques

- Emprise : pas de données
- Consommation produits chimiques : produits pour lavage chimique des membranes, produits antiscaling et antifouling, ainsi qu'un dosage de l'acide sulfurique
- Sources d'énergie utilisées : électricité
- Consommation énergétique : grandes variations, entre 12.8 kWh/t selon [Ktbl] et 28 kWh/ m^3 [Lemmens] ou 30 kWh/t lisier selon [WUR]. Un calcul à partir des données de A3 Watersolutions montre une consommation de 22 kWh / m^3 pour une installation traitant 60'000 m^3 par an. On admet une consommation moyenne de 27 kWh / m^3 .

Indication sur les coûts

[Meier] mentionne des coûts d'investissement d'environ CHF 500'000,- pour une pompe d'alimentation, l'ultrafiltration et l'osmose inverse, un partie du bâtiment, mais sans prétraitement, ni stockages des produits sortants. Les coûts d'exploitation sont estimés à CHF 21.40 / m^3 pour traiter 5'000 m^3 par an et CHF 37,30 pour traiter 2'500 m^3 par an. Si on ajoute encore les coûts d'une centrifugeuse, comme calculé dans le paragraphe ci-avant, les coûts totaux pour traiter 2'500 m^3 par an s'élèvent à CHF 51.60 par m^3 .

Produits sortants

Quatre produits, selon [A3 Watersolutions], sortent du traitement, à savoir :

- Produit solide après centrifugation avec dosage de coagulants: 17.5% du volume (MS de 28%)
Ce produit sans traitement ultérieur ne peut pas être exporté tout de suite pour autres buts que l'épandage. Il est riche en phosphore
- Concentré ultrafiltration : 12% du volume (MS de 16.7%)
Ce produit n'a pas une grande valeur comme fertilisant et peut être utilisé pour l'épandage.
- Concentré osmose inverse : 17.5% du volume
Ce liquide contient les concentrés de l'ammonium et du potassium, dont 70 % des quantités d'origine dans seulement 20% du volume. Ce concentré pourrait être mélangé avec celui de l'ultrafiltration et pourrait être exporté comme substitut d'un engrangement minéral. Il faut noter que ce concentré contient également des sels en haute concentration ainsi que des micropolluants éventuellement présents dans le digestat. Les hautes concentrations en sel peuvent avoir un effet inhibiteur sur certaines cultures.

Ce concentré, quand il n'est pas mélangé avec celui de l'ultrafiltration ne contient pas de bactéries/virus ; ceux-ci sont séparés dans l'ultrafiltration et donc il pourrait être utilisé pour fertiliser les cultures maraîchères résistantes à une haute concentration en sels [Meier].

- Effluent de l'osmose inverse : 53% du volume

L'effluent sortant de l'osmose inverse est presque pur et il pourrait être rejeté après une étape de finition par charbon actif, il pourrait être épandu ou réutilisé comme eau de process.

En Suisse, le rejet de cet effluent dans les cours d'eau récepteurs est interdit [Meier]. L'effluent doit être ré-utilisé à l'interne ou être utilisé pour l'irrigation.

*Produit solide séparé par centrifugation **

Pourcentage	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Volume	18%		20								
N-total	-										
N-organique	-										
N-ammonium	18%		20								
P	76%										
K	17%		20								
Matière organique	-										
Matière en suspension	70%										

*Concentré ultrafiltration **

Pourcentage	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Volume	12%		15								
N-total	-										
N-organique	-										
N-ammonium	13%		15								
P	20%										
K	12%		10								
Matière organique	-										
Matière en suspension	30%										

*Concentré osmose inverse **

Pourcentage	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Volume	18%		20								
N-total	-										
N-organique	-										
N-ammonium	70%										
P	4%										
K	70%										
Matière organique	-										
Matière en suspension	0%										

*Effluent de l'osmose inverse **

Pourcentage	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Volume	53%										
N-total	-										
N-organique	-										
N-ammonium	0%										
P	0%										
K	0%										
Matière organique	-										
Matière en suspension	0%										

* Données de A3 Watersolutions

Environnement

L'effluent final est d'une haute qualité (basse salinité et faible concentration en micropolluants organiques) ; il se prête à la réutilisation ou pourrait, dépendant des réglementations, être rejeté. Le procédé se réalise dans un système fermé et génère donc peu d'émissions. Après addition de l'acide (H_2SO_4), l'ammoniac est immobilisé.

Seuls le concentré de l'UF et le produit solide après centrifugation doivent être désapprovisionnés par épandage. Les quantités épandables sont nettement réduites et donc également les émissions.

Le concentré de l'osmose inverse peut être dosé plus efficacement, ce qui fait que la filtration membranaire permet de réduire les émissions dans l'air.

Avantages / Contraintes

Avantages

- Production d'un concentré de fertilisants.
- Le filtrat de l'osmose inverse pourrait être utilisé comme eau utilitaire (nettoyage d'étables par exemple), ou être utilisé pour l'irrigation.
- Réduction des quantités à stocker et à transporter d'au moins 50%
- Les produits après l'ultrafiltration sont stériles
- Séparation physique sûre

Contraintes

- Coûts d'investissement élevés
- Utilisation des produits chimiques requise pour le nettoyage des membranes
- Membranes sensibles au fouling
- Prétraitement nécessaire (MS max 3% [Döhler 2007])
- Pas de technique sans-surveillance
- Coûts d'entretien et d'électricité assez élevés
- Risque de concentration des polluants dans les concentrés

Références / Perspectives

La technique est arrivée à maturité. Plusieurs fournisseurs proposent cette méthode de traitement et il y a donc déjà plusieurs références, sur le traitement des lisiers mais également sur le traitement du digestat après méthanisation :

- A3 Watersolutions : plusieurs installations, dont celle pour « Swiss Farmer Power » à Inwil
- IMB – Frings : 1 installation à Lastrup (D) traitant 24'000 t/an

7.4 Strippage d'ammoniac

7.4.1 Introduction

Le strippage est l'évacuation des composants volatiles d'une solution à l'aide de gaz. Par la diminution de la pression partielle le composant volatile se transfère dans la phase gazeuse, diminuant ainsi sa concentration dans la solution. Le but est l'élimination de l'ammonium/ammoniac. La volatilisation de l'ammonium vers ammoniac est provoquée par l'augmentation de la température et du pH de la solution jusqu'à 10 (voir figure 3 § 3.1), déplaçant l'équilibre $\text{NH}_4^+ / \text{NH}_3$ à 100% vers l'ammoniac.

Le traitement se fait dans une colonne de strippage, remplie avec du garnissage ou des plateaux, comme l'indique la figure 21 suivante.

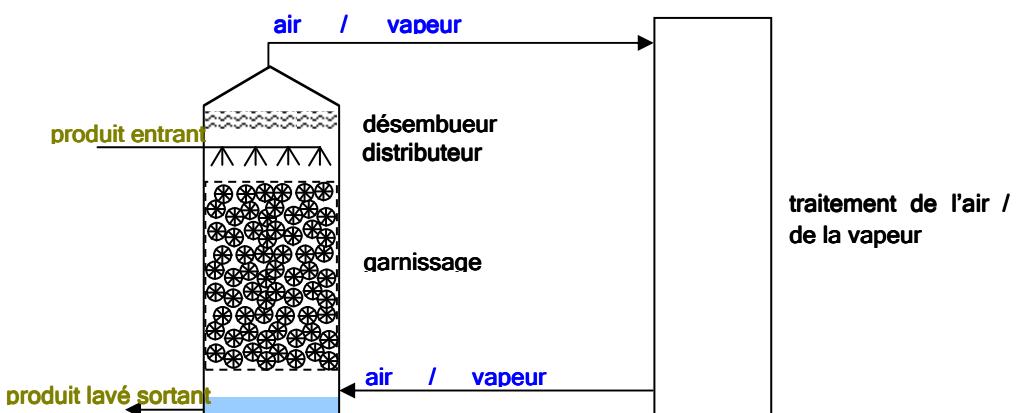


Figure 21: principe colonne de strippage

On distingue deux principaux types de strippage, le strippage à l'air ou à la vapeur à contre-courant avec le produit, voir figures 22 et 23.

Le strippage à l'air se fait à des températures entre 60 – 70 °C, tandis que le strippage à la vapeur se fait à des températures supérieures à 100 °C. Ce dernier, au vu des quantités d'énergie nécessaire, est plutôt pratiqué lorsque la vapeur est présente comme « déchet » d'une installation industrielle, ce qui pourrait être le cas dans une installation de biogaz avec cogénération. En revanche le flux d'air est plus bas que pour le strippage à l'air.

L'air ou la vapeur sortant de la tour de strippage est riche en ammoniac. Les produits sortants sont l'eau ammoniacale après condensation (en cas de strippage avec de la vapeur), bicarbonate d'ammonium (après cristallisation de la solution de sulfate d'ammonium obtenu avec un lavage acide avec de l'acide sulfurique en cas de strippage avec de l'air), une solution de nitrate d'ammonium (en cas de strippage avec de l'air et un lavage acide avec l'acide nitrique).

Autres variantes de traitement d'air contenant de l'ammoniac : l'élimination de cet ammoniac se fait par nitrification-dénitrification biologique en phase gazeuse, par combustion catalytique haute température, par lavage avec une solution de gypse et le lavage acide avec de l'acide sulfurique.

L'air et/ou de la vapeur sont recirculés afin de réduire l'introduction de CO₂, qui peut engendrer la formation de carbonates de calcium (scaling).

Pour prévenir des blocages dans le système de distribution l'élimination de la matière fibreuse est nécessaire.

Le strippage est une technique répandue pour le traitement du lisier. L'azote organique et les nitrites/nitrates ne sont pas éliminés. Si elle est bien dimensionnée, cette technique permettra de séparer au moins 90% de l'ammonium.

Les schémas 22 et 23 suivants montrent des systèmes répandus de strippage avec de l'air ou de la vapeur.

La consommation en énergie dépend entre autre de la température appliquée. Plus elle est haute, moins d'air doit être recirculé. La consommation en électricité est environ 2.3 kWh/m³ à 20°C et de 0.85 kWh/m³ à 50°C. Pour préchauffer le digestat on peut utiliser la chaleur excédentaire venant de la cogénération. En cas de strippage avec de la vapeur, la consommation en électricité est estimé à 0.45 kWh /m³ et la consommation thermique est de 100 kWh par m³ traité.

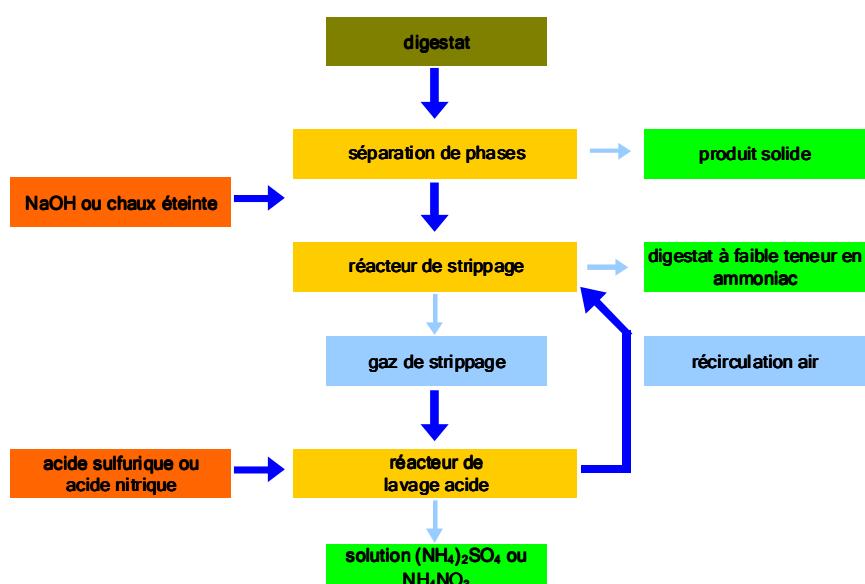


Figure 22: schéma strippage à air

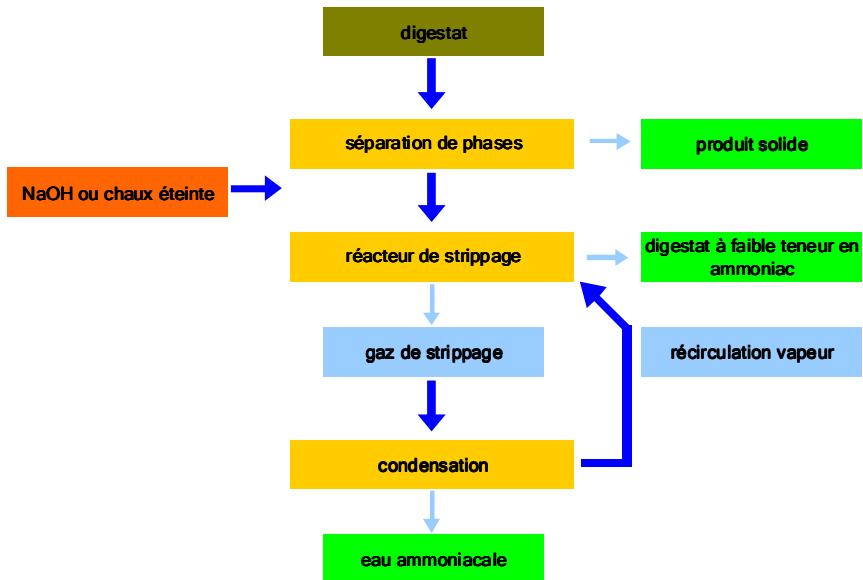


Figure 23: schéma strippage à vapeur

[Grömping] mentionne les consommations chimiques suivantes, voir tableau 6.

Tableau 6 : consommation et production strippage à vapeur et à air [Grömping]

Consommations	Unité	à vapeur	à air
Hydroxyde de Sodium (NaOH 50%)	kg / kg N	3.5 - 4.5	3.5 - 4.5
Acide sulfurique (78%)	kg / kg N		3.72 - 3.9
Production			
Eau ammoniacal (25%)	kg / kg N	3.9 - 4.1	-
Sulfate d'ammonium (38%)	kg / kg N	-	11 - 13

7.4.2 Strippage et combustion catalytique

Type de procédé

Cette méthode de strippage est un procédé de type élimination, qui a son origine dans le traitement des lisiers porcins. Le but est l'élimination d'ammoniac de la phase liquide en le transformant en azote gazeux (N_2) qui est émis dans l'air.

Description du procédé

Le procédé élaboré ici est celui commercialisé par Evalor (anciennement APV compost France) sous le nom de SMELOX. La figure 24 suivante montre le schéma du procédé. Après une séparation de phase par centrifugation, un catalyseur (aluminosilicate de sodium) est dosé pour prévenir l'évaporation des composants olfactifs contenant du soufre. Après, la solution traverse plusieurs réacteurs de strippage, le plus souvent deux. Dans le premier réacteur une élimination d'ammoniac d'environ 70% peut être réalisée, dans le deuxième réacteur la réduction totale augmente jusqu'à 90%. L'ammoniac, sous forme gazeuse est converti par un catalyseur en platine à 300 – 350 °C pour 90% au gaz de nitrogène (N_2), au gaz de N_2O et une très petite quantité de NO_x . Le digestat traité ne contient plus que 10 – 20% de la quantité originale en ammonium. La fraction de N-organique reste dans le digestat. Selon [Lemmens] ce procédé est appliqué en Flandre (B) pour traiter du lisier porcin.

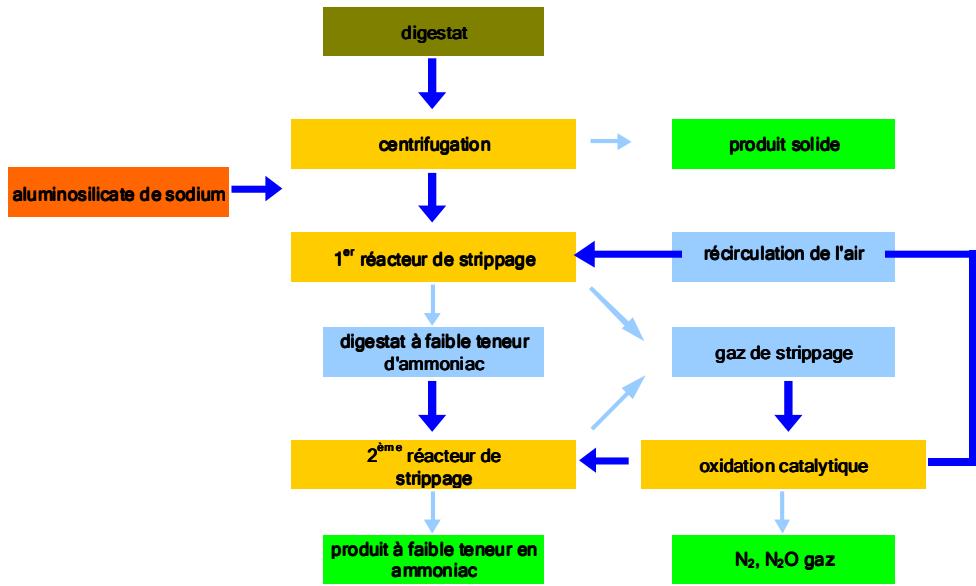


Figure 24: schéma stripage et combustion catalytique (procédé Smelox)

Evalor propose également une installation mobile qu'un agriculteur peut louer pour traiter son lisier. La figure 25 à la page suivante montre cette installation mobile.

Conditions spécifiques

- Emprise : 10 x 15 m pour installation mobile traitant de 3 t/h
- Consommation produits chimiques : aluminosilicate de sodium (0.1 l par m³ de lisier)
- Sources d'énergie utilisées : électricité pour le pompage et la récirkulation de l'air plus la chaleur pour chauffer le digestat à la température voulue.
- Consommation énergétique : 21 kWh d'électricité /m³ lisier pour une réduction en NH₄⁺ de 70%. Pour une réduction allant à 90% il en faut 29 kWh /m³ lisier



Figure 25: l'installation mobile de SMELOX

Indication sur les coûts

Les coûts d'investissement de l'installation mobile montée sur un remorque, sont de CHF 790'000,-. Si on estime pour une installation fixe un coût d'investissement de CHF 700'000,- les coûts de traitement s'élèvent à CHF 47.20 par m³, inclusif les coûts d'électricité. En revanche, Evalor facture aux agriculteurs un prix de CHF 18.60 par m³ pour la location, tout compris, parce que l'installation peut être utilisée pour plusieurs exploitations par année.

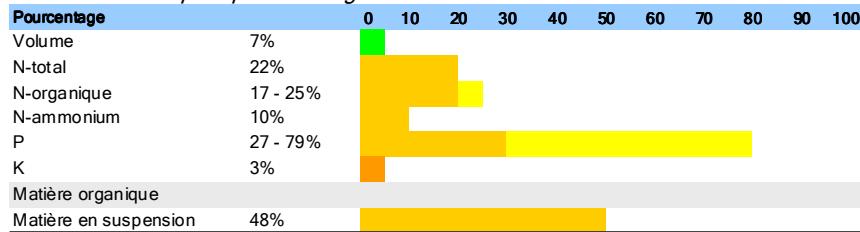
Produits sortants

Le procédé conduit à l'obtention de trois produits :

- Un produit solide sortant la centrifugeuse, contenant environ 75% du P. Le concentré peut subir un traitement de compostage afin d'élargir les possibilités d'utilisation du produit fini.
- Un produit après strippage à faible teneur d'ammonium, contenant environ 92.5% du K. Ce digestat traité pourrait être épandu. Les limites d'épandage seront déterminées par les quantités en K.
- Une phase gazeuse, dont 57% de N₂, 6% de N₂O et <0.1% de NO_x.

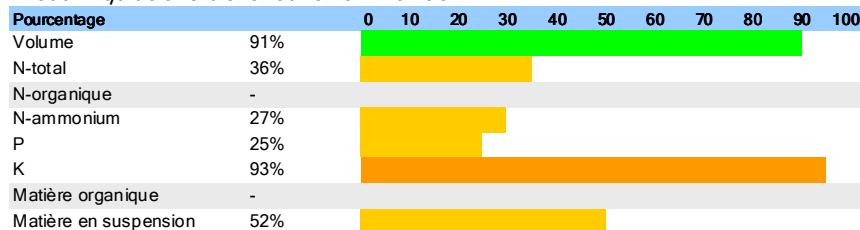
L'élimination de l'ammonium est réglée sur 70%, mais le rendement peut être augmenté ce qui engendre également une augmentation de l'énergie nécessaire.

*Produit solide séparé par centrifugation **



* Voir paragraphe présentation centrifugeuse

Produit liquide à faible teneur en ammoniac



Environnement

Le traitement se fait dans un bâtiment et dans une installation fermée. Les émissions de N₂O (6%) sont assez importantes [Lemmens].

Avantages / Contraintes

Avantages

- Réduction du contenu en ammonium
- La réduction en ammonium est « réglable »
- Possibilité d'avoir un système mobile

Contraintes

- Consommation énergétique assez élevée
- Risque de formation de mousse
- Émissions élevées de N₂O
- Pas de récupération de l'azote

Références / Perspectives

Selon [Lemmens] ce procédé est utilisé en Flandre (B) pour le traitement du lisier. Le strippage est un procédé assez répandu et facile pour le traitement des lisiers. Selon Evalor une dizaine d'unités sont commercialisées, 6 fixes et 9 mobiles. Il n'y a pas d'application sur le digestat, mais il en envisagé de faire des tests de performances pour 2009, selon Evalor.

7.4.3 Strippage et lavage acide

Type de procédé

Le strippage avec lavage acide est un procédé de type transformation, qui a son origine dans le traitement des lisiers porcins. Le but est de transférer l'ammoniac de la phase liquide dans une solution de sulfate d'ammonium.

Description du procédé

Le schéma du procédé abordé ici est montré à la figure 26. Le digestat subit un traitement préalable par centrifugation. Ensuite un dosage d'hydroxyde de sodium augmente le pH pour déplacer l'équilibre vers l'ammoniac. Le gaz de strippage est lavé par l'acide sulfurique.

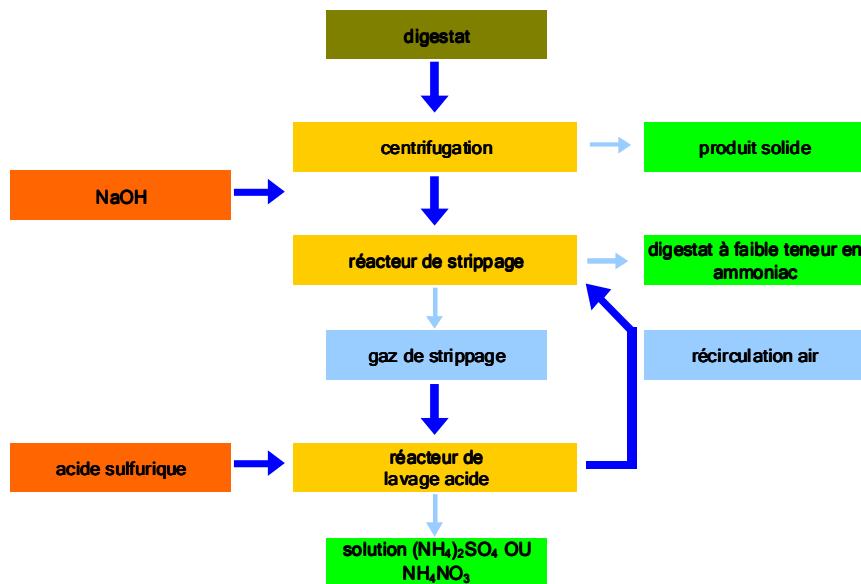


Figure 26: schéma strippage avec lavage acide

Conditions spécifiques

- Emprise : 360 m² pour une installation traitant 15'000 t/an
- Consommation produits chimiques : Chaux éteinte et H₂SO₄. Il faut 5 kg 70% d'acide sulfurique pour traiter 1 kg NH₄-N, selon [BUWAL]
- Sources d'énergie utilisées : électricité + chaleur
- Consommation énergétique : 20 kWh/tonne de lisier traité [WUR]. [Böhler] montre une consommation en électricité de 4 kWh/ kg N et en chaleur de 8 kWh/ kg N.

Indication sur les coûts

[Meier] montre des coûts d'investissement de CHF 180'000,- (sans stockage des produits finis, ni pré traitement) et des coûts d'exploitation de CHF 12.30 / m³ pour traiter 5'000 m³ par an, traitant une solution de 2.5 g/l de NH₄-N et un rendement d'élimination de 90%. Pour traiter 2'500 m³ par an les coûts sont estimés à CHF 18.44. Si on ajoute encore les coûts de la centrifugation, les coûts totaux s'élèvent à CHF 32.74 par m³. Dans ces coûts ne sont pas compris la chaleur.

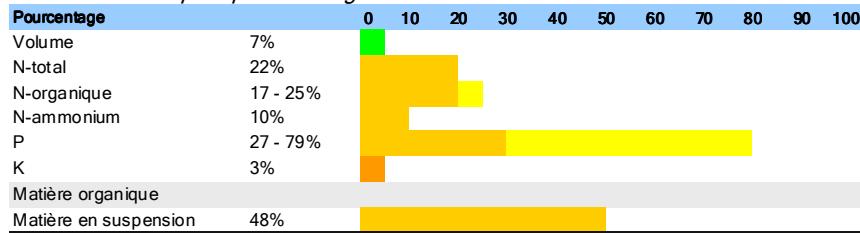
Produits sortants

Le procédé conduit à l'obtention de trois produits:

- produit solide après centrifugation. Ce concentré peut subir un traitement de compostage afin d'élargir les possibilités d'utilisation du produit fini.
- solution de sulfate d'ammonium (38%, environ 65% de l'azote entrant dans 4% du volume d'origine) qui sera utilisé en substitution d'engrangement minéral pour l'apport d'azote sur les sols en pulvérisation. Ce produit est stérile et pourrait être épandu avec la technique CULTAN, un type d'épandage optimisé. [Meier]

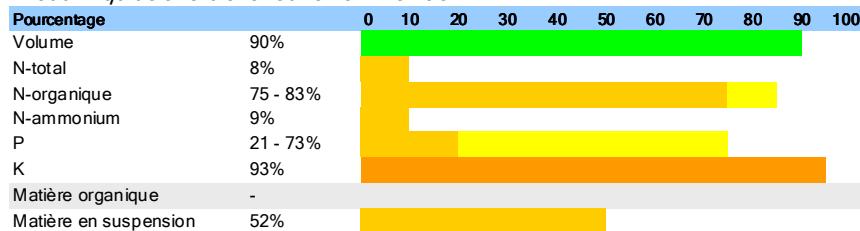
- un produit liquide à faible teneur en azote. Il pourrait être épandu en respectant les normes de P et K.

*Produit solide séparé par centrifugation **

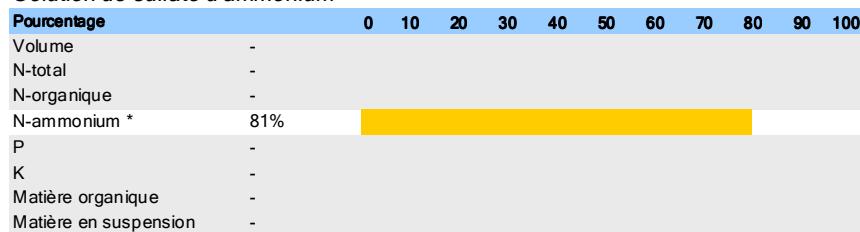


* Voir paragraphe présentation centrifugeuse

Produit liquide à faible teneur en ammoniac



Solution de sulfate d'ammonium



* 90% de réduction d'ammoniac

Environnement

Il y a très peu d'émissions dans l'air, vu que le système de traitement est complètement fermé. En concentrant et fixant l'ammonium dans un concentré, la fraction liquide et la fraction organo-minérale rejettent très peu d'ammoniac et d'autres émissions.

Avantages / Contraintes

Avantages

- Réduction d'émissions d'ammoniac possible, car production sulfate d'ammonium.
- Également possibilité de produire un fertilisant solide après précipitation sulfate d'ammonium avec du lait de chaux.
- Haute rendement de séparation/ concentration de l'azote ammoniacal
- La réduction en ammonium est « réglable »

Contraintes

- Consommation d'énergie
- Utilisation de produits chimiques
- Coûts d'investissement et d'entretien assez élevés
- Risque blocage du garnissage
- Risque de formation de mousse
- Seulement traitement de l'ammonium

Références / Perspectives

On ne trouve pas beaucoup d'information sur les installations réalisées. Cependant le stripage est un procédé assez répandu pour le traitement de lisier. Une variante sur cette méthode est commercialisée par Balthazard & Cotte sous le nom Balcopure. Ce système est utilisé pour le traitement du lisier, mais sans référence sur le traitement du digestat. Ils offrent également un système mobile pour le traitement sur de petites exploitations.

Le stripage des eaux riches en ammonium est un état de la technique ainsi que le traitement des lisiers. En général le stripage d'ammoniac est un procédé relativement simple qui n'est pas trop sensible aux variations de composition du lisier ou de la température ambiante. [Lemmens] mentionne qu'un projet de stripage à l'échelle d'une exploitation agricole est dimensionné sur une réduction de 50% d'azote total et une production de 9 kg de sulfate d'ammonium par tonne lisier. On estime que cette technique est bien utilisable pour le traitement du digestat.

Selon [Meier] le stripage n'est pas trop utilisable à l'échelle d'une exploitation. Non pas en raison de la technique, qui est relativement facile, mais plutôt à cause de l'utilisation de produits chimiques (alcalis, acides), qui suppose manutention, stockage, approvisionnement, désapprovisionnement, ce qui demande une opération professionnelle.

7.5 Évaporation/condensation

Type de procédé

La technique d'évaporation permet une évacuation de l'eau propre et ainsi une concentration de la solution restante ; il s'agit donc d'un procédé de type séparation / concentration. Elle est déjà utilisée dans le traitement des lisiers.

Description du procédé

L'évaporation est provoquée par chauffage du digestat afin qu'il cuise et donc que l'eau s'évapore. Le digestat s'épaissit mais reste liquide (MS max 25%). En travaillant à une pression sous vide on peut diminuer la température de cuisson, qui sous pression atmosphérique est de 100 °C.

L'évaporation est provoquée à une température élevée (55 – 65 °C) sous un vide relatif de 200 mbar. Pour éviter la volatilisation de l'azote ammoniacal, le pH doit être diminué par l'addition d'acide afin de déplacer l'équilibre entre N-ammoniacal (volatile) et N-ammonium en direction de la forme ammonium. Un pré-traitement est requis afin d'éliminer toute particule supérieure à 0,2 mm [IBBK], afin d'éviter des blocages. Un schéma de cette technique est montré dans la figure 27 suivante.

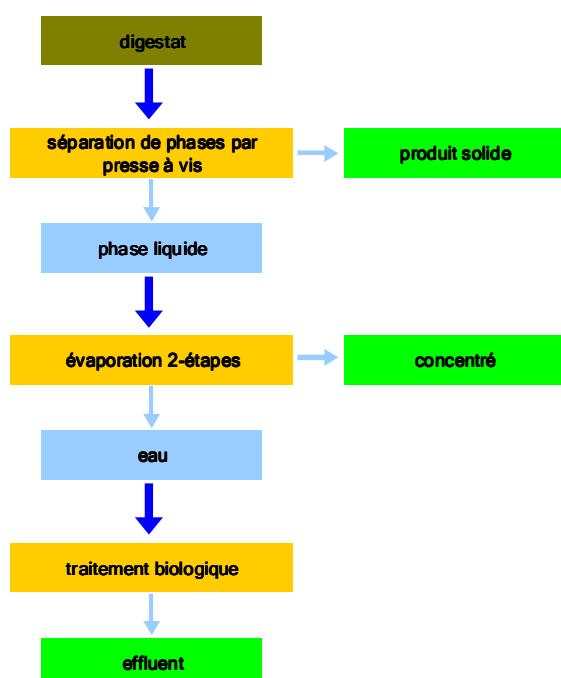


Figure 27: schéma du procédé d'évaporation

L'eau sortant de l'évaporation ne contient presque plus d'azote (6 – 74 mg/l N-total selon [Lemmens]) ni de phosphore, mais contient quand-même trop de DCO (680 – 1'240 mg/l) pour être rejetée directement. Soit cette eau est encore traitée par exemple biologiquement, soit elle est épandue.

Ce système d'évaporation consomme beaucoup de chaleur, mais celle-ci pourrait être approvisionnée par l'installation de méthanisation. Pourtant, cette technique n'est rentable que pour les grandes installations de biogaz (> 1 MW_él), selon [IBBK]. Il y a quelques installations développées à « petite » taille, traitant 15'000 m³/an [Lemmens].

Il existe beaucoup de type d'évaporateurs, à simple ou multiples effets, à simple passage ou à récirculation (configuration hydraulique). On peut citer des types tels que les évaporateurs à film tombant ou montant, à plaques, à lit fluidisé, mélangé, et d'autres [GEA]. Les types utilisés dans le traitement de lisier sont l'évaporateur à film et à récirculation [Lemmens].

Pour réduire la consommation en énergie, surtout la chaleur, il existe trois principes de base :

- L'évaporation à multiple effets, donc plusieurs évaporateurs en série.
- La récompression thermique de la vapeur
- La récompression mécanique de la vapeur

Des fournisseurs de cette technique sont entre autre GEA Wiegand GmbH (D) et AquaSystems Technology (Fi)

Conditions spécifiques

- Emprise : pas de données
- Consommation produits chimiques : régulation du pH.
- Sources d'énergie utilisées : électricité + chaleur
- Consommation énergétique : La consommation en énergie dépend beaucoup au type d'évaporateur utilisé, le nombre d'effets et l'utilisation ou non de la récompression thermique ou mécanique de la vapeur.

[KTBL] mentionne une consommation de 7.9 kWh/m³ électricité + 150 kWh/m³ chaleur.

En cas d'utilisation de la récompression thermique de la vapeur (réutilisation), la consommation en électricité est de 15 kWh/t évaporé et de 8.9 kWh/t évaporé en chaleur sous forme de vapeur.

[Maurer] mentionne pour le traitement d'urine, que l'évaporation à simple effet consomme 108 kWh de chaleur / kg azote évacué, tandis qu'un système avec la compression de la vapeur consomme 1.9 kWh d'électricité et 3.1 kWh de chaleur par kg azote évacué.

Indication sur les coûts

Les coûts d'investissement pour une installation traitant 20'000 m³ / an, incluant séparation de phases, sans bâtiment, stockage et épandage, sont CHF 580'000,-. Les frais sont CHF 13.18 avec et CHF 6.43 par tonne sans les coûts d'énergie thermique [KTBL]. La technique utilisée comprend une presse à vis, une évaporation à 2-étapes et un traitement biologique de l'eau sortant dans un filtre de roseau.

L'investissement pour une installation traitant 2'500 m³ /an est estimé à CHF 450'000,- Les frais s'élèvent à CHF 31.70 sans chaleur et CHF 38.45 avec chaleur.

Produits sortants

Trois produits sortent du traitement, à savoir :

- Produit solide après presse à vis. Ce produit qui représente 10% du volume pourrait sans traitement ultérieur être épandu
- Concentré après évaporation. Il contient tous les fertilisants (NPK) sous forme concentrée.
- Effluent après traitement biologique : 62% du volume. Cet effluent pourrait, selon les normes en vigueur, être rejeté ou être utilisé pour l'irrigation.

*Produit solide après presse à vis**

Pourcentage	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Volume	10 - 20%	0	10	20							
N-total	8 - 25%	0	10	20							
N-organique	-										
N-ammonium	3 - 11%	0	10								
P	8 - 28%	0	10								
K	6 - 13%	0	10								
Matière organique	-										
Matière en suspension	20 - 55%	0	10	20	30						

* KBTL

Produit concentré après évaporation

Pourcentage	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Volume	28%	0	10	20	30						
N-total *	75 - 92%	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
N-organique	-										
N-ammonium *	89 - 97%	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
P *	72 - 82%	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
K *	87 - 94%	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Matière organique	-										
Matière en suspension *	45 - 80%	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90

Calculé comme 100% - valeurs dans le produit solide après presse à vis

Effluent après traitement biologique

Pourcentage	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Volume	62%	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
N-total	0%										
N-organique	-										
N-ammonium	0%										
P	0%										
K	0%										
Matière organique	-										
Matière en suspension	-										

Environnement

Le traitement se fait dans un système fermé. L'adjonction de l'acide immobilise l'ammoniac dans sa forme soluble, notamment l'ammonium.

Avantages / Contraintes

Avantages

- Technologie standard
- Production d'un fertilisant concentré
- Possibilités d'utilisation la chaleur excédentaire de la cogénération

Contraintes

- Besoin important en chaleur
- Risque de production de mousse

Références / perspectives

La technique est bien connue et elle est également bien appliquée dans le traitement de lisier. GEA Wiegand a 12 références sur le traitement de lisier porcin ayant des capacités entre 9.5 et 20 t/heure, dont un exemple est montré dans la figure 28 suivante. Dans plusieurs installations le lisier a subit une digestion préalable.

On estime que cette méthode pourrait bien être appliquée pour le traitement du digestat, surtout quand toute chaleur excédentaire de l'installation de biogaz peut être utilisée.



Figure 28: installation d'évaporation de 108'000 t/an pour le traitement du lisier porcin digéré
[source : GEA Wiegand]

7.6 Séchage thermique

7.6.1 Introduction

Le séchage thermique est un traitement utilisé pour évacuer de l'eau résiduelle qui se trouve dans la fraction solide après une séparation mécanique de phases. Plus la matière entrante est sèche, moins la consommation d'énergie thermique sera élevée.

On distingue deux catégories de séchage selon la façon dont la matière est mise en contact avec la chaleur, à savoir soit par convection, soit par conduction. Dans le premier cas, l'air chaud est mis en contact directement avec la matière, tandis que dans le deuxième cas le transfert se fait par contact via un échangeur. Le séchage par convection est une technique moins complexe que le séchage par conduction, mais le flux d'air est assez important ainsi que le traitement de l'air.

Comme technique pour le séchage du digestat, [Lootsma] mentionne le séchage à bandes et à tambour. Le type détaillé ici est le séchage à bandes.

Le besoin en chaleur est assez élevé. Il se situe entre 700 – 1'400 kWh / t eau évaporée [Lootsma / Stela / Lemmens]. Pour sécher un tonne de digestat de 25 à 90 %MS, il faut évaporer 650 l d'eau, donc 450 - 910 kWh / tonne digestat traité, sans récupération.

Le séchage permet de valoriser la chaleur excédentaire venant de l'installation de méthanisation. Vu les quantités de chaleur nécessaires, une installation de biogaz type agricole n'arrive qu'à sécher la moitié environ du digestat produit [Lootsma].

L'air sortant peut contenir des quantités élevées d'ammoniac ce qui nécessite donc assez souvent un traitement supplémentaire, par lavage acide par exemple (voir § 7.4.3 strippage à lavage acide).

A partir d'un taux de siccité de 90%, qui arrête la croissance des micro-organismes, le produit pourrait être exporté selon la réglementation européenne.

7.6.2 sécheur à bandes

Type de procédé

Ce procédé permet une concentration de la phase solide, après la séparation de celle-ci. Le but du procédé de séchage est l'évaporation de l'eau afin de diminuer le volume. Le produit sortant a une siccité très élevée.

Description du procédé

Le principe du procédé est montré dans la figure 29 suivante et un exemple d'une installation est montré à la figure 30.

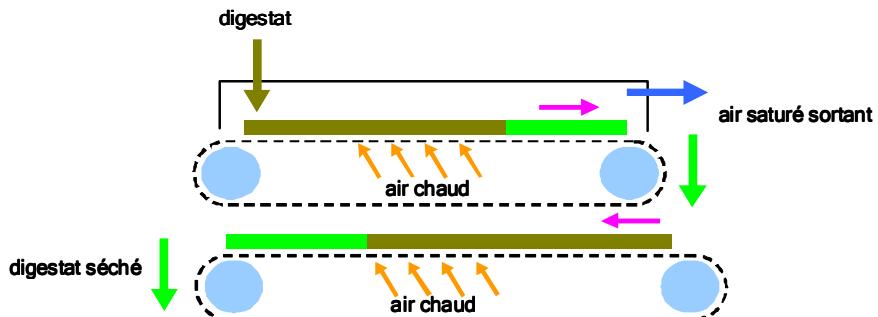


Figure 29: principe du séchage à bandes

Le digestat, qui a une siccité telle qu'il ne coule plus, est dosé sur un tapis poreux. L'air chaud est soufflé à travers le tapis afin de sécher le digestat. À la fin de la bande le digestat tombe sur une autre bande. Le changement d'une bande à l'autre permet également un mélange et homogénéisation.

L'air, qui peut contenir beaucoup d'ammoniac est traité dans un système de lavage acide à l'acide sulfurique. L'eau de lavage contient le sel de sulfate d'ammonium.

Afin d'avoir un taux de matière sèche optimal, soit un pré-traitement par un séparateur de phase est mis en place, soit le digestat est mélangé avec une partie du digestat séché, pour qu'il ne coule plus.

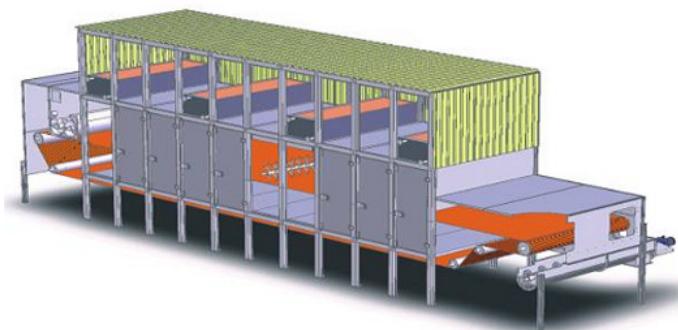


Figure 30: sécheur à bandes [source Stela]

[AgroEnergien] définit 3 systèmes selon le type de prétraitement, notamment :

- pré-traitement avec filtre à tambour
- pré-traitement avec presse à vis
- mélange digestat avec produit séché afin d'augmenter le taux de matière sèche

Le rendement de séparation et la siccité de la fraction solide après une presse à vis sont plus élevés que ceux du filtre à tambour. En traitant 10'000 t de digestat à 9%, d'un filtre à tambour sort une fraction solide de 3'750 t à 14 % MS et une fraction liquide de 6'250 t à 6% MS et d'une presse à vis respectivement 2'000 t à 25% MS et 8'000 t à 5% MS [AgroEnergien]. Il faut donc évacuer plus d'eau après un filtre à tambour qu'avec une presse à vis pour obtenir une masse séchée à 90% MS dans le sécheur.

La figure 31 ci-après montre le schéma ainsi qu'un bilan matière d'un système de séchage à bandes avec un prétraitement par presse à vis, variant la plus répandue, car ce pré-traitement permet déjà d'évacuer, sans grande consommation énergétique, une partie de la fraction liquide.

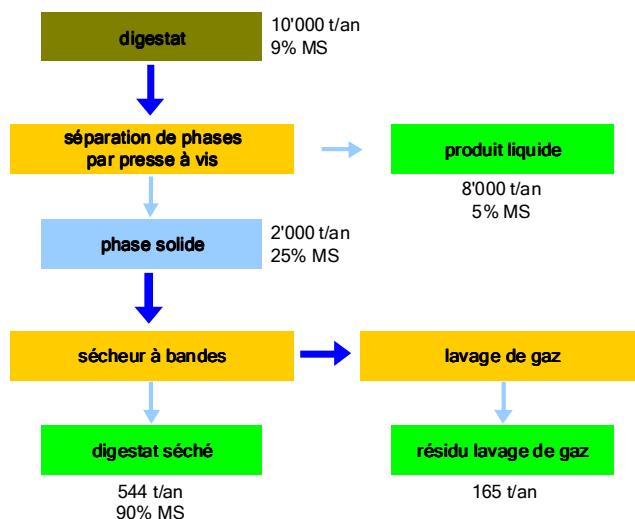


Figure 31: schéma séchage à bandes avec prétraitement par presse à vis

Selon [BD Agro] le taux de MS optimal à l'entrée du sécheur est d'environ 30 %, ce qui nécessite l'utilisation d'une presse à vis comme pré-traitement.

Il existe beaucoup de fournisseurs de ce procédé : BD Agro (Big Dutchmen), Dorset, Agroenergien, Ceres-sepatherm, Schmitt Enertec, Farmatic, Stela, Riela et autres. La capacité se situe entre 2 – 85 t/jour [BD Agro].

Conditions spécifiques

- Emprise : longueur 12 – 26 m, largeur 4 – 6 m pour sécheur seulement. Ceres-sepatherm fournit ses installations dans un conteneur de 12.2 m, voir figure 32. Sans prétraitement, qui sera quand-même nécessaire (presse à vis). Emprise d'un conteneur (12.2 x 2.44 x 2.90 m). Rien n'est indiqué sur le traitement de l'air.
- Consommation produits chimiques : H_2SO_4 – 3.5 kg / kg NH_3 [Agroenergien] (100%)
- Sources d'énergie utilisées : électricité + chaleur
- Consommation énergétique : électricité 12,2 kWh / m^3 , chaleur 120 kWh / m^3 [Ktbl]. Le calcul de [Ktbl] est exprimé par t digestat total pour un traitement incluant une presse à vis. [Ceres-sepatherm] mentionne 6.4 kWh/t électricité, 281 kWh/t digestat chaleur pour sécher 10'000 t/an, prétraité.

Indication sur les coûts

[Ktbl] mentionne des coûts d'investissement CHF 380'000,- pour une installation traitant 20'000 m^3 /an, les frais sont de CHF 11.63 / m^3 et de CHF 5.89 sans les coûts de chaleur.

Ceres-sepatherm : Coûts d'installation pour 10'000 t/an dans container CHF 386'000.- (sans indication sur un traitement de l'air, ni pré traitement). Si on estime un coût d'investissement pour une installation traitant 2'500 t/an de digestat à CHF 350'000,- y compris pré-traitement par presse à vis et traitement de l'air, les frais s'élèvent à CHF 23.90 par t, sans les coûts de chaleur.



Figure 32: sécheur à bandes dans un conteneur de 12m [source : Ceres-sepatherm]

Produits sortants

3 produits sortants :

- Produit liquide (MS 5%) après séparation, représentant 80% du volume total. Cette fraction contient en fait presque tous les composants fertilisants. Sans traitement ultérieur il peut être épandu.
- Fraction digestat après sécheur (MS 90%). Cette fraction, pourrait être utilisée comme amendement ou comme litière, selon une référence de Dorset en Allemagne. Le produit pourrait également être pressé en pellets et ensuite être utilisé comme combustible.
- Eau de lavage de l'air sortant. Ce produit de sulfate d'ammonium en solution pourrait être utilisé comme substitut des engrains minéraux.

Produit liquide après presse à vis

Pourcentage	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Volume *	80 - 90%										
N-total **	80%										
N-organique	-										
N-ammonium **	91%										
P *	72 - 92%										
K *	87 - 94%										
Matière organique	-										
Matière en suspension *	46%										

* KBTL

Digestat séché

Pourcentage	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Volume / masse	5%										
N-total	11%										
N-organique	-										
N-ammonium	-										
P *	8 - 28%										
K *	6 - 13%										
Matière organique	-										
Matière en suspension *	54%										

* 100 - données produit liquide après presse à vis

Eau de lavage

Pourcentage	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Volume / masse *	2%										
N-total	9%										
N-organique	-										
N-ammonium **	9%										
P *	-										
K *	-										
Matière organique	-										
Matière en suspension *	-										

* volume créé; pourcentage par rapport au volume initial

** estimation que tout N-total est disponible comme ammoniac

Environnement

Concernant le prétraitement par presse à vis, voir le paragraphe (7.2.1) y relatif. Tant que le système est équipé d'une unité de traitement de l'air (poussières, ammonium), les émissions sont très limitées. L'ammonium est immobilisé dans une solution acide de sulfate d'ammonium. Finalement, avec une presse à vis presque 10% de l'ammonium part en sulfate d'ammonium et sans prétraitement presque 30%. Les émissions pendant l'épandage sont donc réduites grâce à une quantité inférieure d'ammonium.

Avantages / contraintes

Avantages

- Possibilités d'utilisation la chaleur excédentaire de la cogénération

Contraintes

- Haut besoin en chaleur
- Traitement de l'air nécessaire
- Pas traitement total, il reste une fraction liquide non-traitée venant de la séparation de phase préalable.

Références / Perspectives

Il existe déjà plusieurs références, notamment dans le traitement du digestat des installations de biogaz. Dorset a une référence en Allemagne séchant le digestat liquide d'une installation de biogaz de 1 MW_{él.}.

7.7 Précipitation de struvite

Type de procédé

Ce procédé de transformation est basé sur le processus chimique de la précipitation.

Description du procédé

Ce procédé est réalisé dans un réacteur dans lequel sont créées des conditions permettant la co-précipitation de l'ammonium et du phosphate et la formation de struvite (ou magnésium-ammonium-phosphate MAP), selon l'équation suivante :



En sachant qu'une partie de la matière organique pourrait être co-précipitée, le rendement de la précipitation d'ammonium et de phosphate s'améliore donc en diminuant tout produit qui interfère avec celle-ci. Un pré-traitement est donc requis pour éliminer une partie de la matière organique afin d'atteindre une précipitation plus efficace. Un prétraitement poussé par centrifugation, inclusif dosage de floculants/coagulants, devrait être prévu, voir figure 33.

Le produit précipité final est séparé de la phase liquide par décantation ou filtration.

Il est possible d'éliminer environ 90% de N et P de la fraction liquide des lisiers [WUR / BUWAL]. Une variante est le procédé de CAFR (Chemische Ammonium Fällung und Rezyklierung). La solution contenant le MAP est chauffée et le pH est augmenté. Par strippeage, l'ammonium est évacué et une solution contentant l'hydrophosphate de magnésium reste et peut être réutilisée dans le processus. L'ammonium est récupéré par lavage avec l'acide sulfurique.

Cette technique est commercialisée entre autre par Nalva Umweltechnik GmbH et sous le nom d'Anphos par Colsen BV NL.

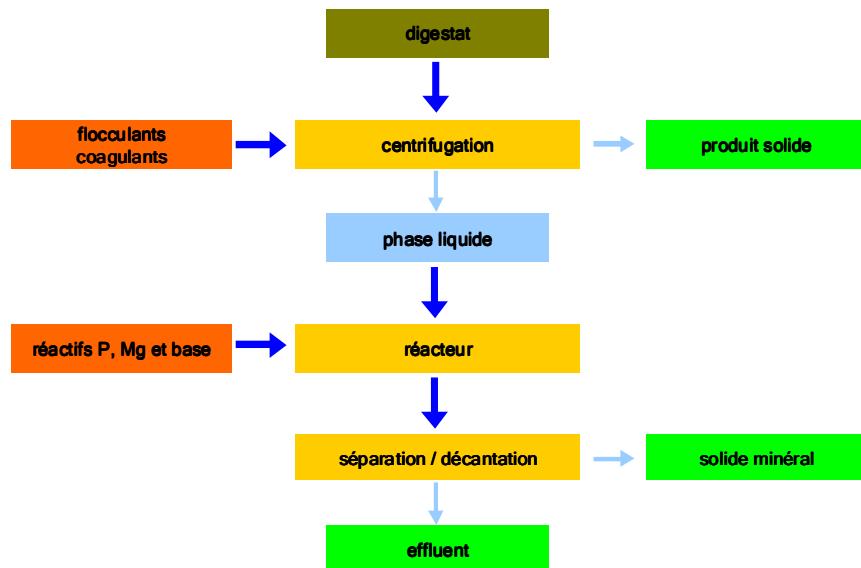


Figure 33: schéma précipitation de struvite

Conditions spécifiques

- Emprise : pas de données
- Consommation produits chimiques : Selon [BUWAL] pour précipiter 1 kg de NH₄-N il y faut 9.5 kg de H₃PO₄ à 70%, 4.2 kg de MgO à 94% et de 6 kg de NaOH à 30%. Au total, 18.5 kg de précipité de MAP est produit.
- Sources d'énergie utilisées : électricité
- Consommation énergétique : Les coûts d'énergie pour la précipitation seule sont estimés à 0.65 kWh / kg N précipité [Buwal]. Il faut encore de l'énergie pour la centrifugation, qui est de 7 kWh/t

Indication sur les coûts

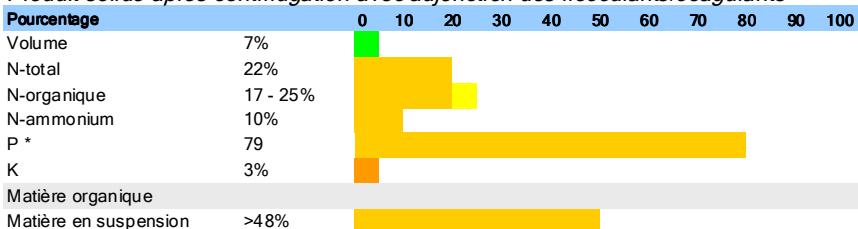
Les coûts par m³ de lisier traité sont estimés à CHF 46.50. Les coûts des produits chimiques constituent environ la moitié des coûts d'exploitation [WUR]. On estime que ces coûts correspondent à une installation complète, y compris la centrifugation.

Produits sortants

3 produits sortants:

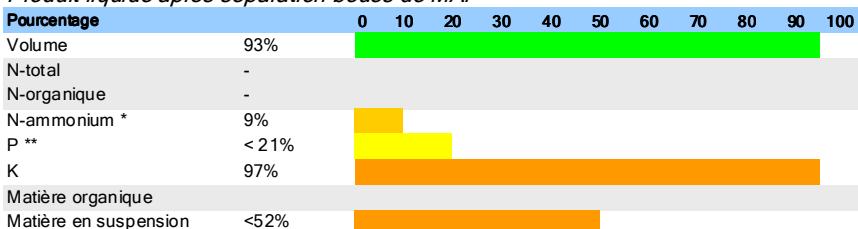
- Produit solide sortant de la centrifugation (MS 15 – 35%). Des flocculants/coagulants sont ajoutés pour améliorer la séparation de la matière en suspension, ce qui engendre également une séparation des phosphates.
- Produit solide minéral contenant le MAP et résidu organique (MS estimée à 30%). Cette fraction pourrait être utilisée comme fertilisant à effet retardé, parce que P et N ne sont pas directement disponibles.
- Fraction liquide contenant très peu de N et de P (MS estimée à 1-3%), mais il contient presque tout le K. Cette fraction liquide pourrait être épandue. Il faut noter que le potassium dans ce cas pourrait limiter la surface d'épandage.

Produit solide après centrifugation avec adjonction des flocculants/coagulants



* Ici utilisation des flocculants / coagulants pour améliorer séparation. L'utilisation permet de réduire le contenu du P dans le produit liquide

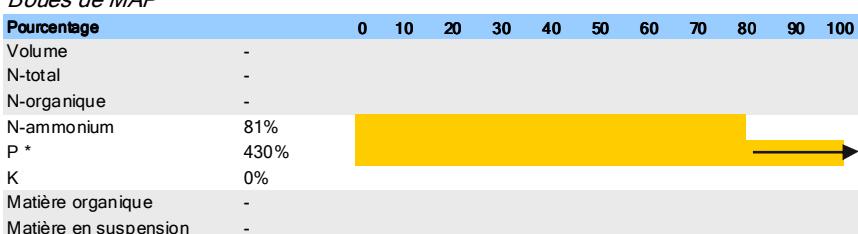
Produit liquide après séparation boues de MAP



* Élimination de 90 % d'ammonium

** Difficile de juger le solde en P. On l'estime à 100 % moins le pourcentage évacué par la centrifugeuse

Boues de MAP



* Pour la précipitation il faut ajouter du phosphore en quantités plus élevées que présent dans le digestat

Environnement

Tout procédé est fermé, donc il n'y a pas d'émissions gazeuses. L'ammoniac est également immobilisé, ce qui réduit fortement les chances d'émissions depuis un stockage définitif ou depuis l'épandage. Le pH optimum pour la précipitation est entre 8 et 10, assez haut pour produire de l'ammoniac.

En général, cette méthode permet de réduire la quantité d'ammonium et donc également les émissions de celui-ci pendant l'épandage.

Avantages / Contraintes

Avantages

- Production d'un fertilisant qui contient également du phosphate
- Procédé facile et fiable.

Contraintes

- Production de grandes quantités de précipité
- Pas de technique sans surveillance
- Marché du produit fini doit exister. Il n'y a pas une forte demande pour un engrais NP à 1 : 1, mais plutôt pour des engrains contenant plus d'azote.
- Consommation en produits chimiques assez élevée
- Selon la répartition entre P en N il est nécessaire d'ajouter du P, ce qui nécessite une surface épandable plus grande pour les boues contenant le MAP

Références / Perspectives

1 installation a été réalisée à Kruiningen, Pays-Bas, sur le site de LWM, un industriel de la transformation de pommes de terre (procédé Anphos de Colsen BV).

Techniquement cette méthode est déjà appliquée dans le domaine du traitement des eaux usées, mais elle nécessite une demande d'un engrais à 1 : 1 NP. Cette technique n'a pas pu s'établir ni pour le traitement du lisier, ni pour celui du digestat.

7.8 Compostage

Type de procédé

Ce procédé de type transformation biologique a pour but la stabilisation aérobie de la fraction solide du digestat, obtenue après une séparation mécanique des phases liquide et solide.

Description du procédé

Le compostage est un procédé biologique qui, en présence d'oxygène, transforme la matière organique en composants humiques, en rejetant également de la chaleur, de l'eau, du CO₂ et des composants olfactifs (comme par exemple l'ammoniac). Grâce à l'évaporation de l'eau et l'élimination de la matière organique, le taux de matière sèche augmente et le volume diminue (séchage « biothermique »). Les micro-organismes utilisent les minéraux sortant pour leur propre croissance. Pendant le processus la température augmente, comme présente la figure 34.

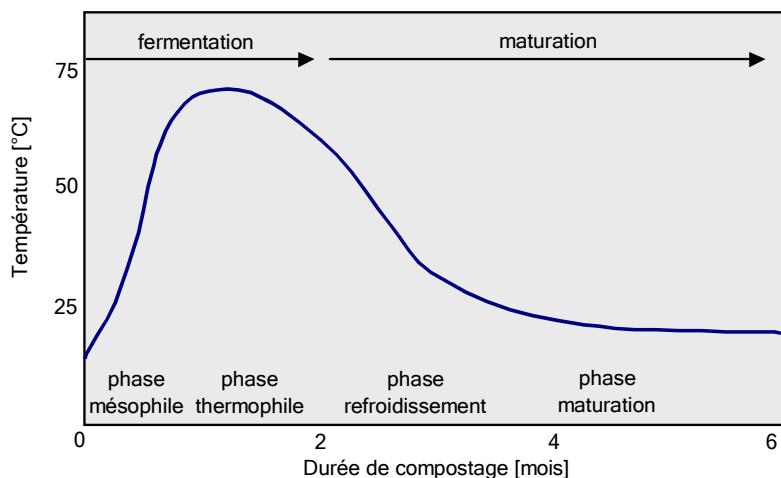


Figure 34: courbe d'évolution de la température pendant le compostage

Selon l'évolution de la température on distingue 4 phases : une phase mésophile (température environ 30 – 40 °C), une phase thermophile (60 – 75 °C), une phase de refroidissement et une phase de maturation. Les deux premières phases sont celles de la fermentation et donc de la dégradation de la matière organique. Les hautes températures pendant la phase thermophile permet également une hygiénisation éliminant les pathogènes. Pendant les deux dernières phases, la matière organique a été dégradée, l'humification se fait et le compost est mûr. Un bon compostage dépend des caractéristiques telles que la porosité de la matière, le rapport C/N, l'humidité, ainsi que l'aération pendant le processus.

On distingue deux pratiques de compostage, à savoir le compostage extensif et le compostage intensif. Le compostage extensif, dont le schéma est présenté dans la figure 35 se produit en général à l'air libre. Un tas de compost est établi au début et pendant le processus ce tas est retourné une ou plusieurs fois. La durée totale est quelques mois. Selon la matière, la porosité à la base du tas se réduit ce qui engendre des conditions anaérobies. Un tas ne peut donc pas être trop haut.

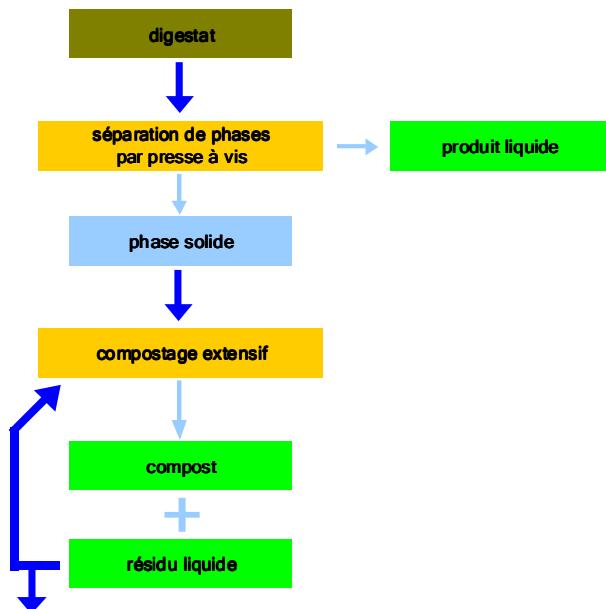


Figure 35: schéma compostage extensif

Le compostage intensif, dont le schéma est présenté en figure 36, est réalisé dans des enceintes fermées et contrôlées. Le tas est aéré mécaniquement et mélangé continuellement, pour réduire la durée du processus à 1 – 2 semaines. Pour prévenir l'émission dans l'air de l'ammoniac, il est traité par lavage (acide), la même technique que celle utilisée pour le strippage (voir § 7.4.3).

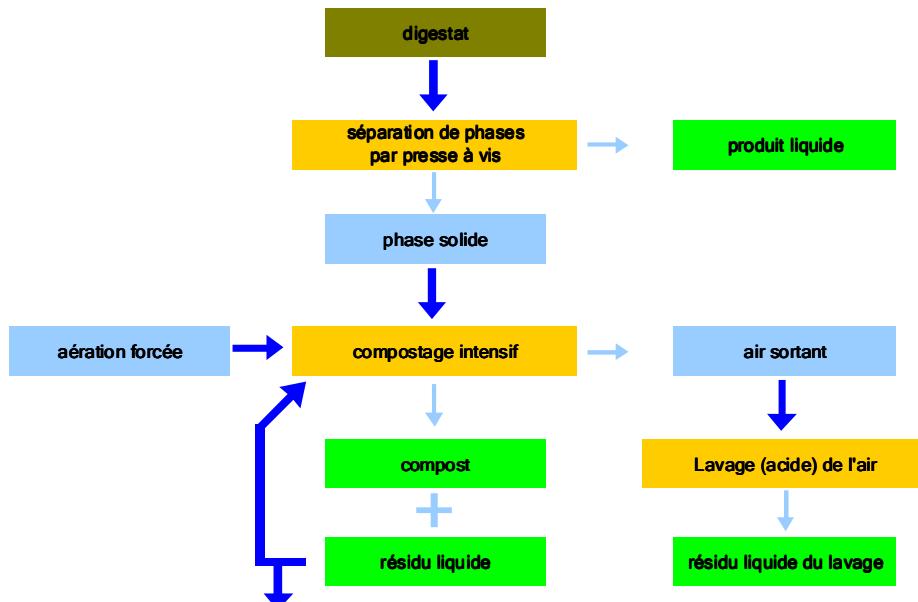


Figure 36: schéma compostage intensif

Le produit final ne contient presque plus d'azote minéral.

Il est nécessaire d'ajouter du matériel structurant au digestat solide, comme par exemple des déchets verts, pour améliorer la porosité et donc le transport de l'air à travers le tas de compost.

Le compostage permet une élimination de 30 – 50% de la matière organique. Le taux de matière sèche peut augmenter à 50 – 75 % et la réduction en volume peut atteindre environ 50%. Ceci inclus la dégradation de la matière organique en CO₂ et la réduction de la teneur en eau (séchage potentiel).

Conditions spécifiques

- Emprise : entre 1 à 1.5 m² par tonne par an
- Consommation produits chimiques : -
- Sources d'énergie utilisées : électricité et carburant
- Consommation énergétique : estimation située entre 5 kWh par tonne (compostage extensif, y compris le mélange sans traitement de l'air) et 50 kWh par tonne (compostage intensif) [WUR]. Pour le compostage en halle ou tunnel, la consommation en électricité est entre 45 et 50 kWh/t masse organique, dont 30 – 35 kWh/t pour l'aération seulement [Lemmens].

Indication sur les coûts

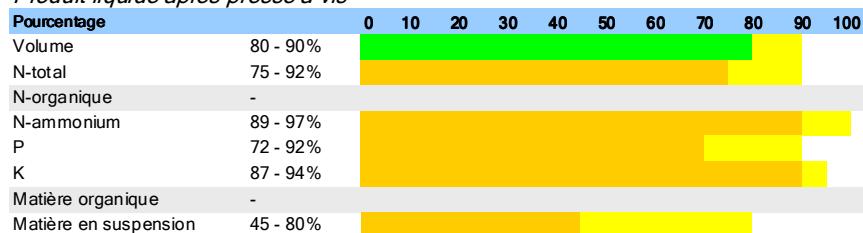
Le compostage extensif est réalisé à des coûts d'environ CHF 9.30 par tonne et le compostage intensif à environ CHF 54.25 par tonne matière entrant [WUR] / [Lemmens]. [KTBL] mentionne des coûts d'investissement de CHF 815'000.- pour une installation de compostage en couloir traitant 2'000 t /an de digestat solide et 10 Vol% de déchets verts et des coûts d'exploitation à CHF 70.- par tonne. Le compost est un produit qui peut générer des recettes. Pour traiter 2'500 m³ /an de digestat (donc 250 t de digestat solide) on estime les frais à CHF 19.40 par m³ de digestat entrant pour un investissement estimé à CHF 300'000,-.

Produits sortants

Il y a trois produits sortants du compostage du digestat:

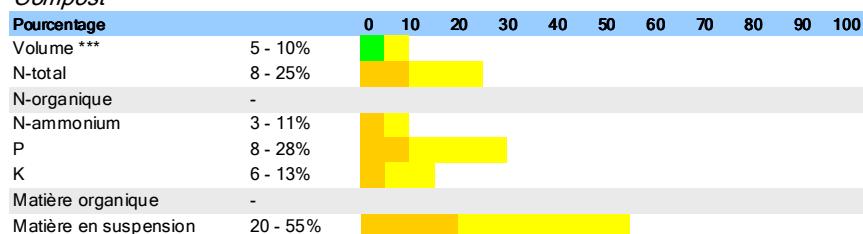
- Un produit liquide sortant de la séparation de phases par presse à vis (concentration en MS environ 5%), qui sans traitement ultérieur est destiné à l'épandage par rampe pendillards
- Le compost
- Résidus liquides du compostage et de lavage de gaz

*Produit liquide après presse à vis **



* KTBL

*Compost ***



** Calculé par différence sur le produit liquide

*** Estimation réduction du volume de 50%

Environnement

Le compostage peut engendrer beaucoup d'émissions des gaz à effet de serre (CO₂, N₂O et CH₄) et des odeurs. L'émission d'azote se fait sous forme d'ammoniac (NH₃), protoxyde d'azote (N₂O) et le gaz inoffensif d'azote (N₂). Le compostage extensif sur les exploitations agricoles provoque des pertes d'azote estimées entre 15 et 50%, une partie est émise sous forme NH₃ et N₂O.

La part d'émissions de N₂O lors du compostage de fumier de porc est estimée à 2.5% de la quantité initiale de l'azote [Szanto].

La quantité d'ammoniac émis dépend notamment de la gestion du procédé, des quantités d'azote dans la matière entrante et du rapport C/N (optimal entre 20 – 35).

Une bonne opération empêche pour une grande partie les émissions et un compostage intensif dans une espace fermé et bien contrôlé, empêche des émissions indésirables, si celui-ci est équipé d'un traitement (chimique) de l'air.

Un compostage extensif requiert un sol imperméable et un système de captage des eaux pour prévenir des rejets de percolat dans le sol.

Vu que la plupart d'ammonium se trouve dans le produit liquide et que le compostage intensif n'engendre pas d'émissions grâce à son traitement de l'air, on estime que les émissions sont donc plutôt comparables avec celles de l'épandage de la totalité du digestat.

Avantages / Contraintes

Avantages

- Réduction des coûts de transport par réduction de la teneur en eau.
- Le compost sert comme amendement de qualité pour le sol.
- Le compost est exportable

Contraintes

- S'il est insuffisamment maturé, la décomposition de la matière organique se poursuit ainsi que les émissions et la survie des pathogène et graines des mauvaises herbes.
- Seulement traitement phase solide
- Fortes chances d'émissions dont le N₂O si le confinement et la gestion sont imparfaits
- Pas grande réduction d'azote

Références / Perspectives

Le compostage bien contrôlé et bien équipé (compostage fermé avec traitement de l'air) permet de bien éviter les émissions. Cette méthode permet de produire un compost qui, lorsqu'il est vendu, peut assurer des recettes complémentaires, en plus de la méthanisation.

7.9 Traitement biologique

Type de procédé

Le traitement biologique est un procédé d'élimination de l'azote et également de réduction partielle de DCO. Ce traitement est déjà bien utilisé pour le traitement des lisiers.

Description du procédé

Le procédé de traitement biologique traditionnel de l'azote sous forme d'ammonium est celui de la nitrification / dénitrification (NDN). Dans un réacteur qui contient des boues activées (masse bactérienne ou biomasse), des phases aérobies et anoxiques sont créées afin de réaliser respectivement la nitrification, donc la transformation de l'ammonium en nitrate à l'aide d'une biomasse utilisant l'oxygène pour la respiration (l'oxydation), et la dénitrification, où le nitrate produit est réduit (sous consommation de substance organique biodégradable) en azote gazeux qui est rejeté dans l'atmosphère.

Le paramètre important pour le traitement biologique est la façon selon laquelle l'entrant liquide est mis en contact avec la masse microbienne et surtout la façon dont l'effluent traité est séparé de la masse microbienne afin de maintenir cette masse dans le système et de produire un effluent propre.

La mise en œuvre des cultures bactériennes peut revêtir de très nombreuses formes. Il est classique de distinguer les procédés dits à cultures libres et les procédés dits à cultures fixées ainsi que les cultures mixtes [Degrémont]. Dans les procédés à cultures libres, celles-ci se trouvent en suspension au sein du liquide à traiter. Plusieurs techniques existent pour finalement séparer la masse bactérienne, comme la décantation ou la filtration membranaire. Dans les techniques à cultures fixées la masse bactérienne est fixée sur un support immobile pour produire un biofilm. Les cultures mixtes

sont fixées sur un support, mais comme ce support est mobile et donc en suspension dans le réacteur, également ces cultures sont « en suspension » et donc pas « fixées ».

Il existe plusieurs types de bactéries pour l'élimination des composants azotés, plutôt sous forme d'ammonium, comme : la nitrification/dénitrification, nitritation/dénitritation, anammox. Ils se développent dépendant des conditions de culture en non selon les types de celles-ci.

Le tableau 7 suivant donne une vue des types de traitement biologique existants.

Tableau 7 : types de traitement biologique existants

Type bactérienne	Type cultures	Sous-types techniques
Nitrification/Dénitrification	Cultures libres (boues activées)	Systèmes continus avec clarification
Nitritation/Dénitritation		Réacteurs biologiques séquentiels (SBR)
Anammox		Bioréacteurs à membranes
	Cultures fixées	Lits bactériens (lits à ruissellement) Filtres biologiques fixes (biofiltres) Disques biologiques
	Cultures mixtes	Biofiltres en suspension

Le type le plus répandu est la nitrification / dénitrification avec des cultures libres dans un système continu avec clarification, tel que montré dans la figure 38.

La NDN peut être conduite sur du digestat brut ou, de préférence, sur du digestat prétraité ayant subi une séparation de phases visant à s'affranchir de la fraction particulaire, qui complique la gestion des ouvrages de traitement, ce qui est montré dans la figure 37. De nombreux constructeurs ont repris le concept générique de la NDN et le développent sous différentes dénominations de procédés qui se différencient, essentiellement, par les traitements du digestat en amont ou en aval. Quelques fournisseurs dans le traitement biologique des lisiers sont : Trevi (cultures libres), Bio Armor, EuroBiosor (séparation de phases, lits à ruissellement), Valétec (cultures libres).

Le prétraitement par séparation mécanique de phases permet d'évacuer une partie du phosphore.

L'effluent issu du traitement des lisiers, ne pouvant être rejeté du fait de l'insuffisance de son niveau d'épuration, doit être géré par épandage.

Selon [Teffene], dans les six procédés de traitement biologiques étudiés, l'élimination de l'azote par transformation en N_2 est compris entre 48 % et 91 % et l'azote extrait (azote entrant moins azote dans l'effluent, sans la partie qui part dans des boues) varie entre 65 et 98%. Certains d'entre eux, équipés de séparateurs de phases éliminent simultanément une part plus ou moins importante du phosphore.

L'élimination d'azote, donc le rendement de la dénitrification est dépendant de la quantité et de la disponibilité de la matière organique. Pour avoir une élimination avancée il faut une adjonction d'une source de carbone facilement biodégradable, comme par exemple le méthanol. Ce dosage engendre, à part des coûts pour celui-ci, une augmentation de la quantité de boues produites.

Les processus de nitratation/dénitratation ou de nitratation partielle combinée avec anammox sont plus efficaces parce que le degré d'oxydation est moins élevé (diminution de la consommation en oxygène et donc une réduction de la consommation énergétique) et ils nécessitent moins de sources de carbone. Les conditions stables nécessaires pour ces procédés ne sont pas encore résolues.

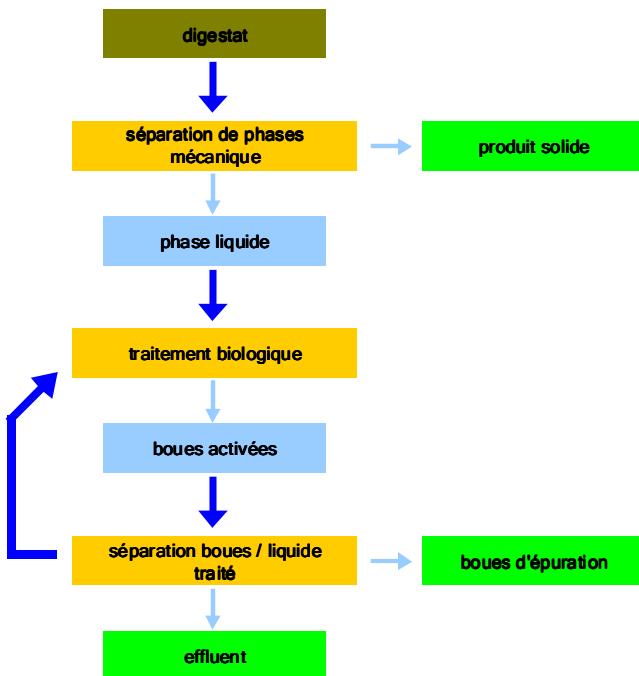


Figure 37: schéma traitement biologique

Conditions spécifiques

- Emprise : important. Il faut des bassins de nitrification / dénitrification.
- Consommation produits chimiques : -
- Sources d'énergie utilisées : électricité
- Consommation énergétique : la plupart de l'électricité est utilisé pour l'aération. Sa consommation se trouve entre 15 – 30 kWh par t lisier [WUR] (20 kWh par m³ lisier traité [INRA] ou entre 12 et 18 kWh par m³ [Lemmens]).

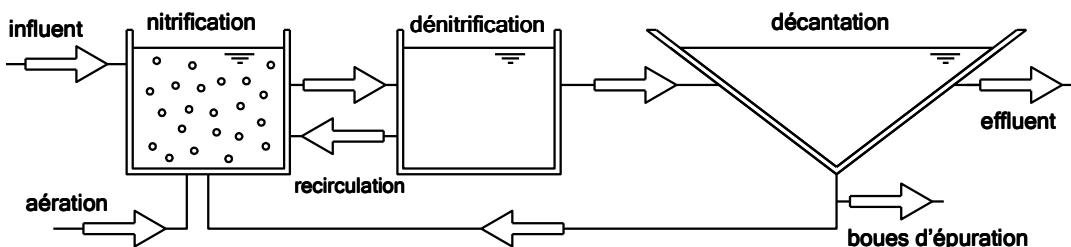


Figure 38: traitement biologique à cultures libres, système continu avec clarification

Indication sur les coûts

[Teffene] a défini un coût de CHF 15.45 / m³ pour 6'924 m³/an, sur une moyenne de 6 installations de 2'200 à 12'800 m³/an, selon le principe présenté aux figures 37 et 38. Il n'y pas de différence significative entre taille d'installation et coûts, selon un sondage entre quelques installations en opération. [Lemmens] montre quand-même une différence entre taille et coûts : CHF 17.31 / m³ pour 5'000 m³/an (dont investissement CHF 410'000,-) à CHF 8.85 / m³ pour 30'000 m³/an (investissement (CHF 1'170'000,-). Pour traiter 2'500 m³ par an (investissement estimé à CHF 380'000,-), les coûts sont estimés à CHF 26.30 par m³.

Produits sortants

En général, 3 produits sortent du traitement :

- Produit solide (concentration en MS environ 25-30%), qui sans traitement ultérieur est destiné à l'épandage par l'épandeur de fumier.
- L'effluent, donc la fraction liquide traité du digestat, (MS 1.5%) [Lemmens]. L'effluent traité du traitement des lisiers et également estimé pour le digestat, ne pouvant être rejeté du fait de l'insuffisance de son niveau de traitement, doit être géré par épandage. Dans ce cas, les normes de K doivent être respectées. Cet effluent représente, dans le cas d'un système à cultures libres et décantation, environ 75-80% du volume entrant [WUR].
- Boues d'épuration, MS 8% après décantation. Cette fraction, obtenue par décantation des cultures libres représente environ 20-25% du volume entrant [WUR]. En Suisse l'épandage des boues d'épuration urbaines est interdit, mais les sous-produits venant du traitement de digestat pourraient être épandus.

Produit solide (après presse à vis) *

Pourcentage	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Volume	10 - 20%	0	10	20							
N-total	8 - 25%	0	10	20							
N-organique	-										
N-ammonium	3 - 11%	0	10	20	30						
P	8 - 28%	0	10	20	30						
K	6 - 13%	0	10	20							
Matière organique	-										
Matière en suspension	20 - 55%	0	10	20	30	40	50				

* KBTL

Effluent **

Pourcentage	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Volume	63%	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
N-total	2%	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
N-organique	-										
N-ammonium	-										
P	12%	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
K	56%	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Matière organique	-										
Matière en suspension	-										

Boues d'épuration **

Pourcentage	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Volume	27%	0	10	20	30						
N-total	18%	0	10	20							
N-organique	-										
N-ammonium	-										
P	71%	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
K	29%	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Matière organique	-										
Matière en suspension	-										

** [Teffene] Valeurs indicatives sur le traitement de lisier de porc

Environnement

[Lemmens] montre des émissions pendant le traitement biologique entre 0.5 – 1% de l'azote total en N₂O / NH₃. Les conditions de traitement nécessaire pour empêcher l'émission de N₂O font encore sujettes de la recherche.

L'effluent sortant ne contient presque plus d'ammonium, presque seulement du nitrate et donc la volatilisation pendant épandage n'est pas déterminant.

Avantages / Contraintes

Avantages

- Également élimination
- Production d'un effluent peu chargé en polluants.

Contraintes

- Production de boues d'épuration
- Pas de conservation d'azote
- Seulement élimination partielle de l'azote
- Consommation assez importante d'énergie
- Émissions de N₂O et de NH₃

Références / Perspectives

Cette technique, bien appliquée pour le traitement des eaux résiduaires, est également bien répandue pour le traitement des engrais de ferme liquide, surtout les lisiers porcins ou le lisier de bovins. Elle est également utilisée pour le traitement du digestat. Elle permet d'un côté une élimination de l'azote, mais pas une concentration et une exportation de celui-ci vers des régions en déficit.

7.10 Autres techniques

7.10.1 Strippage et lavage avec gypse

Le procédé présenté ici a été conçu par GNS / SSM - Technology sous le nom d>Anastrip, dont le schéma de la méthode est présenté à la figure 39.

Il s'agit d'un procédé batch. La volatilisation de l'ammoniac se fait à une température de 80°C et sous une sous-pression de 500 mbar. Avec ce procédé une réduction de 80% d'ammoniac est faisable.

Le gaz de strippage contenant l'ammoniac est traité dans un réacteur en ajoutant du gypse (provenant de la désulfuration des fumées), la réaction chimique suivante est provoquée :

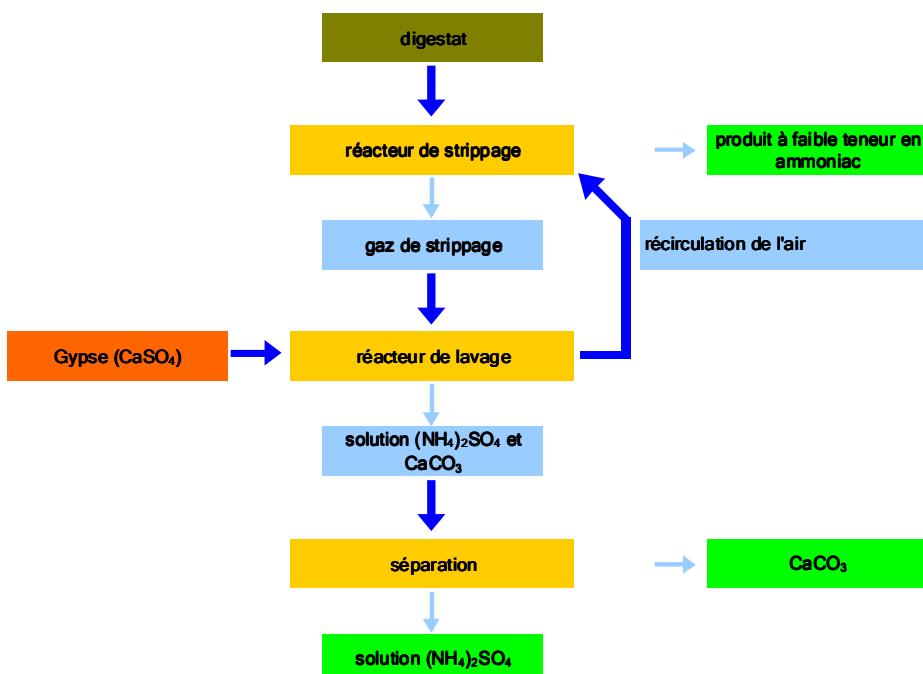


Figure 39: schéma strippage et lavage avec gypse (procédé Anastrip)

La consommation en produits chimiques, notamment le CaSO₄, est de 6.45 kg / kg N éliminé. Consommation énergétique : puissance électrique 14 kW et chaleur 551 kW pour traiter 31'143 m³/an. Si on calcule la chaleur nécessaire pour chauffer le digestat de 30 à 80°C, la consommation est de 58 kWh/ m³.

Selon [GNS] les coûts pour une installation traitant 10'000 m³/an sont estimés à CHF 11.63/ m³ pour traiter 10'000 m³/an.

Le procédé conduit à l'obtention de trois produits :

- Digestat après stripage, avec un teneur en NH₄ fortement réduite. Il peut être épandu en respectant les normes de NPK
- Solution de (NH₄)₂SO₄ (40%, environ 4% du volume du digestat traité), 9.7 m³ par t N éliminé. Ce concentré d'azote est utilisable comme substitut aux engrains minéraux.
- CaCO₃ solide (3.6 t par t N éliminé)

Il y a très peu d'émissions dans l'air, vu que le système de traitement est complètement fermé. En concentrant l'ammonium, le digestat traité rejette très peu d'ammoniac.

Il existe une installation pilote depuis 2003 et une installation est en service au nord de l'Allemagne. Cette technique est encore au début de son développement.

7.10.2 Pyrolyse

La pyrolyse est la gazéification de la matière organique à température élevée sans oxygène. Cette technique est en fait une alternative à l'incinération des boues. À des températures en dessous 800 °C du gaz, du liquide huileux et un résidu solide sont formés. En dessus de 1000 °C (pyrolyse à température ultra haute) seuls du gaz et du résidu solide sont produits.

Le gaz, appelé gaz de synthèse (syngas) contient pour environ 85% le charbon monoxyde (CO) et en moindre concentrations le méthane (CH₄), l'hydrogène (H₂) et un peu de gaz carbonique (CO₂). Ce gaz, produit intermédiaire, est utilisé par exemple comme carburant dans des couplages chaleur-force.

Il faut noter que la matière organique entrant dans la pyrolyse doit être sèche, avec une teneur en eau de maximum 30%. De ce fait, un prétraitement est nécessaire qui permet de séparer les phases (centrifugeuse) et de sécher la phase solide jusqu'à la teneur voulue. Un schéma de la méthode est présenté dans la figure 40 suivante. La pyrolyse traite donc seulement la fraction organique solide.

Les premières installations sont construites. Deux fournisseurs de cette technique sont Pyromex AG (CH) et Kopf AG (D).

7.10.3 Anammox

Une variation sur le traitement biologique par le type bactérienne de nitrification / dénitrification est le procédé microbien qui s'appelle Anammox. Les bactéries sont capables d'oxyder l'ammonium en conditions anaérobies en utilisant les nitrites comme accepteur préférentiel d'électron. En plus, le procédé n'a pas besoin de la matière organique qui est le cas pour la dénitrification. Les avantages de ce procédé sont entre autre la réduction du besoin en oxygène et donc lié à celui-ci la consommation énergétique (aération) et la réduction en émissions de N₂O. Il faut noter que pour avoir des nitrites une nitrification partielle est quand-même nécessaire.

[Grömping] montre une consommation de 2.5 – 3 kWh / m³ contre 4 – 6 kWh / m³ pour un système classique par SBR.

EAWAG a fait un essai sur de traitement par le procédé Anammox sur du digestat après centrifugation venant une installation « Kompogas » traitant des biodéchets, mais le substrat contenait tellement de matière organique que le procédé d'Anammox était instable et le celui classique de nitrification / dénitrification s'est mis en route.

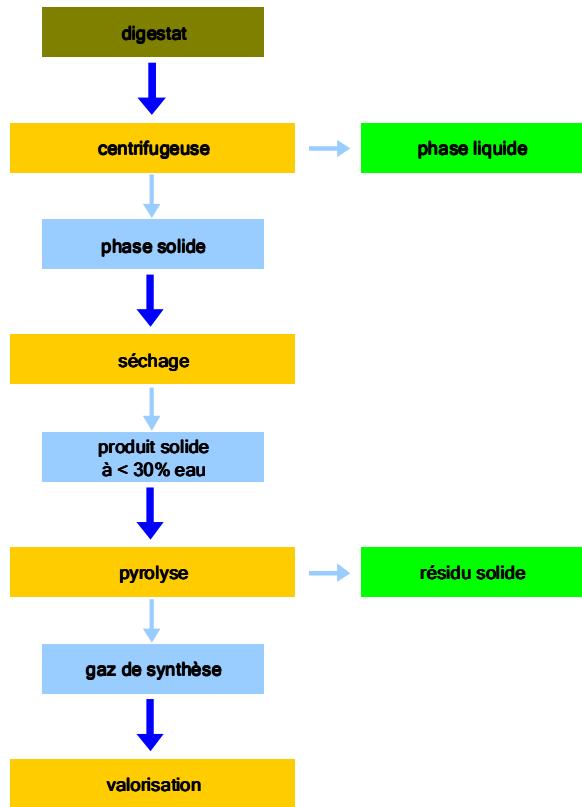


Figure 40: schéma procédé de la pyrolyse

7.10.4 Traitement biologique par un biofiltre en suspension

Ce concept a été élaboré par EREP SA / EPFL [Fruteau]. Le but de ce projet était de tirer parti des nouvelles recherches en matière de traitement biologique de l'azote afin de mettre au point un concept qui permette de limiter les besoins d'aération, la consommation d'une source externe de carbone et de simplifier l'exploitation. Dans tous les cas, la digestion est la partie centrale du traitement pour la production d'énergie renouvelable.

Une étude expérimentale, menée sur l'effluent de l'installation de biogaz de la famille Martin à Puidoux, a été réalisée au Laboratoire de Biotechnologie Environnementale de l'EPFL et a montré que :

- Le processus de nitritation est obtenu avec cet effluent dans un réacteur aérobio.
- Le processus de dénitritation est aussi obtenu dans le réacteur aérobio en utilisant un support mobile fixant la biomasse. Les rendements obtenus sont très élevés : 90% de l'ammonium est transformé et 80% est éliminé sous forme de N₂.
- Le processus Anammox peut également être obtenu, mais est instable et n'est donc pas recommandé.

L'énorme avantage de cette nouvelle méthode est que l'ensemble des réactions se déroulent dans un seul réacteur, sans modifier le fonctionnement du digesteur.

Le bilan d'azote montre que, si la totalité de l'effluent est traité dans le réacteur aérobio, l'élimination de l'azote total initial dans la configuration retenue est de 50%. L'élimination d'une partie seulement de l'azote peut être obtenue en ne traitant qu'une partie de l'effluent. Au niveau du bilan énergétique, le concept n'a pas d'incidence sur la production de biogaz.

Un dimensionnement du réacteur aérobio a été proposé en fonction du débit journalier d'entrée et du temps de résidence hydraulique. Le volume utile du réacteur de nitritation / dénitritation devrait être de 30 m³ pour un digesteur de 400 m³. Le dimensionnement du système d'aération en vraie grandeur ne peut pas être défini précisément à partir de la présente étude, ni la consommation énergétique associée.

La recherche sera continuée sous forme d'un essai sur pilote.

7.10.5 Bioréacteur à membranes

Une technique intéressante est la digestion combinée avec la filtration membranaire [Meier].

La technique de digestion utilisée dans l'agriculture (un fermenteur de type infiniment mélangé) et la masse microbienne anaérobie sort ensemble avec le digestat. L'utilisation de l'ultrafiltration permet de retenir la masse microbienne et de la renvoyer dans le fermenteur. L'avantage est un meilleur développement de la flore microbienne qui engendre un meilleur rendement de fermentation. [Meier] nomme que le rendement dans un bioréacteur à membranes pourrait être proche du double de celui de la fermentation conventionnelle. Cette technique est dans la phase de développement et donc les valeurs indiquées restent indicatives.

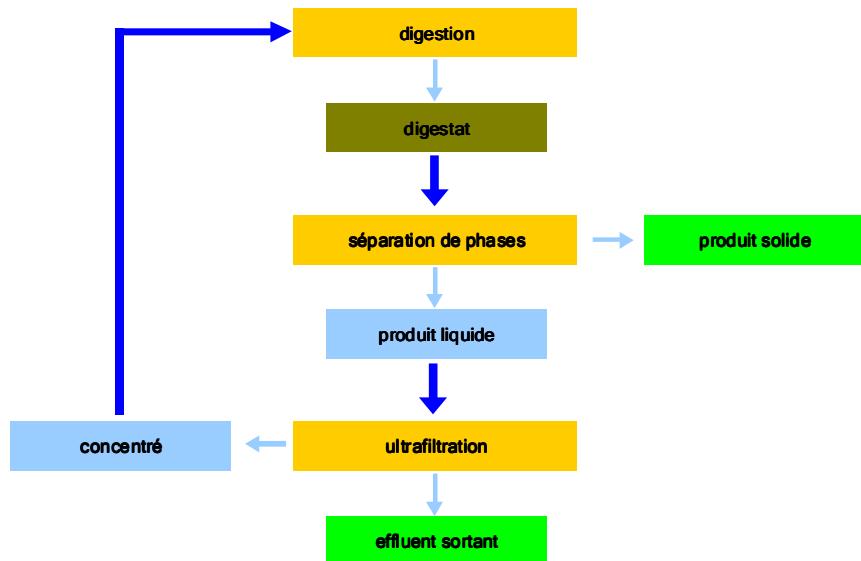


Figure 41: schéma bioréacteur à membranes

7.10.6 Digestaero

L'objectif du projet de recherche DIGESTAERO (Couplage de la DIGESTion anaérobie et d'un procédé AERObie pour le traitement des déjections animales) est de développer une filière de traitement des déjections animales, à la ferme.

Coupler la digestion anaérobie et l'élimination biologique de l'azote permettra de répondre aux contraintes réglementaires vis à vis des excédents d'azote et de valoriser une partie de la matière organique des effluents d'élevage sous forme d'énergie.

Les principales pistes permettant d'optimiser la quantité et la bio-disponibilité de la matière organique pour la production de biogaz et/ou de minimiser les besoins pour la dénitrification sont évaluées : pré-traitement des déjections, shunt des nitrates et utilisation de co-substrats.

Il est coordonné par le Cemagref de Rennes et rassemble également 2 partenaires publics, l'INRA de Narbonne et l'Université de Bretagne Sud, et 2 industriels bretons, Valétec et Odipure.

7.10.7 Traitement biologique extensif filtre à roseau

Un traitement biologique très extensif est celui d'un filtre à roseau, dont un schéma de principe est présenté dans la figure 42.

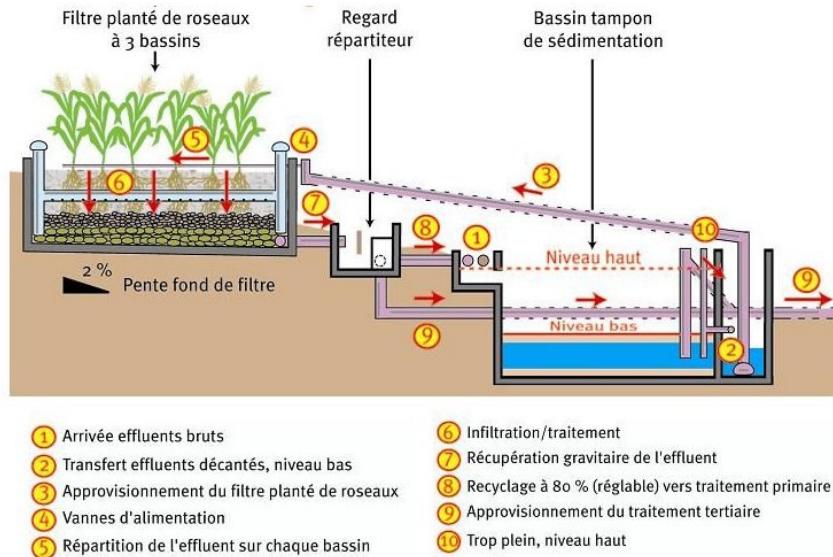


Figure 42: schéma de principe d'un filtre à roseaux

Cette technique est applicable aux effluents peu chargés et donc pas pour les lisiers et les digestats, à cause de leur haute concentrations en azote et sels.

En revanche, elle pourrait être utilisée comme technique de post-traitement, après l'évaporation (voir paragraphe 7.5) ou après le traitement biologique. Par l'application de ce filtre à roseau, la quantité à épandre pourrait être réduite.

7.10.8 Séchage solaire sous serre

Technique commercialisée par entre autre Thermo System et Rödiger BioEnergie (EDZ). Cette technique permet d'utiliser l'énergie solaire pour sécher le digestat. La chaleur excédentaire d'une installation de biogaz peut également être utilisée. Un pré-traitement n'est pas requis. Le schéma de fonctionnement est présenté à la figure 43. La capacité de séchage est environ 3 m^3 d'évaporation d'eau par m^2 par an.

Il y a beaucoup d'expérience pour le séchage des boues de STEP. Thermo System a une référence pour sécher du digestat ; 2'000 t/an de 2% à 80% matière sèche sur une surface de 500 m^2 . Il n'y a pas d'indications sur nécessité traitement de l'air sortant. Il n'y a pas de forte aération, donc moins de volatilisation par rapport aux techniques comme séchage à bandes ou l'évaporation et le strippage.

La consommation électrique est assez élevée et se trouve entre 40 – 50 kWh / t eau évaporée. Les coûts d'investissement estimatifs se situent entre CHF 450,- et CHF 1250,- par m^2 , génie-civil inclus. Une contrainte pour ce système pourrait être le besoin de place.

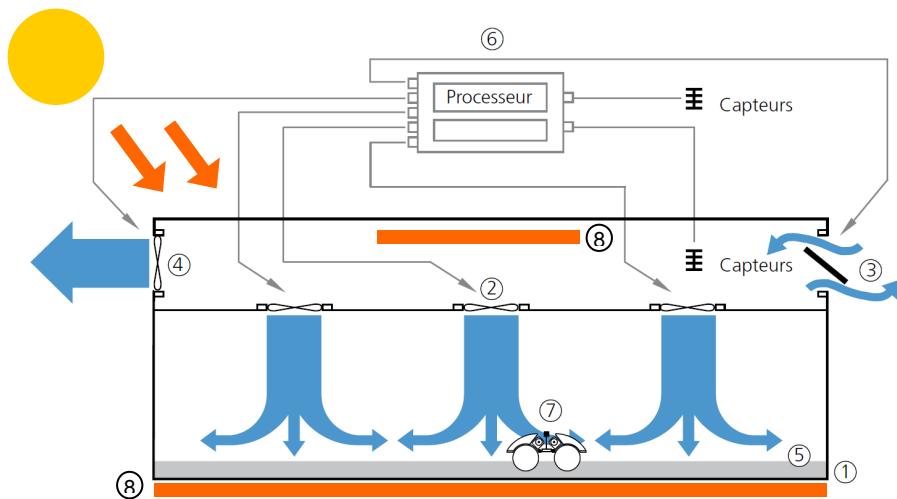


Figure 43: schéma de principe séchage solaire [adapté de Thermo System]

- 1 **Enveloppe du bâtiment :** Une enveloppe fermée, hautement transparente, résistante à la grêle, au vent et aux charges de neige, empêche la circulation d'air incontrôlée et les déperditions de chaleur.
- 2 **Circulation d'air interne :** Des ventilateurs réglés, situés à l'intérieur, assurent à tout moment la vitesse optimale des flux d'air au-dessus des boues, indépendamment des conditions ambiantes.
- 3 **Volets d'aération :** Des volets d'aération pilotés adaptent la circulation d'air aux exigences du séchage.
- 4 **Circulation d'air à l'aide de ventilateurs :** Des ventilateurs modulables assurent l'apport de grands volumes d'air et permettent ainsi l'utilisation du potentiel naturel de séchage de l'air ambiant, indépendamment des vents existants.
- 5 **Digestat**
- 6 **Réglage climatique :** Une commande centrale de réglage et de pilotage traite les données mesurées, règle et contrôle tous les composants, optimisant le processus de séchage en fonction des conditions météorologiques et des caractéristiques des boues.
- 7 **Système de mélange continu du digestat :** des robots de retournement entièrement automatique brassent, retournent et transportent les boues selon l'application.
- 8 **Chauffage additionnel :** Possibilité d'avoir un chauffage additionnel qui permet d'utiliser la chaleur excédentaire du CCF.

7.10.9 Combinaison des différentes techniques

À part des techniques présentées sous forme de méthodes individuelles, toutes les combinaisons de techniques pourraient également être envisagées :

- Strippage à la vapeur avec traitement nanofiltration/ osmose inverse de la phase liquide à faible teneur d'ammoniac. Une installation de ce type est en service à Lathen (D) [Atemis]
- Strippage à vapeur avec séchage thermique dans un sécheur à bandes de la phase liquide à faible teneur d'ammoniac. Une installation de démonstration a été mise en place par la Fachhochschule Münster [Wetter]
- Traitement biologique + traitement effluent par évaporation ou filtre à roseau afin de pouvoir réduire la quantité en effluent à épandre.

8. Analyse

Le but de cette étude est de montrer les méthodes de traitement d'azote du digestat applicables pour une installation de biogaz agricole de taille petite/moyenne, définie dans le chapitre 5.

Les données sur le digestat sortant de notre installation de référence sont récapitulées dans le tableau 8 suivant.

Tableau 8 : récapitulatif caractéristiques du digestat d'une installation de biogaz de taille petite/moyenne

Quantité	2'450	m ³ /an
MS	4.7	%
N tot	5.7	kg/m ³
N sol	3.4	kg/m ³
P	0.8	kg/m ³
K	7.3	kg/m ³

Pour faire cette analyse on a abordé les thèmes suivants :

- Facilité d'opération
- Aspects environnementaux
- Bilan matière
- Coûts de stockage et d'épandage
- Aspects énergétiques
- Valorisation des produits exportés comme engrais
- Analyse économique :
 - Analyse économique de l'installation de biogaz
 - Analyse économique des techniques de traitement de l'azote
- Analyse finale

8.1 Facilité d'opération

Afin d'apprécier la facilité d'opération de la technique pour une application à une échelle d'une exploitation agricole, plusieurs aspects ont été évalués.

Les aspects abordés sont les suivants:

- **Les équipements techniques.** Pompes, brasseurs, l'équipement électrique etc.. Le nombre d'équipements augmente la complexité.
- **La stabilité des procédés.** Est-t-il facile d'arrêter le système, est-ce que le procédé marche seulement dans une plage précise ou est-ce qu'il y a la marge ? Le procédé est-il robuste ?
- **Degré d'automatisation.** Plus la méthode est automatisée, meilleure est sa stabilité et moins de main d'œuvre est nécessaire.
- **Main d'œuvre nécessaire pour l'exploitation.** Temps nécessaire pour le contrôle, mesures, analyses, préparation produits chimiques.
- **Main d'œuvre pour manutention / réparations.** Temps nécessaire pour la manutention et les réparations.
- **Risques par rapport à la sécurité.** Utilisation de produits chimiques.

Chaque méthode de traitement est appréciée entre 1 et 5 pour les aspects mentionnés ci-dessus. Les résultats sont présentés dans le tableau 9 suivant. Un total faible désigne une technique facile à opérer.

Tableau 9 : évaluation multicritère sur la facilité d'opération

Technique	complexité équipement technique	stabilité du procédé	degré d'automatisation	main d'œuvre exploitation	main d'œuvre maintenance / réparations	risques sécurité	TOTAL
	1=peu, 5=beaucoup	1=stable, 5=instable	1=beaucoup, 5=peu	1=peu, 5=beaucoup	1=peu, 5=beaucoup	1=peu, 5=beaucoup	
presse à vis	1	1	1	1	1	2	7
centrifugeuse	2	2	2	2	2	1	11
traitement biologique	2	3	2	3	2	2	14
sécheur à bandes	3	2	3	2	3	2	15
compostage intensif	3	2	3	4	2	2	16
évaporation	4	3	2	3	4	3	19
strippage lavage acide	4	3	2	3	3	4	19
filtration membranaire	5	3	2	3	4	2	19
strippage combustion	5	3	2	3	4	2	19
précipitation de struvite	4	3	2	4	3	4	20

Les 3 techniques les plus simples à l'opération selon notre évaluation multicritères sont : la presse à vis, la centrifugeuse et le traitement biologique, suivi de près par le sécheur à bandes et le compostage. Le traitement biologique est la première technique facile à l'opération qui réduit vraiment le contenu d'azote. Les autres techniques sont évaluées comme assez complexe à l'opération, à savoir : l'évaporation, le strippage, la filtration membranaire, le strippage combustion et la précipitation de struvite.

8.2 Aspects environnementaux

Les émissions venant des différentes méthodes sont comparées par rapport à la situation environnementale de base, qui est l'épandage de la totalité du digestat produit par une rampe à pendillards.

Cette comparaison étant faite de manière qualitative, elle n'est pas basée sur des données détaillées. Le résultat est présenté dans la figure 44 suivante, qui montre donc une indication des émissions par rapport à la situation zéro.

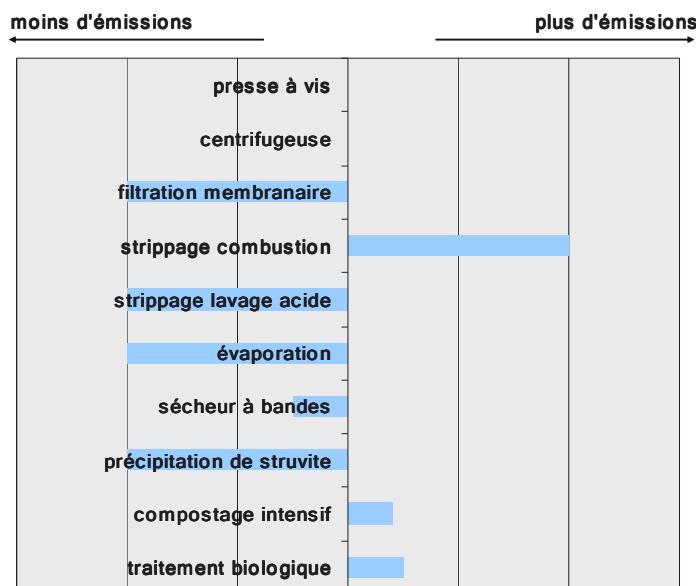


Figure 44: émissions des différentes méthodes relatives à l'épandage par rampe à pendillards de la totalité du digestat non-traité

La presse à vis, la centrifugeuse présentent autant d'émissions que l'épandage. Le sécheur à bandes montre un peu moins d'émissions. La filtration membranaire, le strippage avec lavage acide, l'évaporation et la précipitation struvite, montrent beaucoup moins d'émissions grâce à la grande réduction d'ammonium dans le digestat et également à son immobilisation par baisse du pH (filtration membranaire, évaporation), par formation de sulfate d'ammonium (strippage avec lavage acide) ou une précipitation dans une phase solide (struvite précipitation). Le strippage avec combustion, le compostage et le traitement biologique émettent plus à cause des émissions à l'air de N₂O. Les émissions de N₂O pourraient fortement réduire l'effet positif engendré par la méthanisation sur la réduction des émissions en gaz à effet de serre. Les émissions de N₂O lors le traitement du digestat ont été estimées et comparées avec la réduction en émissions en gaz à effet de serre issus de la production de biogaz.

Selon [Edelmann] la réduction en émissions de CO₂ est de 90.6 t CO₂ par TJ (326 g CO₂ / kWh) électricité produite, sans la valorisation de la chaleur excédentaire produite issue de la production d'électricité dans une unité de couplage chaleur-force.

Le mélange européen de la production de l'électricité en 1997 est de 780 g CO₂ / kWh électricité produite [EEA]. La structure de production était composée de 51.1 % de production thermique classique, de 35.4 % de production nucléaire et de 13.3% de production hydraulique. La production thermique classique est responsable pour 85% des émissions de CO₂. En 2007 la structure était de 56.2% de thermique classique, 29% de nucléaire, de 10.9% d'hydraulique et de 3.7% d'éolien [OFEN].

L'installation modèle de biogaz injecte par année 630'000 kWh d'électricité après l'autoconsommation et produit environ 950'000 kWh d'énergie thermique excédentaire (voir figure 47 à la page 81). Si on valorise environ 50% de la chaleur excédentaire et en remplaçant donc du mazout, au total (production d'électricité et valorisation de la chaleur excédentaire), l'installation de biogaz permettrait de réduire les émissions de CO₂ de 617 t par an quand comparé avec le mix européen.

La méthode de strippage combinée avec la combustion catalytique, dont les émissions de N₂O sont estimées à 6% d'azote traité, émet par an 256 t équivalent CO₂. 41 % de la réduction des émissions en CO₂ est réduite par l'émission de N₂O.

L'émission lors du compostage est calculée à 28 t eq. CO₂, donc 4.5 % de la réduction des émissions et la quantité en équivalents CO₂ émise lors du traitement biologique est estimée à 41 t (6.6% de la réduction des émissions engendrée par la méthanisation).

L'impact du strippage combiné avec la combustion catalytique est assez important. En revanche, les émissions de N₂O engendrées par le compostage et le traitement biologique sont beaucoup plus basses et sont à la limite ou en dessous de 10% de la réduction d'émissions issue de la production de biogaz.

Il s'agit cependant d'une évaluation incertaine basé sur peu de données qui reste encore à valider par la recherche détaillée.

8.3 Bilan matière

Un bilan matière a été élaboré basé sur la répartition des différents fertilisants et la définition du digestat au chapitre 5. Comme expliqué dans le chapitre précédent, une partie des produits sortants sont quand-même destinés à être épandus. Le tableau 10 montre la répartition des produits selon leur but d'application, notamment l'épandage (liquide/solide), l'utilisation comme fertilisant à haute valeur (export) et/ou eau process / d'irrigation.

Tableau 10 : répartition produits sortants du traitement selon but d'application

Technique	épandage liquide	épandage solide	export	eau process / irrigation	Total
	[m ³ /an]	[t/an]	[m ³ /an] ou [t/an]	[m ³ /an]	
épandage liquide	2'450	0	0	0	2'450
presse à vis	1'960	490	0	0	2'450
centrifugeuse	2'280	170	0	0	2'450
filtration membranaire	300	430	430	1'290	2'450
strippage combustion	2'230	170	0	0	2'400
strippage lavage acide	2'280	170	140	0	2'590
évaporation	0	240	690	1'520	2'450
sécheur à bandes	2'080	0	40	0	2'120
précipitation de struvite	2'280	170	150	0	2'600
compostage intensif	2'080	0	180	0	2'270
traitement biologique	2'200	240	0	0	2'450

En regardant les quantités de produit liquide à épandre, on voit que, sauf la filtration membranaire et l'évaporation, elles sont toutes plus ou moins du même ordre de grandeur, ce qui veut dire que les coûts d'épandage ne changent pas fortement. Bien sûr les concentrations, et de ce fait les quantités en fertilisants sont modifiées comme l'indique la figure 45. Elle présente les quantités en N, P et K qui sont toujours épandues, ceci exprimé en pourcentage par rapport à leurs quantités dans le digestat non-traité.

Seule l'évaporation permet de fortement réduire les quantités à épandre. Les autres techniques attaquent plutôt un (toutes les méthodes de strippage et traitement biologique) ou deux composants (filtration membranaire, précipitation de struvite). L'épandage pourrait être restreint par les limites de P et de K.

La précipitation struvite montre un très haut pourcentage en P, parce que l'on ajoute presque 4 fois plus de P que présent dans le digestat.

La méthode d'évaporation permet d'exporter les 3 principaux composants, la filtration membranaire l'azote et le potassium, tandis que la méthode de strippage (sauf combustion) permet d'exporter seulement l'azote.

Le produit solide sortant du sécheur à bandes pourrait être utilisé pour d'autres buts que l'épandage (litière, combustible . .)

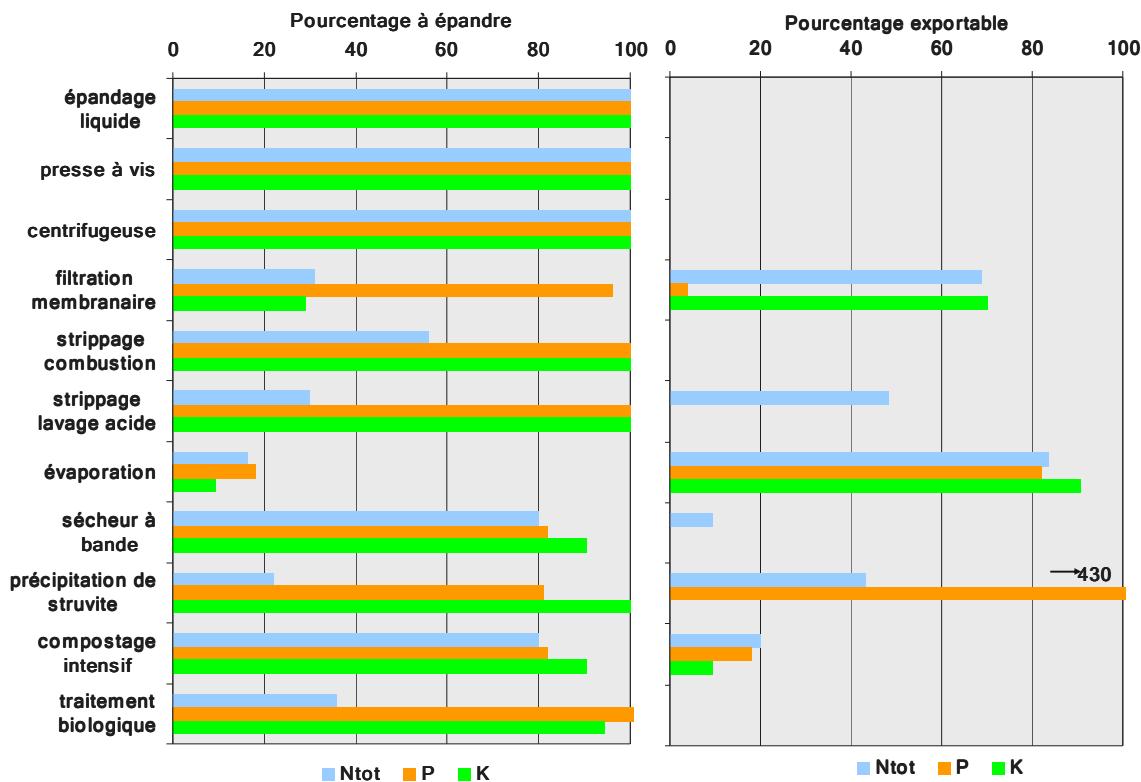


Figure 45 : gauche : pourcentage en composants fertilisants toujours épandu après le traitement du digestat,
droite : le pourcentage en composants pouvant être exporté

8.4 Coûts de stockage et d'épandage

Le stockage nécessaire pour 3.5 mois a été calculé et les coûts totaux du stockage et de l'épandage sont présentés, sur la base des coûts présentés aux paragraphes 3.6 et 3.7, à savoir :

- Frais de stockage liquide : CHF 5.60 / m³ de volume du stockage
- Frais de l'épandage liquide par rampe à pendillards : CHF 5.80 par tonne digestat
- Frais de stockage solide : CHF 5.90 / m² de surface par an (hauteur du tas 2.5 m), donc CHF 2.35 / m³
- Frais de l'épandage par épandeur à deux hérissons verticaux : CHF 12.90 / tonne

Le résultat est présenté dans le tableau 11 suivant.

Tableau 11 : indication des coûts de stockage et d'épandage

Technique	Stockage liquide	Stockage solide	Coûts stockage	Coûts totaux
	[m ³]	[m ²]	[CHF / m ³ digestat]	
épandage liquide	710	0	1.60	7.40
presse à vis	570	60	1.40	8.70
centrifugeuse	660	20	1.60	7.90
filtration membranaire	90	50	0.30	3.30
strippage combustion	650	20	1.50	7.70
strippage lavage acide	660	20	1.60	7.90
évaporation	0	30	0.10	1.40
sécheur à bandes	610	0	1.40	6.30
précipitation de struvite	660	20	1.60	7.90
compostage intensif	610	0	1.40	6.30
traitement biologique	640	30	1.50	8.10

L'épandage engendre plus de frais que le stockage. Seules la filtration membranaire et l'évaporation permettent de réduire fortement les frais. Le compostage et le séchage à bandes permettent aussi de réduire les frais de près de CHF 2.00 / m³.

8.5 Aspects énergétiques

8.5.1 Consommation énergétique

Dans le tableau 12 et la figure 46 sont présentées les consommations en électricité, en chaleur et énergie totale nécessaire pour la production des produits chimiques utilisés, exprimées en kWh par m³ de digestat.

Tableau 12 : consommation énergétique

Technique	Consommation électricité	Consommation chaleur	Consommation énergie produits chimiques
	[kWh / m ³]	[kWh / m ³]	[kWh / m ³]
presso à vis	0.4	0	0
centrifugeuse	7.0	0	0
filtration membranaire	27.0	0	0
strippage combustion	21.0	22	0
strippage lavage acide	11.0	22	0.4
évaporation	7.9	150	0
sécheur à bandes	6.4	120	0.05
précipitation de struvite	8.6	0	4.6
compostage intensif	2.1	0	0
traitement biologique	20.0	0	0

La filtration membranaire, le strippage avec combustion et le traitement biologique montrent les plus grandes consommations d'électricité.

Les méthodes de strippage, mais surtout l'évaporation et le séchage thermique utilisent également de la chaleur. Cette chaleur pourrait être approvisionnée (partiellement) par l'excès en chaleur sortant de l'installation de biogaz. La figure 47 montre une indication sur la valorisation du biogaz produit par notre installation de référence.

Seule la méthode de précipitation de struvite montre une consommation non-négligeable de produits chimiques utilisés dans le processus. Il faut noter que la consommation nécessaire pour la correction du pH (filtration membranaire et évaporation), n'est pas prise en compte, faute de données.

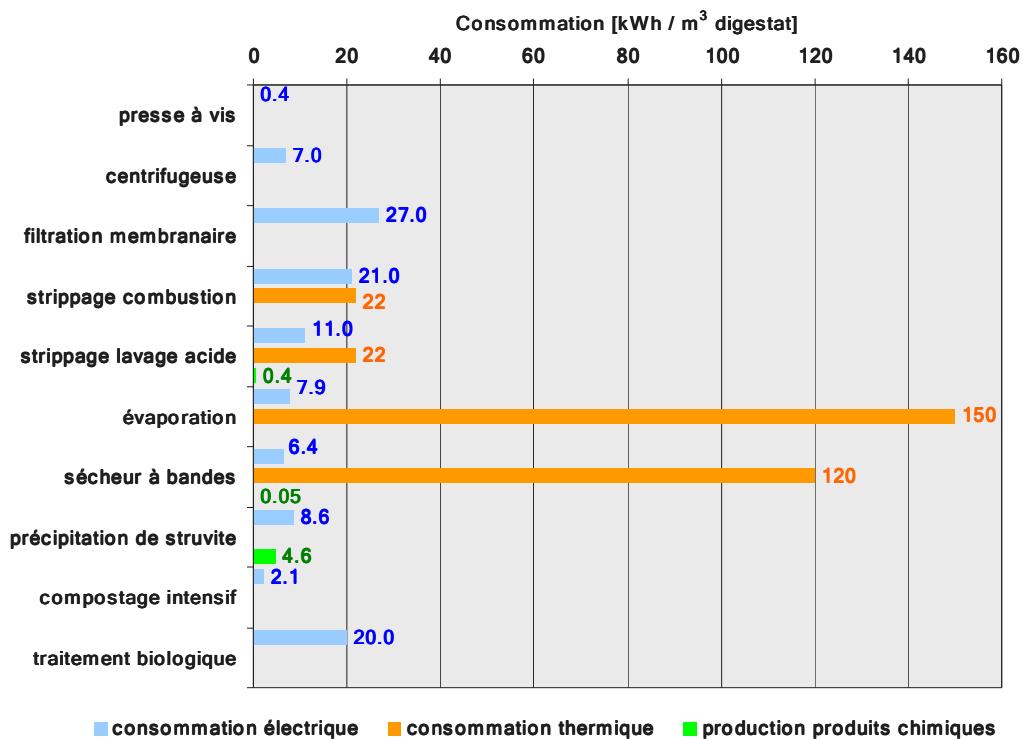


Figure 46 : consommation énergétique

Le bilan énergétique de notre installation de biogaz de référence est le suivant :

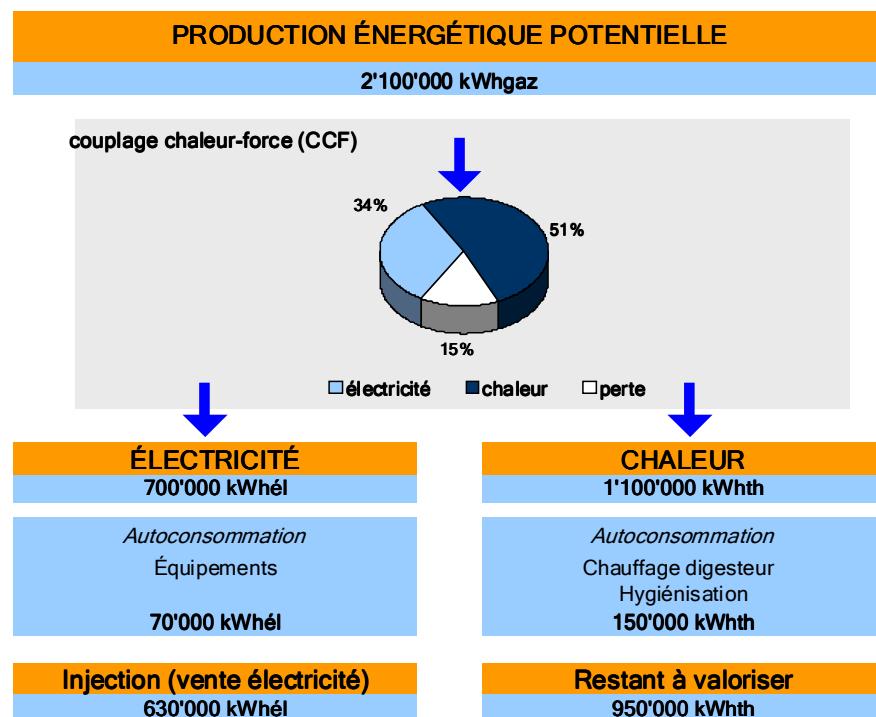


Figure 47: valorisation du biogaz produit par l'installation agricole

Environ 950'000 kWh_{th} sont disponibles en chaleur, donc presque 390 kWh_{th} par tonne digestat.

8.5.2 Substitution énergie pour production des engrais minéraux

Quelques techniques produisent un produit exportable contenant entre autre de l'azote. Ce produit pourrait être utilisé comme substituant des engrais minéraux. La production d'un engrais minéral contenant de l'azote se fait par le procédé de Haber-Bosch où l'azote atmosphérique (N_2) est transformé en NH_3 . Ce procédé est très consommateur d'énergie fossile, notamment 8 kWh / kg N produit [Rafiqui]. Donc les techniques permettant de conserver / concentrer l'azote comme substitut de l'azote minéral remplacent également une partie de cette énergie fossile. La substitution en énergie est montrée dans la figure 48.

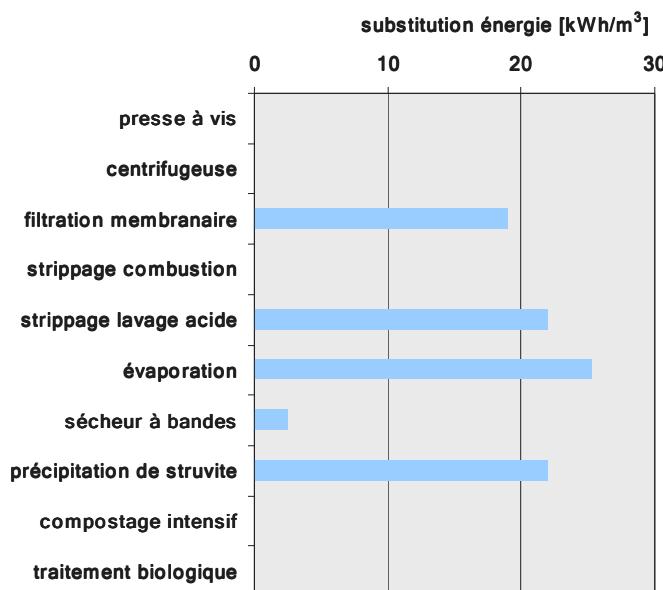


Figure 48: substitution énergie Haber-Bosch

Quatre méthodes montrent une substitution importante, à savoir : la filtration membranaire, le strippage à lavage acide, l'évaporation et la précipitation de struvite.

8.6 Valorisation des produits exportés comme engrais

Le tableau 13 suivant montre les prix des engrais de ferme et des engrais minéraux.

Tableau 13 : définition des prix des engrais normaux et minéraux

Composant	engrais de ferme *	engrais minéral **
	CHF / kg	CHF / kg
N	2.00	5.00
P	5.70	5.70
K	1.80	3.50

* Adapté selon [Bauernzeitung], mai 2008.

** Adapté selon www.agrigate.ch, prix de mai 2009

Le prix pour le phosphore dans l'engrais de ferme a été évalué à CHF 6.90 par tonne, un prix plus élevé que celui de l'engrais minéral. Ce prix était basé sur l'année 2008 au moment où le pétrole coutait très cher. On a pris donc un prix pour le P dans l'engrais de ferme qui égale celui de l'engrais minéral.

On a ensuite défini, sur la base des critères fixés dans l'Oeng (voir § 6.3) à quels types d'engrais pourraient être assimilés les produits des traitements du digestat. Le résultat est montré dans le tableau 14 suivant.

Tableau 14 : calcul de la valeur commerciale des produits exportables du traitement comme engrais de recyclage ou minéral

Technique	Quantité export [t/an]	concentration en %			Type engrais	Valeur commercial [CHF / m ³ digestat]
		N [%]	P [%]	K [%]		
épandage liquide	0	0.0	0.0	0.0	-	
presse à vis	0	0.0	0.0	0.0	-	
centrifugeuse	0	0.0	0.0	0.0	-	
filtration membranaire	430	2.2	0.0	2.9	engrais de recyclage exportable	17.20
strippage combustion	0	0.0	0.0	0.0	-	
strippage lavage acide	140	4.7	0.0	0.0	engrais minéral simple	13.30
évaporation	690	1.7	0.2	2.4	engrais de recyclage exportable	25.30
sécheur à bandes	40	3.2	0.0	0.0	engrais minéral simple	2.60
précipitation de struvite	150	3.9	5.5	0.0	engrais minéral composé	31.00
compostage intensif	180	1.5	0.2	0.9	engrais de recyclage exportable	4.30
traitement biologique	0	0.0	0.0	0.0	-	

Ces prix sont des prix de vente du produit fini. N'y sont pas compris l'emballage et le transport du produit, les contrôles de qualité, les frais des intermédiaires etc. Le résultat reste une indication qui montre de possibles redevances additionnelles.

8.7 Analyse économique

8.7.1 Analyse économique installation biogaz sans traitement digestat.

L'installation de biogaz a été dimensionnée sur la base des entrants définis au chapitre 5, tableau 4. Elle englobe les équipements et services suivants :

- Réception, stockage et préparation
- Équipements de dosage / alimentation digesteur
- Méthanisation
- Unité de couplage chaleur force d'une puissance électrique de 100 kW_{el}
- Commande
- Bâtiments
- Travaux génie-civil et raccordement électrique
- Ingénierie, montage, mise en service, divers et imprévus

Au total les coûts d'investissement d'une installation de biogaz sont estimés à CHF 970'000,-.

Le tableau 15 suivant montre le résultat de l'analyse économique :

Tableau 15 : analyse économique installation de biogaz agricole

[A] FRAIS D'EXPLOITATION		
Personnel	. Gestion installation	15'600.-
	. Gestion coproduits	13'000.-
Réparations/Entretien	. Équipements	5'900.-
	. Gros-œuvre	4'500.-
	. Cogénération	17'900.-
Consommables, analyses, contrôles		1'900.-
Électricité (0.185 CHF / kWh)		13'000.-
Gestion des digestats (frais d'épandage)		0.-
Transport des (co)produits		0.-
Manutention des (co)produits (coûts chargeuse)		0.-
Assurances		4'900.-
Total frais d'exploitation [A]		76'700.-
[B] FRAIS FINANCIERS		
Intérêts et amortissements	. Équipements	46'000.-
	. Gros-œuvre	35'800.-
	. Cogénération	52'300.-
Total frais financiers [B]		134'100.-
[C] Recettes		
Vente électricité (0.394 CHF / kWh)		282'800.-
Vente chaleur		0.-
Traitement et transport des coproduits		0.-
Transport des (co)produits		0.-
Total recettes [C]		282'800.-

Dans cette analyse ne sont pas pris en compte les frais de transport des co-substrats, ni les redevances pour leur traitement, ni la vente de chaleur.

Au total le résultat net (C – B – A) est positif de CHF 72'000,-. Ce montant est évalué sans désapprovisionnement du digestat ni stockage. Si on utilise ce montant pour financer le stockage, traitement et épandage du digestat, le montant par m³ de digestat s'élève à CHF 29.40.

8.7.2 Analyse économique des techniques de traitement

À la figure 49 sont présentés : les frais d'épandage (fraction liquide par rampe pendillards et fraction solide par épandeur à fumier à deux hérissons verticaux) ainsi que les frais financiers concernant le stockage de ces fractions liquide / solide pour une période de 3.5 mois. Sont également présentés les frais de traitement (frais financier, frais d'exploitation) et les redevances de la vente des fertilisants exportés.

Les techniques rentables sont la presse à vis, la centrifugation et le compostage intensif, suivi de près par le sécheur à bandes, l'évaporation, et le traitement biologique. Avec la vente des produits exportés, l'évaporation, le compostage, la struvite précipitation seraient possibles. Le sécheur à bandes n'est juste pas envisageable. Concernant celui-ci il faut noter que le produit solide du sécheur à également une valeur commerciale qui n'est pas prise en compte. Le traitement biologique et la filtration membranaire ne le seraient toujours pas. Il faut noter que les frais de chaleur ne sont pas pris en compte et seules les redevances estimées des produits exportés sont présentées, sans leurs charges.

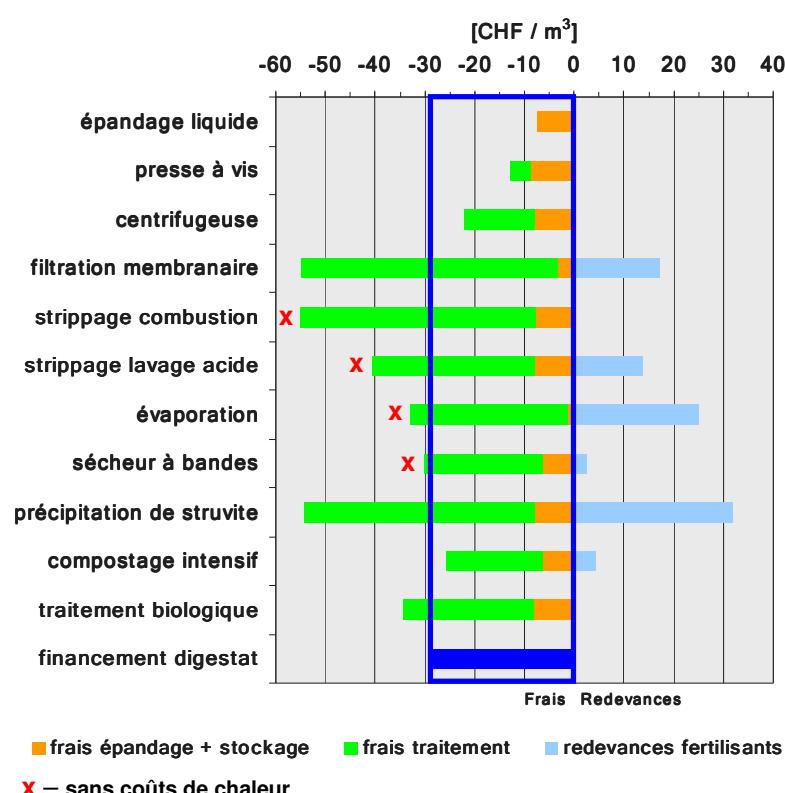


Figure 49: frais d'épandage et de stockage, frais de traitement et redevances de vente des fertilisants exporté.
Le cadre montre la limite financable par l'installation de biogaz

8.8 Analyse finale

8.8.1 Analyse générale des méthodes de traitement

Les méthodes qui permettent de réduire fortement le contenu d'azote (plus de 50%) sont la filtration membranaire, le strippage avec lavage acide, l'évaporation, la précipitation struvite et le traitement biologique.

Quatre méthodes permettent de bien conserver l'azote, à savoir la filtration membranaire, le strippage avec lavage acide, l'évaporation et la précipitation struvite. L'azote est concentré et pourrait être utilisé pour remplacer l'azote minéral créé par le processus de Haber-Bosch. Cette substitution permet de réduire l'énergie fossile nécessaire pour ce processus entre 19 et 25 kWh / m³ digestat.

Les méthodes avec lavage acide de l'air permettent de produire un engrais minéral simple ou composé. La filtration membranaire et l'évaporation produisent un concentré organo-minéral, qui reste selon l'Oeng un engrais de recyclage. Seul le compostage et le sécheur à bandes permettraient de produire un amendement.

La précipitation struvite permet de produire un engrais minéral mais le rapport N/P n'est pas très favorable à une grande utilisation et donc cette méthode n'est pas vraiment en développement pour le traitement des lisiers ou des digestats.

Même si l'azote est bien réduit, les quantités toujours épandables et les volumes de stockage nécessaires ne changent guère par rapport à l'épandage du digestat non-traité. Seules l'évaporation et la filtration membranaire permettent de réduire significativement la quantité épandable ainsi que son stockage.

En termes de consommation d'énergie la filtration membranaire, le strippage combustion et le traitement biologique sont demandeurs ; l'évaporation et le sécheur à bandes sont gourmands en énergie thermique. Une partie ou la totalité de l'énergie thermique pourrait être fournie par la chaleur excédentaire venant du couplage chaleur-force de l'installation de biogaz. Ceci permettrait également d'utiliser cette chaleur qui serait autrement inutilisée.

Au vu des grandes quantités de chaleur nécessaires pour le séchage à bandes et le faible rendement par rapport au traitement d'azote, le but envisagé du traitement, il est préférable d'utiliser ce système pour le séchage d'autres produits, comme les copeaux de bois, cultures etc.

L'énergie nécessaire pour fabriquer les produits chimiques utilisés dans les différents procédés est, sauf pour le traitement par précipitation de struvite, négligeable par rapport à la consommation en électricité et chaleur.

L'effet positif de la méthanisation sur les émissions de gaz à effet de serre pourrait être réduit fortement à cause des émissions de protoxyde d'azote. Une estimation de ces émissions en relation avec la réduction engendrée par la production de biogaz montrait que la méthode de strippage-combustion est faisable seulement si l'émission de N₂O peut être réduite significativement. Les émissions en équivalents de CO₂ lors du traitement biologique (procédés d'oxydation biologique de l'ammonium pendant le compostage ou la nitrification) ne sont pas encore connues suffisamment pour permettre une conclusion fondée. Il s'agit cependant d'une évaluation qui reste à valider par des données détaillées.

À part les méthodes décrites il y a également un développement de variantes, telles que celles présentées au paragraphe 7.10.7 Le procédé Anastrip permet de faire du strippage sans utilisation des produits chimiques, délicats à manipuler, et le séchage thermique dans une serre permettrait, comme l'évaporation, de réduire le contenu en eau.

Des nouvelles variantes sur le traitement biologique sont en développement, comme Anammox et le biofiltre en suspension, qui pourraient permettre de réduire les émissions de N₂O, la consommation énergétique et les coûts d'investissement afin de devenir attractif pour une application à petite échelle. Des premiers tests avec Anammox montrent que cette technique n'est pas bien applicable sur les effluents concentrés. Un traitement par filtre à roseaux n'est également applicable que sur les effluents dilués. Ces deux techniques pourraient être intéressantes pour un post-traitement.

8.8.2 Installation de biogaz de taille petite/moyenne

Une installation de taille petite/moyenne typique pour la Suisse est d'une puissance électrique d'environ 100 kW_{el}.

Une installation de référence a été dimensionnée traitant du lisier bovin, des lavures, des huiles, des déchets de boulangerie, du marc de café et des déchets de céréales. La production annuelle de digestat se monte à 2'450 tonnes, à un contenu d'azote total de 5.7 kg/m³ et de 3.4 kg/m³ d'azote soluble (principalement l'ammonium).

Si l'on considère la simplicité de la technique pour une application à une exploitation agricole, la presse à vis, la centrifugeuse et le traitement biologique sont les trois les plus évidentes ; la dernière étant la seule à vraiment réduire le contenu d'azote dans le digestat.

L'analyse économique et la comparaison entre les techniques est sommaire, car on s'est basé sur de nombreuses estimations. L'analyse économique de notre installation de référence montre un somme utilisable pour le financement du stockage, traitement et épandage du digestat de CHF 25.10 par m³ de digestat.

En regardant les frais de stockage, de traitement et d'épandage, les techniques rentables sont la presse à vis, la centrifugation et le compostage.

En prenant compte des frais finaux (frais techniques, stockage /épandage et redevance vente produit exporté) les techniques de strippage à lavage acide, évaporation et précipitation de struvite pourraient également devenir rentables. La filtration membranaire, le strippage avec combustion et le traitement biologique ne sont économiquement pas faisables.

Au niveau de l'analyse économique il faut noter que l'échelle de notre installation est assez petite et beaucoup des techniques considérées montrent une rentabilité à partir de 10'000 tonnes par an ou plus pour une installation de biogaz. Ces techniques complexes sont bien applicables pour des installations de taille industrielle.

La première technique assez facile à opérer à notre échelle définie pour la réduction du contenu en azote est le traitement biologique. Pour cette méthode il existe une grande variété de techniques. C'est une technique de traitement qui est déjà très bien en place pour le traitement des lisiers et donc c'est une méthode fiable. Des nouvelles variantes sur le traitement biologique sont en développement, comme Anammox et le biofiltre en suspension, qui pourraient permettre de réduire les émissions de N₂O, la consommation énergétique et les coûts d'investissement afin de devenir attractif pour une application à échelle de notre installation de référence.

Selon [Meier], le strippage n'est pas utilisable à l'échelle d'une exploitation agricole. Ceci surtout à cause de l'utilisation des produits chimiques (alcalis, acides), qui demande une opération professionnelle.

Il existe également des possibilités d'avoir des installations mobiles, telles que le strippage combustion et le strippage avec lavage acide. Les installations mobiles permettent de bien réduire les coûts de traitement pour traiter des petites quantités.

8.8.3 Installation de biogaz de grande capacité

Les techniques de traitement du digestat les plus positives par rapport à la réduction des émissions à l'épandage du digestat non-traité, sont celles qui ne s'avèrent pas rentables pour une installation de biogaz de taille petite/moyenne (la filtration membranaire, le strippage avec lavage acide, l'évaporation, la précipitation de struvite).

Les traitements précités engendrent une conservation / concentration de l'azote et permettent donc une exportation de celui-ci vers les régions en demande. De cette façon l'azote issu d'un traitement de digestat peut remplacer celui des engrains minéraux.

Bibliographie

- Agridea**, Mémento Agricole 2009
- AgroEnergien**, www.AgroEnergien.de
- Atemis AG**, différentes informations, www.atemis.net
- Bauermeister**, Stickstoffentfernung aus Gärückständen mit dem ANAstrip-Verfahren, présentation.
- Bauermeister**, Treatment of Digested Substrates for Nitrogen Removal and Emission Decrease, Use of bioenergy in the baltic sea region - proceedings of the 2nd IBBC 2006, Stralsund, Germany
- Böhler M.**, Möglichkeiten und Potential der Stickstoffrückgewinnung auf Kläranlagen mittels Stripping
- Cercl'Air**, Réduction des émissions d'ammoniac provenant de l'agriculture – Bases relatives à la protection de l'air, 2002
- Coillard Jean**, Différents modes de traitement de l'azote dans les effluent concentrés, cas des effluents d'élevage. Application au lisier de porc, actes du colloque Cemagref, 1996.
- Colsen BV**, Info site internet
- Compost Magazine**, Kompostforum Schweiz in Zusammenarbeit mit IGA und VKS-ASIC, 1/2008
- Darbellay**, le rencherissement de l'azote justifie la réduction des pertes d'ammoniac, article dans l'Agri du 6 mars 2009.
- Dégremont**, Mémento technique de l'eau, dixième édition, 2005
- Döhler**, Umweltverträgliche Gülleaufbereitung und – verwertung, KTBL Arbeitspapier 272, 1999
- A3 Watersolutions GmbH**, données reçues BGA Musterprojekt
- Dorset**, www.dorset.nu
- Edelmann**, Ökobilanz der Stromgewinnung aus landwirtschaftlichem Biogas, projet 35408 OFEN, 2001
- Eder B.**, Schulz H, Biogas Praxis, 2006
- EEA**, Greenhouse gas emission trends and projects in Europe 2008, European Environment Agency, 2008
- EEA**, Carbon intensity of conventional thermal electricity generation, EU15, 1990 and 1997, Indicator Fact Sheet Signals 2001
- EFMA**, Best Available Techniques for Pollution Prevention and Control in the European Fertilizer Industry, Booklet no. 4 of 8, Production of phosphoric acid, 2000
- Engeli**, Schweizerische Statistik erneuerbarer Energieträger - Teilstatistik Biogas 2004, OFEN, 2005
- Farinet** Jean-Luc, Macsizut: un modèle d'aide au choix de techniques de traitement des lisiers de porc, actes du séminaire, juins 2002, Montpellier, France
- Fruteau et al.**, Développement d'un concept combiné de production de biogaz et d'élimination de l'ammoniac appliqué aux effluents agricoles, OFEN, 2008.
- GEA**, information sur l'évaporation.
- Grömping M.**, Stickstoffrückbelastung – stand der Technik 2003, Erweiterter Tagungsband zur 5. Aachener Tagung, 2003
- Grülich**, Möglichkeiten zur weiteren Aufbereitung der Gärrest-Flüssigphase, présentation système IMB+Frings Watersystems GmbH, 2005
- HAASE**, site internet www.haase.de
- Hersener**, Ammoniakemissionen aus Gülle und deren Minderungsmassnahmen unter besonderer Berücksichtigung der Vergärung, Amt für Umweltschutz Kanton Luzern et OFEN, 2002
- Hersener**, Membranevaluation zur Vergärung von Gülle im Membranreaktor (UF Membran), OFEN 2003
- IBBK**, international biogas cours, Stuttgart 2008
- INRA**, Colloque sur la méthanisation en milieu rural, 2008 Rennes
- Jetten**, The microbial nitrogen cycle, Environmental Biology, 10(11), 2903-2909, 2008
- Kaufman**, Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien – Ausgabe 2007, OFEN, 2008
- KTBL**, Faustzahlen biogas, 2007

- KTBL**, Umweltverträgliche Gülleaufbereitung und- verwertung, Zusammenfassung der Ergebnisse und vergleichende Bewertung, 1999
- LEA Oststeiermark**, Möglichkeiten der Gärrestbehandlung von Biogasanlagen « Technologie-Screening », juin 2007
- Lemmens**, Beste Beschikbare Technieken (BBT) voor mestwerking, 3ième édition, décembre 2006
- Lootsma**, Aktuelle Verfahren zur Aufbereitung und Verwertung von Gärresten, 2008
- Maurer M.**, Nutrients in urine: energetic aspects of removal and recovery, Water Science and Technology, Vol 48 No 1 pp 37-46, 2003
- Meier**, Abklärung zu den Eigenschaften von Düngerprodukten aus der Gülleaufbereitung, 2008, OFAG
- OFAG**, Agrarbericht 2007, BBL Vertrieb Publikationen, 3003 Bern, 2007
- OFEFP**, Les polluants atmosphériques azotés en Suisse, Cahier de l'environnement n°384, 2008
- OFEN**, Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990-2007, 2009
- OFEN**, Statistique Suisse de l'électricité 2008
- OFEV** (1), Treibhausinventar, Entwicklung der Emissionen seit 1990 pro Gas, document Excel, 2008
- OFEV** (2), Haro sur l'ammoniac, Revue ENVIRONNEMENT Dossier Agriculture, p29 à 33.
- OFS**, Agriculture suisse, Statistique de poche 2009
- Plusieurs**, Stickstoff- Entfernung aus dem Schlammwasser von Kläranlagen, Schriftenreihe Umwelt Nr 195, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), 1993
- PROBAS**, site internet www.probas.umweltbundesamt.de
- Rafiqul I.**, Weber C., Lehmann B., Voss A., Energy efficiency improvements in ammonia production - perspectives and uncertainties, Energy 30: p 2487 – 2504, 2005
- Rautenbach R** et autres, Zum Einsatz von Kalkmilch un Natonlauge in der Abwassertechnik – Versuch einer umfassenden ökologisch/ökonomischen Bewertung, 2. Tagung des Europäischen Kalkverbands, Köln, 23.-24. Oktober 1996
- Réussir Porcs**, article sur le procédé Balcopure, 2003
- Revue Suisse d'agriculture**, DBF-GCH 2009 Données de base pour la fumure des grandes cultures et des herbages, janvier-février 2009 – Vol. 41 – N°1
- Schweizerische Statistik erneuerbare Energieträger**, Teilstatistik Biogas 2004, 2008
- Sommerhalder M** et autres, Wirtschaftlichkeit von heutigen Biomasse-Energieanlagen, OFEN, mai 2007
- Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon ART**, coûts machines 2008
- Szanto**, et autres, NH₃, N₂O and CH₄ emissions during passively aerated composting of straw-rich pig manure, Bioresource Technology, vol 98, n°14, p 2659-2670, 2007
- Technische Universität München**, Prozessabwasser aus der Biogabfallvergärung, 28. Abwassertechnisches Seminar, 19. Mülltechnisches Seminar, 1999
- Teffene**, Les stations de traitement des effluents porcins, estimation des coûts et conséquences économiques, techniporc vol. 25 n°4, 2002
- Plusiers**, Wirtschaftlichkeit von heutigen Biomasse-Energieanlagen, OFEN 2007
- Wetter**, Neue Aspekte für die Gärrestbehandlung, forum.new power.
- WUR Wageningen**, Quick scan van be- en verwerkingstechnieken voor dierlijke mest, 2004

Liste d'abréviations

CCF	Couplage chaleur-force
RPC	Rétribution à prix coutant
DCO	Demande chimique d'oxygène
LEaux	Loi sur la protection des eaux
MAP	Magnésium-ammonium-phosphate (précipitation)
MF	Matière fraîche
MS	Matière sèche
NDN	Nitrification / denitrification
OEaux	Ordinance sur la protection des eaux
OEng	Ordinance sur la mise en circulation des engrains
OPair	Ordinance sur la protection de l'air
ORRChim	Ordinance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques
UF	Ultrafiltration
UGBF	Unité de Gros Bétail de Fumure

Liste de figures et tableaux

Figure 1: répartition des composants fertilisants dans le digestat liquide et solide [adapté IBBK]	15
Figure 2: cycle de l'azote à l'échelle d'une parcelle [Revue Suisse d'Agirculture, adapté selon Jetten]	17
Figure 3: répartition entre ammonium (liquide) et ammoniac (gaz) en relation avec le pH	18
Figure 4: relation production de biogaz et la température [Eder]	19
Figure 5: rampe à pendillards [source Joskin].....	20
Figure 6: épandeur de fumier à deux hérissons verticaux [source Joskin].....	21
Figure 7: Emissions d'ammoniac en 2000, OFEFP	24
Figure 8: Evolution des émissions de N ₂ O provenant de l'agriculture en Suisse de 1990 à 2007 [OFEN]	25
Figure 9: Bilan entre les entrants et les sortants d'azote sur les terres agricoles pour l'année 2007 [OFS].....	25
Figure 10: Évolution des installations de méthanisation agricole avec couplage-chaleur-force	28
Figure 11: Bilan matière de la digestion.....	29
Figure 12: vue des techniques de traitement du digestat [adapté de Lemmens].....	33
Figure 13: exemple schéma procédé.....	34
Figure 14: (schéma de) la presse à vis [Bauer].....	36
Figure 15: schéma du procédé de la centrifugation	38
Figure 16: schéma de principe d'une décanteuse continue à bol cylindro-conique d'axe horizontal	38
Figure 17: types de filtration membranaire et la limite de séparation des différents composants	40
Figure 18: schéma d'un procédé de traitement membranaire.....	41
Figure 19: tamis vibrant [source SWECO]	41
Figure 20: procédé de filtration membranaire selon IMB+Frings	42
Figure 21: principe colonne de strippage	44
Figure 22: schéma strippage à air.....	45
Figure 23: schéma strippage à vapeur.....	46
Figure 24: schéma strippage et combustion catalytique (procédé Smelox)	47
Figure 25: l'installation mobile de SMELOX.....	47
Figure 26: schéma strippage avec lavage acide	49
Figure 27: schéma du procédé d'évaporation	51
Figure 28: installation d'évaporation de 108'000 t/an pour le traitement du lisier porcin digéré [Wiegand]	54
Figure 29: principe du séchage à bandes	55
Figure 30: sécheur à bandes [source Stela]	55
Figure 31: schéma séchage à bandes avec prétraitement par presse à vis	56
Figure 32: sécheur à bandes dans un conteneur de 12m [source : Ceres-sepatherm].....	57
Figure 33: schéma précipitation de struvite	59
Figure 34: courbe d'évolution de la température pendant le compostage.....	61
Figure 35: schéma compostage extensif	62
Figure 36: schéma compostage intensif	62
Figure 37: schéma traitement biologique	66

Figure 38: traitement biologique à cultures libres, système continu avec clarification	66
Figure 39: schéma strippage et lavage avec gypse (procédé Anastrip).....	68
Figure 40: schéma procédé de la pyrolyse	70
Figure 41: schéma bioréacteur à membranes.....	71
Figure 42: schéma de principe d'un filtre à roseaux.....	72
Figure 43: schéma de principe séchage solaire [adapté de Thermo System].....	73
Figure 44: émissions des différentes méthodes relatives à l'épandage par rampe à pendillards de la totalité du digestat non-traité	75
Figure 45 : gauche : pourcentage en composants fertilisants toujours épandu après le traitement du digestat, droite : le pourcentage en composants pouvant être exporté	78
Figure 46 : consommation énergétique.....	80
Figure 47: valorisation du biogaz produit par l'installation agricole	80
Figure 48: substitution énergie Haber-Bosch.....	81
Figure 49: frais d'épandage et de stockage, frais de traitement et redevances de vente des fertilisants exporté. Le cadre montre la limite financable par l'installation de biogaz	84
 Tableau 1 : Exigences sur les concentrations maximales en ammonium et nitrate, selon l'OEAux. Le nitrite est réglementé seulement dans les décharges (< 0.3 mg NO ₂ - N /l)	23
Tableau 2 : Définition des zones de protection des eaux particulièrement menacées et souterraines	23
Tableau 3 : installation de biogaz agricole de taille moyenne suisse	28
Tableau 4 : gisement des effluents d'élevage et des cosubstrats	29
Tableau 5 : qualité du digestat sortant de la méthanisation et du lisier.....	30
Tableau 6 : consommation et production strippage à vapeur et à air [Grömping].....	46
Tableau 7 : types de traitement biologique existants	65
Tableau 8 : récapitulatif caractéristiques du digestat d'une installation de biogaz de taille petite/moyenne	74
Tableau 9 : évaluation multicritère sur la facilité d'opération.....	75
Tableau 10 : répartition produits sortants du traitement selon but d'application	77
Tableau 11 : indication des coûts de stockage et d'épandage.....	78
Tableau 12 : consommation énergétique.....	79
Tableau 13 : définition des prix des engrains normaux et minéraux	81
Tableau 14 : calcul de la valeur commerciale des produits exportables du traitement comme engrais de recyclage ou minéral	82
Tableau 15 : analyse économique installation de biogaz agricole	83