



Livrables 2.1, 2.2, 2.3, 3.1

Etat de l'art des digestats et de leurs procédés de post-traitement

Projet ANR- 10 – BIOE – 007

DIVA

Rapport Final



Suivi du dossier :

- Solagro : Sylvaine BERGER
75 voie du TOEC - CS 27608
31076 TOULOUSE CEDEX 3



Sommaire

| | |
|---|-----------|
| 1. Objectif et méthode | 5 |
| 2. Etat des lieux sur la production et la valorisation du digestat | 5 |
| 2.1 Etat des lieux en France | 5 |
| 2.1.1 Méthanisation à la ferme | 5 |
| 2.1.2 Méthanisation de déchets : biodéchets et OMR | 7 |
| 2.1.3 Méthanisation territoriale | 8 |
| 2.2 Etat des programmes en cours sur les digestats en France | 12 |
| 3. Digestat et réglementation | 13 |
| 3.1 Logique Déchets | 13 |
| 3.2 Logique Produit..... | 15 |
| 3.2.1 Cadre réglementaire français | 15 |
| 3.2.2 La directive 2008/98/CE – End of Waste : vers un règlement européen pour les composts et digestats | 18 |
| 3.3 Agriculture Biologique | 19 |
| 4. La composition des différents digestats (étude bibliographique) | 21 |
| 4.1 Valeur agronomique et NPK | 22 |
| 4.1.1 Les caractéristiques des digestats..... | 22 |
| 4.1.2 Les conseils d'utilisation du digestat..... | 29 |
| 4.1.3 Valeur fertilisante azotée | 30 |
| 4.1.4 Potassium | 34 |
| 4.1.5 Phosphore | 34 |
| 4.1.6 Humus, C/N, stabilité du digestat | 36 |
| 4.1.7 Effet sur les propriétés biologiques du sol | 38 |
| 4.1.8 Effet sur les propriétés physiques du sol | 39 |
| 4.2 Emissions à l'atmosphère | 39 |
| 4.2.1 Volatilisation de l'azote | 39 |
| 4.2.2 Odeurs | 40 |
| 4.3 Innocuité | 40 |
| 4.3.1 Pathogènes et indicateurs fécaux..... | 40 |
| 4.3.2 Hormones et antibiotiques | 44 |
| 4.3.3 Pesticides | 44 |
| 4.3.4 Eléments traces métalliques..... | 44 |
| 4.3.5 Polluants organiques | 45 |
| 5. Résultats d'essais aux champs | 46 |
| 5.1 Résultats bibliographiques | 46 |
| 5.1.1 Résultats généraux issus de la synthèse ADEME/RITTMO 2011 | 46 |
| 5.1.2 Autres programmes | 46 |
| 5.2 Expérimentations aux champs en France | 47 |
| 5.2.1 GAEC Beets | 47 |
| 5.2.2 Agriculteur AAMF..... | 47 |
| 5.2.3 Essais réalisés par Méthanéo..... | 49 |
| 5.2.4 Chambre d'agriculture de Bretagne..... | 51 |

| | |
|--|-----------|
| 6. Post-traitement des digestats | 53 |
| 6.1 Séparation de phase | 53 |
| 6.1.1 Objectif et paramètres | 53 |
| 6.1.2 Type d'équipements et performances | 53 |
| 6.1.3 Verrous | 55 |
| 6.2 Séchage | 57 |
| 6.2.1 Objectif et paramètres | 57 |
| 6.2.2 Type d'équipements et performances | 57 |
| 6.2.3 Verrous | 59 |
| 6.3 Compostage | 59 |
| 6.3.1 Objectifs et paramètres | 59 |
| 6.3.2 Type d'équipements et performances | 59 |
| 6.3.3 Verrous | 60 |
| 6.4 Filtration membranaire | 61 |
| 6.4.1 Objectifs et paramètres | 61 |
| 6.4.2 Types d'équipements et performances | 61 |
| 6.4.3 Verrous | 63 |
| 6.1 Evaporation - Stripping | 63 |
| 6.1.1 Objectifs et paramètres | 63 |
| 6.1.2 Type d'équipements et performances | 63 |
| 6.1.3 Verrous | 63 |
| 6.2 Stripping | 65 |
| 6.2.1 Objectifs et paramètres | 65 |
| 6.2.2 Type d'équipements et performances | 66 |
| 6.2.3 Verrous | 67 |
| 6.3 Autres procédés combinés | 67 |
| 6.3.1 Anastrip : basé sur du stripping | 67 |
| 6.3.2 Enoferti d'Akaneo basé sur de l'évaporation et du compostage | 67 |
| 7. Conclusions | 69 |

1. Objectif et méthode

Dans le cadre du programme de recherche DIVA, ce livrable en début de programme a pour vocation d'actualiser les données nationales d'inventaire des procédés de méthanisation, de caractérisation des digestats et d'identification des filières de post-traitement.

A partir des données bibliographiques et de retours d'expériences des installations de méthanisation, ce livrable doit permettre l'identification des freins actuels à la valorisation des digestats afin de donner aux équipes de recherche qui participent au projet une vision de terrain et l'état des données manquant à la compréhension et à la mise en œuvre des procédés.

La synthèse de la bibliographie est limitée à la digestion anaérobie des substrats concernés par le programme, c'est-à-dire les substrats provenant de l'agriculture (déjections, biomasse) et des déchets ménagers (ordures ménagères résiduelles et biodéchets). La digestion anaérobie des boues de station d'épuration n'est pas dans le scope de DIVA.

2. Etat des lieux sur la production et la valorisation du digestat

2.1 Etat des lieux en France

En France, le développement de la méthanisation est beaucoup plus restreint que dans d'autres pays européens malgré un gisement de matière organique évalué à 15 millions de tonnes de déchets pour le secteur agroalimentaire (ADEME-Gaz de France, 2004), 50 millions de tonnes de déchets municipaux (dont seulement 10% sont actuellement traités par voie biologique –ADEME 2008) et environ 157 millions de tonnes de déjections animales sous forme solide pour le secteur agricole (Lessirard et Quevremont, 2008). L'application la plus courante de la méthanisation concerne le traitement des boues urbaines mais de nouveaux sites de traitement sont en construction/démarrage (une dizaine) ou à l'étude (une centaine) dans le domaine des déchets ménagers et le monde agricole (ASTEEL, 2006).

2.1.1 Méthanisation à la ferme

Fin 2010, 30 unités de méthanisation individuelle à la ferme sont en fonctionnement, avec une moyenne de 60 000 t MB/an d'effluent et/ou déchets en entrée de digestion, variant de 2000 à 15 000 t/an selon les sites (Figure 1).

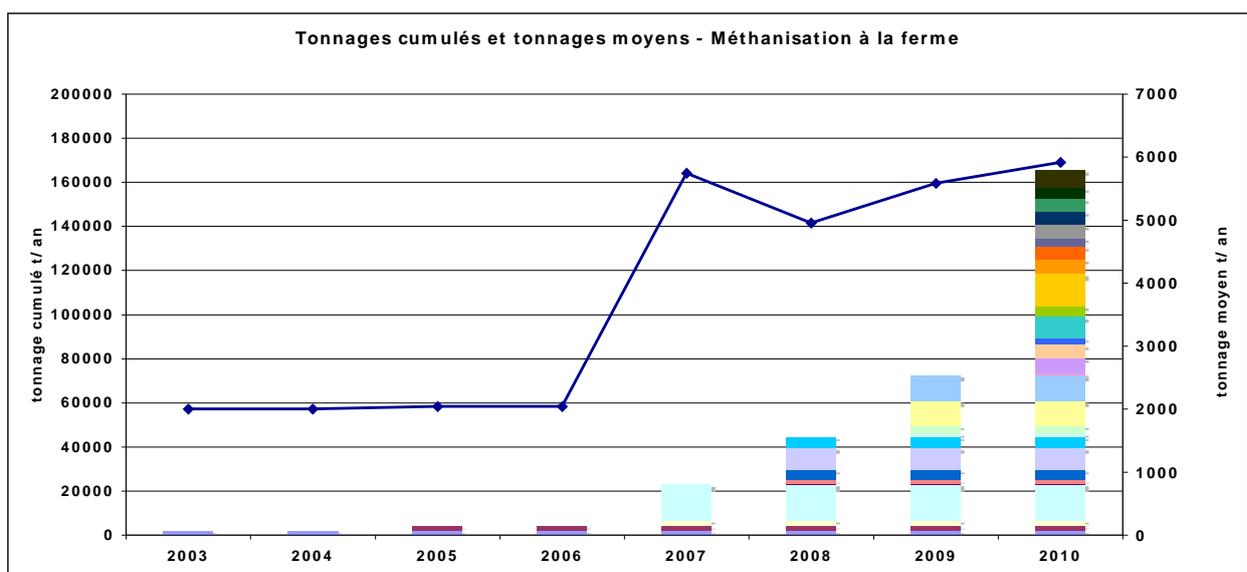


Figure 1: Etat des lieux des unités de méthanisation à la ferme fin 2010

Sur l'ensemble des sites, 75% des tonnages sont des déjections animales (porcins, bovins) et 25% sont des co-substrats, soit d'origine agricole soit des industries agro-alimentaires (Figure 2).

Les intrants des unités de méthanisation individuelle en fonctionnement des 17 agriculteurs d'AAMF (2010) sont : 66% de déjections animales, 20% de matières végétales (cultures, tontes, issues de céréales, déchets de fruits et légumes) et 14% de déchets des IAA (graisses, gluten...).

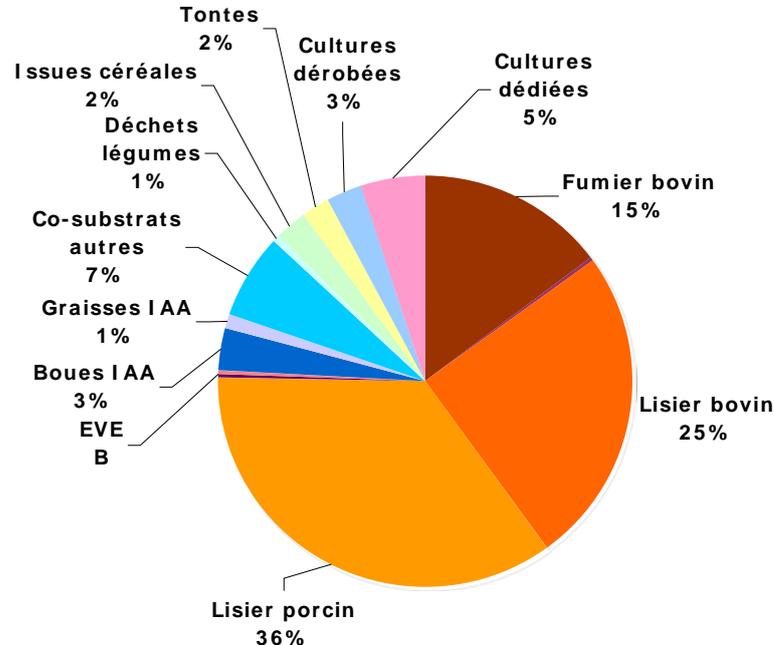


Figure 2: Répartition des tonnages entrant en méthanisation à la ferme

Au total, environ 165 000 t de digestat ont été produites en 2010, plus de la moitié en zone vulnérable vis-à-vis de l'azote.

Concernant les unités de méthanisation individuelle en fonctionnement fin 2010, 1/3 des tonnages sont épandus directement en brut, 1/3 pratiquent la séparation de phase avec épandage des phases séparément et 1/3 pratiquent le post-traitement des digestats, essentiellement du séchage.

Les sites pratiquant un post-traitement du digestat disposent systématiquement d'une séparation de phase.

Au sein de l'Association des Agriculteurs méthaniseur de France (AAMF, Figure 3), pour les 17 unités en fonctionnement, 60% des gisements sont épandus en brut, 30% subissent une séparation de phase et 10% sont séchés en brut. Après séparation de phase, la phase liquide est épandue, la phase solide subit dans 1/4 des cas une étape de séchage.

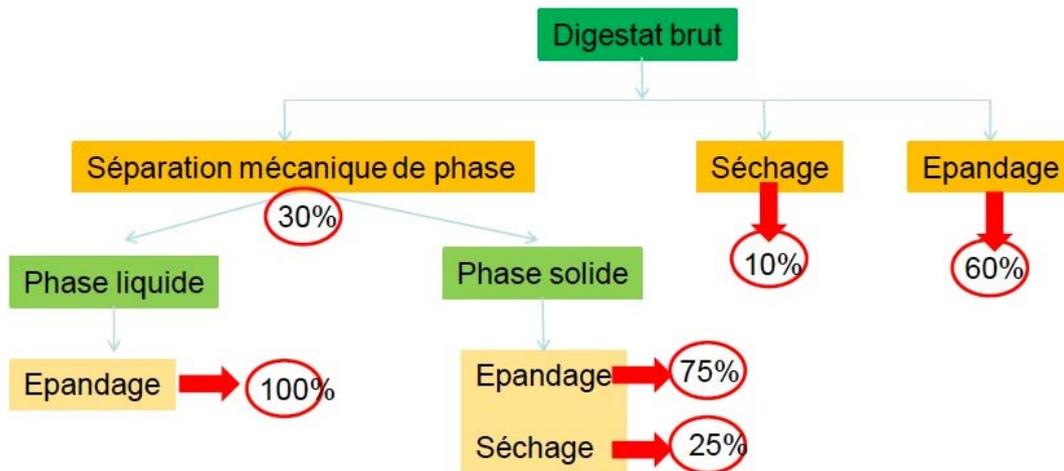


Figure 3: Utilisation du digestat au sein de l'AAMF (2011)

2.1.2 Méthanisation de déchets : biodéchets et OMR

AMORCE a recensé dans son Etat des lieux 2010, édité en mars 2011, les données techniques et économiques sur les unités de méthanisation de déchets en fonctionnement en 2010 ainsi que les projets.

Sur l'ensemble des unités en fonctionnement (6 au total), seulement la moitié des quantités de déchets prévues dans le dimensionnement théorique des installations entrent en digestion. Les sortants de la méthanisation sont :

- Compost normalisé NFU 44-051 ou compost non normalisé envoyé en Centre d'Enfouissement Technique
- Traitement de la fraction liquide en station d'épuration (STEP) et/ou recirculation sur le site

Les problèmes relevés concernant explicitement les digestats sont :

- Le pressage : des résidus inertes, verres notamment, détériorent les presses assurant la déshydratation
- Les bilans hydriques : la quantité d'eaux résiduelles produite a souvent été sous-dimensionnée et implique des coûts de traitement élevés (STEP) ou des investissements supplémentaires dans des outils de post-traitement, comme l'évapoconcentration.
- Le compostage des digestats à forte teneur en ammonium conduit à des émissions d'ammoniac qui polluent fortement les ambiances des usines.

2.1.3 Méthanisation territoriale

En France, en 2010, 4 unités sont en fonctionnement. Seule une unité ne possède pas de post-traitement du digestat (Tableau 1).

Tableau 1: Gestion des digestats des 4 unités de méthanisation territoriale en fonctionnement en 2010 (France)

| Site (date de mise en route) | Tonnage entrant (% déchets/total) | Séparation de phase | Digestat brut | Digestat solide | Digestat liquide | Destination des sous-produits |
|---------------------------------|--------------------------------------|---------------------|---------------|-----------------|------------------------------------|--|
| Biogasyll (2008) | 25 000 (76%) | oui | Epandage | Compostage | Stripping Acide nitrique | Epandage solution concentrée Irrigation, rejet des eaux usées |
| Ferti-NRJ (2009) | 38 200 (100%) | oui | - | Compostage | Epandage | |
| Bionerval (2010) | 40 000 (100%) | non | Epandage | | | |
| Geotexia (2010) | 75 000 (53%) | oui | - | Séchage | Evaporation + Osmose Inverse | Irrigation Epandage sulfate d'ammonium |

2.1.3.1 Biogasyll : Compostage + Stripping

L'unité de méthanisation de déchets agricoles et d'industries agroalimentaires, Biogasyll appartenant au groupe SARIA, située aux Herbiers, en Vendée, fonctionne depuis mai 2008. Elle traite 23 000 tonnes de déchets. Le biogaz produit est valorisé via deux cogénérateurs (250 KW et 365 KW) en électricité et en eau chaude (Figure 4). Depuis 2009, une partie du digestat est traitée, l'autre partie est valorisée directement (digestat brut) en épandage (5 000 t/an). Le traitement du digestat comprend une séparation de phase, suivie d'une étape de compostage de la fraction solide et d'une étape de stripping à l'acide nitrique de la fraction liquide (Figure 5). Les sous-produits valorisables sont le compost normalisé (3 000 t/an) et le nitrate d'ammonium (1 200 t/an). Les eaux peu chargées sont envoyées en station d'épuration.



Figure 4: Présentation de la méthanisation à Biogasyl

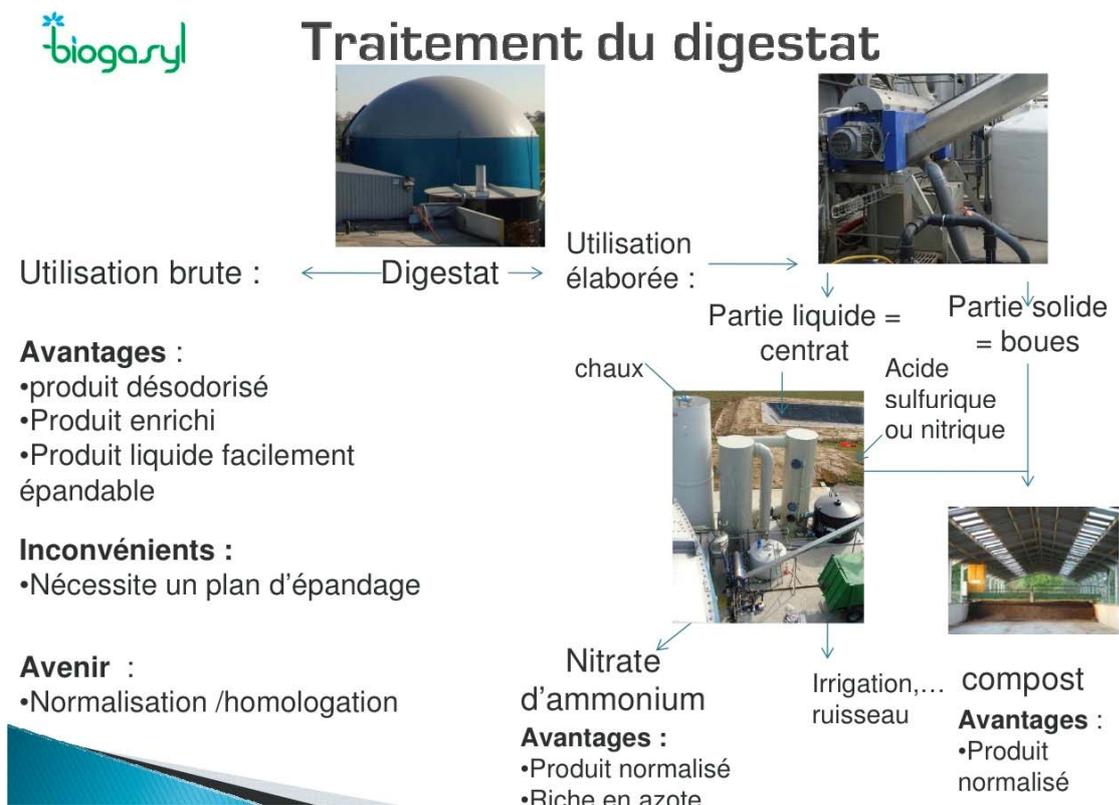


Figure 5: Présentation du traitement des digestats à Biogasyl

2.1.3.2 Fertigaz (FertiNRJ) : Compostage

Le site de Passel traite 16 500 t/an de déchets collectés dans un rayon de 50 km :

- Déchets industriels : boues, graisses, refus de dégrillage, rebuts de fabrication...
- Déchets des collectivités : boues, bacs à graisses...
- Déchets fermentescibles de la grande distribution et de la restauration collective

Le site permet la production de 12 000 m³ de digestat et 4 800 t/an de compost distribué auprès d'agriculteurs (1 000 ha).

Nous n'avons pas connaissance de problématique particulière liée au digestat. Les investissements dans une plate-forme de compostage ont été prévus pour s'affranchir du plan d'épandage. L'air vicié des cellules de compostage est traité par un biofiltre qui a fait l'objet de problèmes en hiver 2009-2010. La chaleur cogénérée est a priori valorisée pour sécher le digestat, nous ne disposons pas de données précises sur ce point.

2.1.3.3 Bionerval : Epandage du digestat brut

SARIA propose sur l'unité de Bionerval à Benet (44), regroupant une cinquantaine d'exploitations agricoles dans un rayon de 15 km, la valorisation du digestat brut, sous forme liquide, dans le cadre d'un plan d'épandage 5 400 ha pour 3 000 ha nécessaire. Une société spécialisée assure la prestation du rendu racine. Le suivi agronomique est assuré par l'unité.

Pour l'exploitant, la solution d'épandage en digestat brut, malgré la réalisation du plan d'épandage sur une surface importante, reste la plus simple et économique.

2.1.3.4 Geotexia : Séchage + Evaporation + Osmose Inverse (Figure 6)

Le site de Géotexia traite des lisiers de porcs en mélange avec des déchets agro-alimentaires.

La principale problématique à ce jour est l'exportation du produit chargé en matière organique, la fraction solide du digestat qui n'a pas de statut réglementaire autre que déchet et ne peut être commercialisée. La question du bilan énergétique du sécheur à disques nécessitant l'utilisation de l'énergie thermique des fumées de cogénération se pose. Cette question a été étudiée dans le cadre du programme DIVA.

Le traitement par filtration membranaire (ultrafiltration, osmose inverse) de la phase liquide issue de la centrifugation n'a pas révélé de problématique particulière à ce jour.

2.2 Etat des programmes en cours sur les digestats en France

La connaissance des digestats est un point fort des programmes de recherches en France. Ci-dessous la liste des programmes en cours, les principaux centres de recherches français traitant des problématiques de matières organiques sont impliqués :

- Etude ADEME (RITTMO 2009-2011) : Qualité agronomique des digestats
 - Données scientifiques européennes, analyses de digestats
- Thèse de Cécile Teglia (Cemagref) ADEME-SUEZ (2008-2011) : Caractérisation et valorisation des digestats solides
 - Analyses de digestats (fraction solide) d'OMR, biodéchets, effluents agricoles, boues urbaines
- CASDAR-ADEME (IFIP 2010-2011) : Déshydratation des digestats de méthanisation
 - Analyse technico-économique de plusieurs procédés de post-traitement
- CASDAR - ADEME (2010-2013 - 55 partenaires) : Effluents d'élevage
 - Analyses pour trentaine de produits organiques dont 4 digestats agricoles
 - Valeur agronomique, épandabilité, effets aux champs (coefficient azote)
- MAP - ADEME (2011-2014 - 22 partenaires) : Réseau PRO
 - Réalisation Base de données nationale sur les données agronomiques des PRO (produits résiduels organiques)
- SOERE PRO : réseau essais INRA sur toutes les matrices (sol/air/eau)
- ANR PHOSPHOR (2010-2014) : Cristallisation du phosphore (précipitation de struvite) en post-traitement des phases liquides des lisiers porcins en traitement aérobique
 - Etude des procédés et valeurs agronomiques des sous-produits
- Dossier déposé : IFIP CASDAR (2012-2015) : Insertion territoriale de la méthanisation agricole en zone à forte densité d'élevage
 - Problématique post-traitement du digestat
- Association AMF
 - Collecte des analyses des digestats des adhérents
- Méthanéo
 - Essais aux champs d'épandage de digestats de méthanisation à la ferme

3. Digestat et réglementation

La valorisation des digestats en agriculture relève actuellement de deux principes :

- Logique Déchets et application des règles liées au plan d'épandage (PE)
- Logique Produit et valorisation d'un produit normalisé ou homologué

3.1 Logique Déchets

Les règles d'épandage sont issues de :

- Code rural et Règlement Sanitaire Départemental (RSD) : Titre VIII - art. 159
- Code de l'environnement : R211-48 à R211-53
- Rubrique ICPE 2781
- Directive Nitrates

Tous les plans d'épandage ont une base réglementaire commune avec des applications plus ou moins contraignantes en fonction des intrants et de la rubrique ICPE considérée.

Ces 2 critères impliquent deux contraintes :

- Sur le montage du dossier ICPE : temps important, surcoût du dossier, enquête publique sur l'ensemble des communes concernées par le Plan d'épandage
- Sur la durée de vie de l'installation : contraintes fortes pendant l'exploitation pour l'unité de méthanisation (analyses, dossier, restriction des périodes et des zones d'épandage)

| | | | |
|--------|---|--|--|
| 2781.1 | Méthanisation de matière végétale brute, effluents d'élevage, matières stercoraires, déchets végétaux d'industries agroalimentaires | a) La quantité de matières traitées étant supérieure ou égale à 50 t / j | Autorisation <i>Epandage : 2 février 1998 modifié*</i> |
| | | b) La quantité de matières traitées étant comprise entre 30 et 50 t / j | Enregistrement (étude préalable, cartographie, programme prévisionnel d'épandage...)* |
| | | c) La quantité de matières traitées étant inférieure à 30 t / j | Déclaration Contrôlée (étude préalable, cartographie, programme prévisionnel d'épandage...)* |
| 2781.2 | Méthanisation d'autres déchets non dangereux | - | Autorisation <i>Epandage : 2 février 1998*</i> |

*Exception : méthanisation des déjections et matières végétales issues d'une seule exploitation : modification du plan d'épandage initial

Les fertilisants sont qualifiés selon leur rapport C/N et le calendrier d'épandage associé (Figure 7) :

- Fertilisant de type I (C/N > 8) : fumier, digestat brut issu de digestion sèche, fraction solide après séparation de phase
- Fertilisant type II (C/N < 8) : lisier, digestat brut issu de digestion infiniment mélangée, fraction liquide après séparation de phase, percolat
- Fertilisant type III : engrais minéraux (azote minéral)

Les distances aux cours d'eau, notamment dans le cas de fortes pentes (> 7%) peuvent réduire considérablement les zones d'épandage dans le cas de digestats issus d'unités soumises à autorisation.

| | | Sept | Oct | Nov | Déc | Janv | Fév | Mars | Avril | Mai | Juin | Juil | août |
|--|----------|------|-----|-----|-----|------|-----|------|-------|-----|------|------|------|
| Sols non cultivés | Type I | | | | | | | | | | | | |
| | Type II | | | | | | | | | | | | |
| | Type III | | | | | | | | | | | | |
| Grandes cultures implantées à l'automne | Type I | | | | | | | | | | | | |
| | Type II | | | | | | | | | | | | |
| | Type III | | | | | | | | | | | | |
| Grandes cultures implantées au printemps | Type I | | | | | | | | | | | | |
| | Type II | | | | | | | | | | | | |
| | Type III | | | | | | | | | | | | |
| Prairies de plus de 6 mois | Type I | | | | | | | | | | | | |
| | Type II | | | | | | | | | | | | |
| | Type III | | | | | | | | | | | | |
| Vignes et vergers | Type I | | | | | | | | | | | | |
| | Type II | | | | | | | | | | | | |
| | Type III | | | | | | | | | | | | |

 Périodes d'interdiction d'épandage avant et pendant la culture

Figure 7: Exemple de calendrier d'interdiction d'épandage selon le type de fertilisant (département 79)

On notera également le rappel à l'ordre de la commission européenne le 27/10/2011 concernant les périodes d'interdiction pour l'épandage des déjections et des fertilisants jugés trop courtes et de restrictions insuffisantes.

La question se pose également d'un point de vue réglementaire sur la possibilité de déposer les digestats (fraction solide) en bout de champs, comme cela est autorisé pour des fumiers. Ces questions sont soulevées actuellement par les Directions Départementales des Territoires (DDT) de plusieurs départements, notamment vis à vis de la stabilité biologique des digestats.

3.2 Logique Produit

Pour la logique produit (produit homologué ou normé) : la responsabilité de l'épandage revient à l'agriculteur utilisateur.

3.2.1 Cadre réglementaire français

3.2.1.1 Normalisation :

a) Amendements organiques : NFU 44-051 ou 44-095 (avec des MIATE¹)

- Les teneurs en N, P₂O₅ et K₂O ne doivent pas dépasser chacune 3% (sur produit brut)
- Liste positive sur les matières entrantes
- 11 dénominations
- Obligation à ce jour de réaliser un compostage du digestat pour prétendre à la normalisation.

b) Engrais NFU 42-001

Aujourd'hui, plusieurs projets d'installations de méthanisation misent sur la possibilité de normaliser certains produits issus d'un post-traitement des digestats (sulfate d'ammonium notamment) sous la norme NFU 42-001 dite Norme Engrais, avec des teneurs en N, P₂O₅ ou K₂O qui dépassent 3% (sur produit brut).

3.2.1.2 Homologation

Plusieurs classes existent pour l'homologation de produits organiques :

- Produits organiques
- Amendements basiques
- Autres fertilisants
- Supports de culture
- Rétenteurs

a) Le dossier d'homologation

Le dossier d'homologation déposé auprès de l'ANSES doit contenir les informations suivantes, il est possible de fournir des données bibliographiques :

- Démonstration de l'innocuité
- Sécurité manutention et stockage
- Santé de l'utilisateur
- Sécurité du consommateur
- PNEC : Predicted No Effect Concentration : dose sans effet sur les organismes des écosystèmes étudiés.
- Démonstration de l'efficacité
- Conditions d'utilisation préconisées
- Efficacité intrinsèque : composition du produit
- Efficacité potentielle

¹ Les MIATE (Matières d'Intérêt Agronomique, issues du Traitement des Eaux) sont les boues issues des stations d'épuration des eaux usées urbaines

En outre, il est imposé une constance de composition du produit : homogénéité, invariabilité, stabilité (figure 8).

- **Stabilité** : la composition de chaque lot mis sur le marché doit être conforme à ce qui est déclaré plus ou moins les écarts possibles (10%) et cela pendant la période de mise sur le marché. Un délai limite d'utilisation est donc à déterminer à partir de l'étude de stabilité.
- Possibilité de période de latence pendant la fabrication pour stabiliser le produit.
- **Homogénéité** : < 10% sauf pour les préparations microbiennes. Dans un lot donné, réalisation de prélèvements élémentaires, chaque échantillon ne s'écarte pas de la composition annoncée aux tolérances près.
- **Invariabilité** : Dans chaque lot identifié : réalisation d'un échantillon final représentatif : composition de chaque lot ne s'écarte pas de la composition annoncée aux tolérances près.

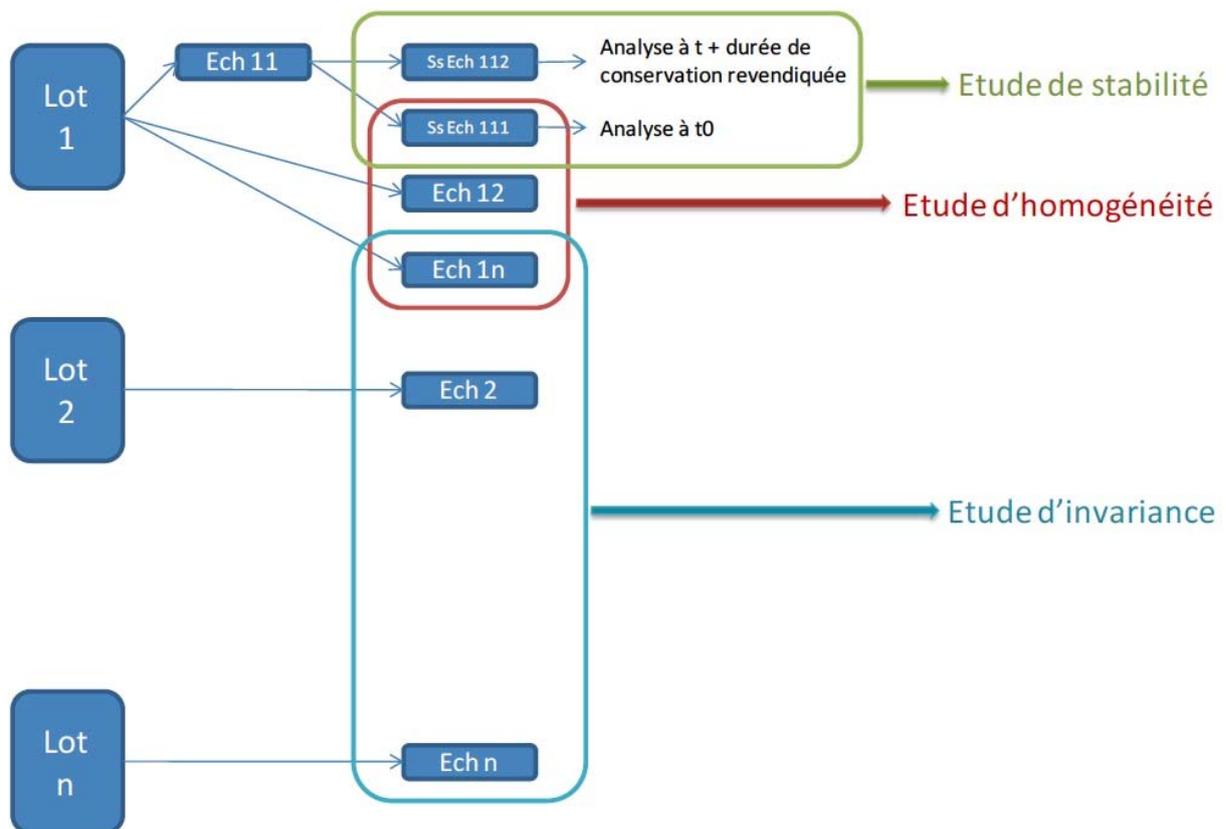


Figure 8: Représentation schématique des analyses nécessaires en vue de l'homologation d'un produit

Enfin, les analyses à effectuer sont les suivantes (Annexe 3 du Guide d'homologation) :

- Analyses microbiologiques
- *Escherichia coli*
- Staphylocoques
- Levures et moisissures
- Micro-organismes aérobies à 30°C

b) Le programme ValdiPRO pour la méthanisation agricole

Le ministère de l'Agriculture vient d'accorder, via le CASDAR, une enveloppe pour financer le programme Valdipro, mené par les associations Aile et Trame et les Chambres d'Agriculture de la Bretagne, sur la caractérisation des digestats issus de méthaniseurs agricoles et les produits générés (Figure 9). C'est le premier pas vers des homologations, voire une normalisation, permettant la vente de cette matière fertilisante.

Un prestataire auditera plusieurs unités françaises, en analysant les matières entrant et sortant des digesteurs. Ce dispositif pionnier prend en compte les substrats agricoles et autres déchets organiques, à l'exception des boues de station d'épuration urbaines et des ordures ménagères collectées en mélange.

Le prestataire facilitera les liens entre les exploitants et les instances d'homologation.

Les premiers résultats sont attendus en juin 2012, les premières autorisations provisoires de vente de digestats agricoles en 2013.

Le Groupe de Travail digestats à l'AFNOR est quant à lui suspendu, en l'attente d'avancées sur ce sujet.

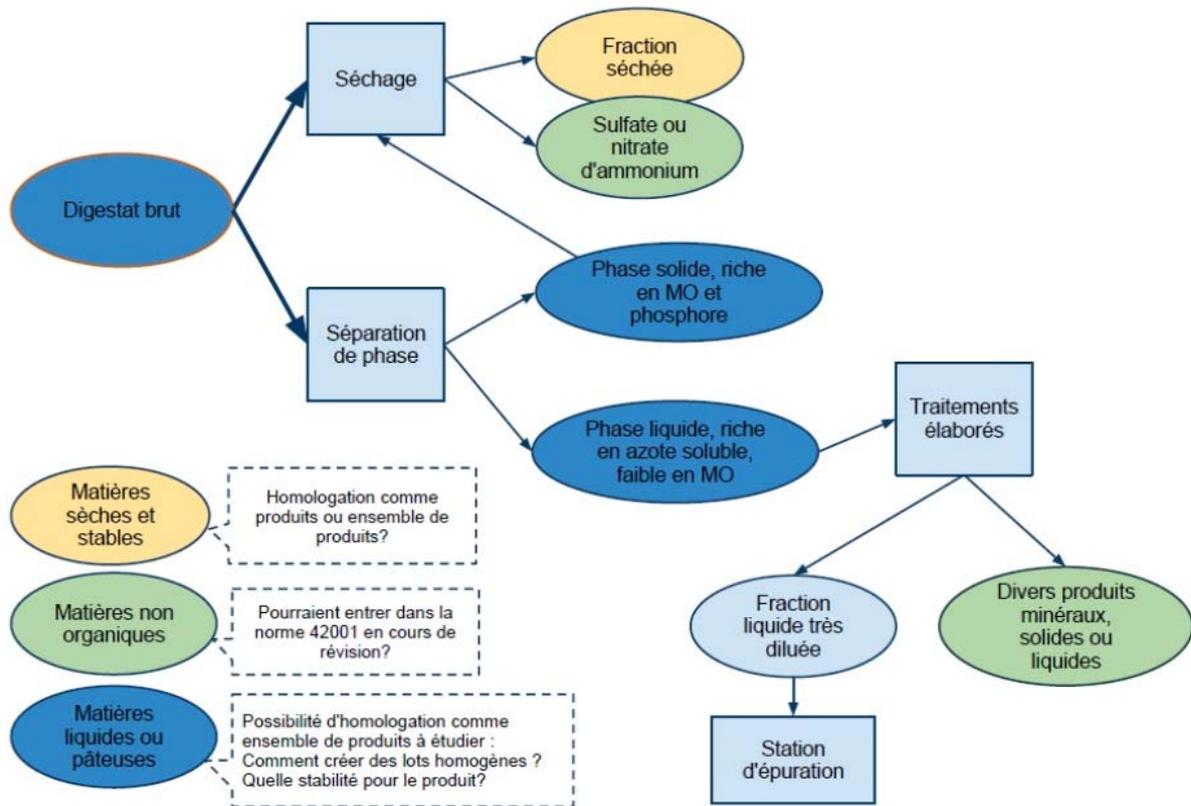


Figure 9: Représentation schématique des post-traitements possibles pour les digestats et les différents produits générés

3.2.2 La directive 2008/98/CE – End of Waste : vers un règlement européen pour les composts et digestats

Rappelons qu'un règlement européen n'a pas besoin de traduction en droit national pour être applicable.

L'article 22 de la Directive cadre déchets 2008/98/CE demande à la Commission Européenne d'évaluer la gestion des biodéchets en Europe et le cas échéant de présenter une proposition. L'article 6 mentionne les conditions générales pour l'accès au statut de produit.

Depuis 2008, la Commission Européenne réfléchit à la question du retour au sol des produits organiques :

- Février 2008 : Rapport IPTS sur la fin de statut de déchet du compost
- Décembre 2008 : Publication du Livre Vert sur la gestion des déchets organiques dans l'Union Européenne
- Décembre 2009 : Publication du rapport Evaluation des options pour améliorer la gestion des biodéchets
- Septembre 2010 : Publication d'un document de travail sur les boues et les biodéchets
- 2 mars 2011 : 1^{ère} réunion du Groupe de travail sur la fin du statut de déchet du compost et du digestat
- 24 octobre : 2^{ème} réunion du Groupe de travail sur la fin du statut de déchet du compost et du digestat

La Commission Européenne souhaite rédiger un règlement européen sur la fin du statut de déchet du compost et du digestat afin de promouvoir les composts et digestats de qualité et de favoriser leur circulation sur le marché européen. Ce règlement inclut une proposition de critères et de seuils d'innocuité.

Aujourd'hui les principaux points de discussion sont l'établissement d'une liste positive ou d'une liste négative de déchets candidats au statut de produit, et la possibilité ou non pour les composts et digestats d'OMR et de boues urbaines d'obtenir le statut de produit. L'Allemagne, l'Autriche, les Pays-Bas et la Flandre se positionnent clairement contre la possibilité pour les composts d'OMR et de boues urbaines d'obtenir un statut de produit. Les autres Etats membres n'ont pas donné leur avis, notamment la plupart des pays de l'Est étaient absents lors des réunions du groupe de travail.

En revanche, l'intégration des déjections animales à la liste positive (non encore prévue) est une volonté partagée par une majorité d'Etats membres.

Si les composts d'OMR et de boues urbaines sont exclus, ils devront sortir de la norme NF U44 051 et ne pourront a priori être utilisés qu'en plans d'épandage. Lors du groupe de travail de la Commission, la France a insisté sur le fait qu'il n'existe pas d'harmonisation des méthodes d'analyses en Europe.

La Commission a donc décidé de faire réaliser par le JRC (Joint Research Center) une campagne d'analyses de composts et de digestats de diverses origines en Europe, analysés par la même méthode.

D'après les résultats, partiels, de ces analyses, présentés lors la dernière réunion de la Commission Européenne du 24 octobre 2011 à Séville, il a été proposé d'exclure les boues urbaines et les OMR comme intrants (liste positive).

Les participants français ont choisi d'établir une stratégie commune pour défendre une obligation de résultat et non de moyens auprès de la Commission Européenne, notamment via les contributions réalisées fin 2011/début 2012.

La synthèse des contributions et des décisions prises devrait être rendue en juin 2012.

Si les propositions sont conservées, la mise en œuvre de cette réglementation européenne impactera fortement la valorisation des déchets organiques : elle engendrera des difficultés pour les filières OMR et boues urbaines actuellement valorisées sous forme de composts. En revanche, la construction d'une « norme » européenne pour tous les autres digestats serait a priori intéressante. Il reste toutefois à vérifier l'adéquation des seuils tolérés sur les différents paramètres.

En effet ceux-ci sont plus sévères, notamment sur les métaux lourds tels que le cuivre et le zinc (Tableau 2).

| ETM (mg / kg MS) | NFU 44-051 | proposition End-of-Waste (2011) |
|------------------|------------|---------------------------------|
| Cd | 3 | 1,5 |
| Cr tot | 120 | 100 |
| Cu | 300 | 100 |
| Hg | 2 | 1 |
| Ni | 60 | 50 |
| Pb | 180 | 120 |
| Zn | 600 | 400 |

Tableau 2: Seuils en ETM pour la NFU-44-051 et la proposition End-of-Waste

Les autres paramètres à respecter pour les digestats sont :

- seuil minimum en teneur en matière organique : 15% sur la MS après la digestion
- seuil minimum de stabilité : 1500 mg d'acides organiques totaux / l digestat
- inertes et impuretés : 0,5% de la MS pour le verre, le métal et les plastiques > 2 mm
- pathogènes et adventices :
 - absence de *Salmonella sp.* dans 50 g d'échantillon
 - seuil *E.Coli* : 1000 CFU / g de matière fraîche
 - 2 graines d'adventices viables / l digestat

Dans le cas de l'exclusion des OMR et des boues urbaines, il n'y a pas de limites sur les polluants organiques.

L'adoption d'une réglementation européenne permettrait de standardiser les pratiques qui diffèrent aujourd'hui d'un pays à l'autre (Tableau 3).

3.3 Agriculture Biologique

A ce jour, des textes sont en cours de validation au niveau national (FNAB, UFAB, INAO) sur les possibilités d'intégrer des digestats exogènes à l'exploitation en agriculture biologique.

| Characteristic | Germany (RAL-GZ 245) | UK (PAS 110:2010) | Sweden (SPCR 120) | Switzerland |
|---|--|-----------------------------|----------------------|-------------|
| Hygienic aspects | | | | |
| Proof of successful treatment for sanitization | X | X | X | X |
| If demanded by ABP regulation: treatment with 70°C for 1 hour and particle size of 12 mm | X | X | X | X |
| minimum temperature during a hydraulic retention time of 24 h | 55 (50) °C | based on HACCP plan | | 53°C |
| input-output-control | As possible hygienic proof | X | | |
| germinable seeds and sprouting | Max. 2 / liter | | X | X |
| Salmonella | absent in 50 g fresh matter | absent in 25 g fresh matter | | X |
| Additional hygienic parameters for the treatment of animal-by products | | | | |
| 4 of 5 E.Coli samples 1000 CFU / g fresh matter | As possible hygienic proof | X | X | |
| Impurities | | | | |
| Maximum 0,5 % dm selection and weighing of impurities (glass, plastics and metals > 2 mm) | X | X | X | X |
| Laminary impurities | area sum of the selected impurities < 25 cm ² /l fm | | X | > 0,1 % |

| | | | | |
|---|---|-----------------------------|---|---|
| Degree of fermentation | | | | |
| Organic acids (total) ≤ 1.500 mg/l | X | | | |
| Volatile Fatty Acids | | X | | |
| Residual Biogas Potential | | X | | |
| Odour | | | | |
| Free from annoying odours | X | | | |
| Organic Matter | | | | |
| Minimum 20% (w/w) dm | | | X | |
| Minimum 30% (w/w) dm for solid digestate | X | | | |
| Minimum 40% (w/w) dm for liquid digestate | | | | |
| potentially toxic elements | | | | |
| Threshold for heavy metals (Pb, Cd, Cr, Ni, Hg) For micro-nutrients Cu and Zn plausible value should not be exceeded. | X | X | X | X |
| Parameter for declaration | | | | |
| Product type (digestate product liquid or solid) | X | X | X | X |
| Name and details of customer | | X | | |
| Name and details of producer | X | X | X | X |
| Weight or volume | | X | X | X |
| Date of dispatch | | X | | |
| density | X | | | |
| Dry matter content | X | X | X | X |
| Organic matter | X | X | X | X |
| pH-value | X | X | X | X |
| Salt content | X | | | X |
| Plant nutrients (total) (N, P ₂ O ₅ , K ₂ O, MgO, S) | X | X (MgO, S optical) | X | X |
| Nitrogen soluble (NH ₄ -N, NO ₃ -N) | X | X (only NH ₄ -N) | X | X |
| Micro-nutrients (according to fertiliser ordinance) | X | | | |
| C/N ratio | X | | | X |
| Water soluble chloride (Cl ⁻) | | X | | |
| Water soluble sodium (Na) | | X | | |
| Heavy metals if the thresholds have been exceeded | X | X | X | X |
| Alkaline effective matter (CaO) | X | | X | |
| References for good practical use | X | X | X | X |

Tableau 3: Comparaison des critères analysés pour les digestats en Allemagne, Royaume Uni, Suède et Suisse (Source : European Biogas Association)

4. La composition des différents digestats (étude bibliographique)

Ce paragraphe a pour vocation de synthétiser la bibliographie existante sur la composition des digestats.

La plus grande partie des données et conclusions sont basées sur le recueil bibliographique « Qualité agronomique et sanitaire des digestats » réalisé par le groupement RITTMO, Uteam, FiBL, INERIS, LDAR pour le compte de l'ADEME, disponible depuis Novembre 2011, qui sera identifié dans la suite de ce document par « *Synthèse ADEME/RITTMO 2011* ». Ce recueil est une compilation de plusieurs rapports antérieurs réalisés à base d'enquêtes et d'analyses. Les données les plus consolidées et les plus anciennes concernent les digestats de boues urbaines seules qui portent sur plus de 400 analyses. Les données concernant les autres types de digestats regroupent entre une dizaine à une centaine de sites.

D'autres sources bibliographiques ont également été utilisées comme le rapport « Compost et digestat en Suisse » de l'Office Fédéral Suisse (Kupper, T. and J. Fuchs 2007) ainsi que des résultats de retours d'expériences, notamment sur les valeurs fertilisantes (essais aux champs).

Dans la présente synthèse bibliographique, nous n'étudierons pas les digestats de boues urbaines et distinguerons deux types de digestats :

- Digestats issus d'unités de méthanisation introduisant des déjections animales, avec ou sans déchets des industries
- Digestats issus d'unités de méthanisation de déchets ménagers (ordures ménagères résiduelles triées en usine ou biodéchets triés à la source)

La difficulté concernant ces types de digestats, outre le faible nombre de données, réside dans le fait qu'un grand nombre de substrats sont utilisés dans les méthaniseurs, et le plus souvent en mélange. Il s'agit des déjections animales, des boues d'industries agro-alimentaires (et parfois des boues urbaines), de graisses, de résidus de cultures, de cultures énergétiques, de déchets alimentaires, de biodéchets, d'ordures ménagères, etc... Il semble raisonnable de penser que la composition de ces intrants et le type de méthanisation (méthanisation humide ou sèche, mésophile ou thermophile) vont influencer sur la composition des digestats. Cependant, les rapports techniques et quelque fois même la littérature scientifique ne précisent pas clairement les types de substrats entrant dans les méthaniseurs et/ou leur quantité (proportions de déjections animales, biodéchets, ordures ménagères, etc.). De plus, ayant peu de données, les auteurs ont quelque fois tendance à agréger les données obtenues sur les digestats bruts (en sortie de méthaniseur) avec celles des digestats solides en sortie de séparation de phase alors que cette étape a forcément un impact sur la partition des éléments dans les digestats. Enfin, certaines études classent les « composts de digestats » dans la catégorie des « digestats », alors que par définition (et dans la réalité) ce sont deux « produits » différents. Une fois composté, le digestat est un compost et n'est plus un digestat, tant sur le plan physico-chimique que réglementaire.

Malgré ces réserves, des tendances se dessinent sur la composition des digestats. Elles sont résumées ci-après.

4.1 Valeur agronomique et NPK

4.1.1 Les caractéristiques des digestats

L'étude ADEME/RITTMO 2011 présente les résultats d'analyses de 150 digestats, notamment sur la matière sèche et les nutriments (Figures 10 à 13). Ces résultats sont repris ci-dessous, les abréviations utilisées dans les figures sont les suivantes :

- LFB : Lisier-Fumier-Bovin
- LFP : Lisier-Fumier-Porc
- DVH : Déchets verts et horticoles
- BIOD : Biodéchets
- SPA : Sous-produits animaux
- IAA : Déchets industries Agro-alimentaires
- Autres : autres substrats
- DJA : déjections animales en mélange

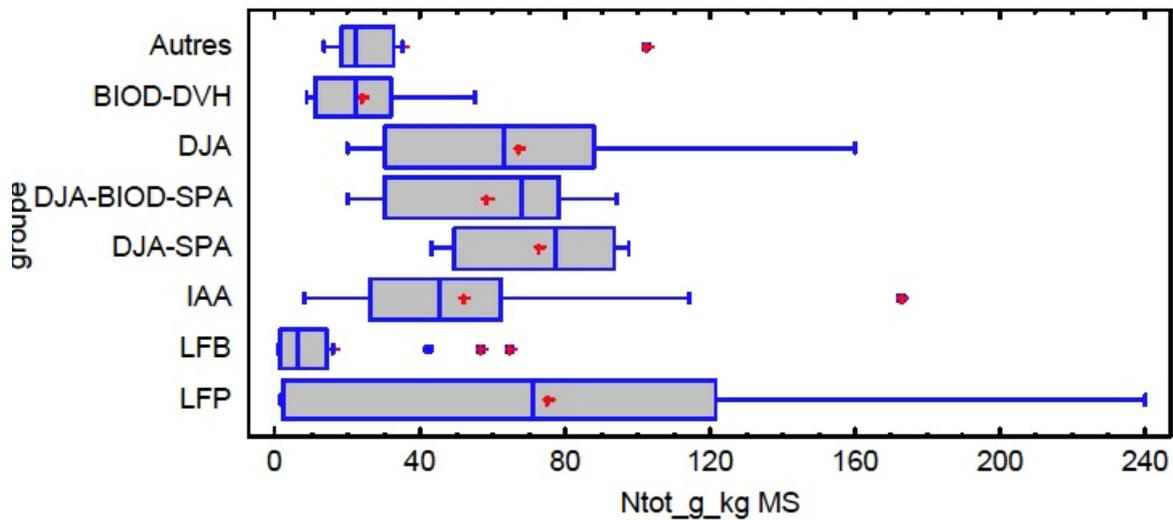


Figure 10: Teneur en azote total (en g/kg MS) des digestats en fonction des intrants (source : issu Synthèse ADEME/RITTMO 2011)

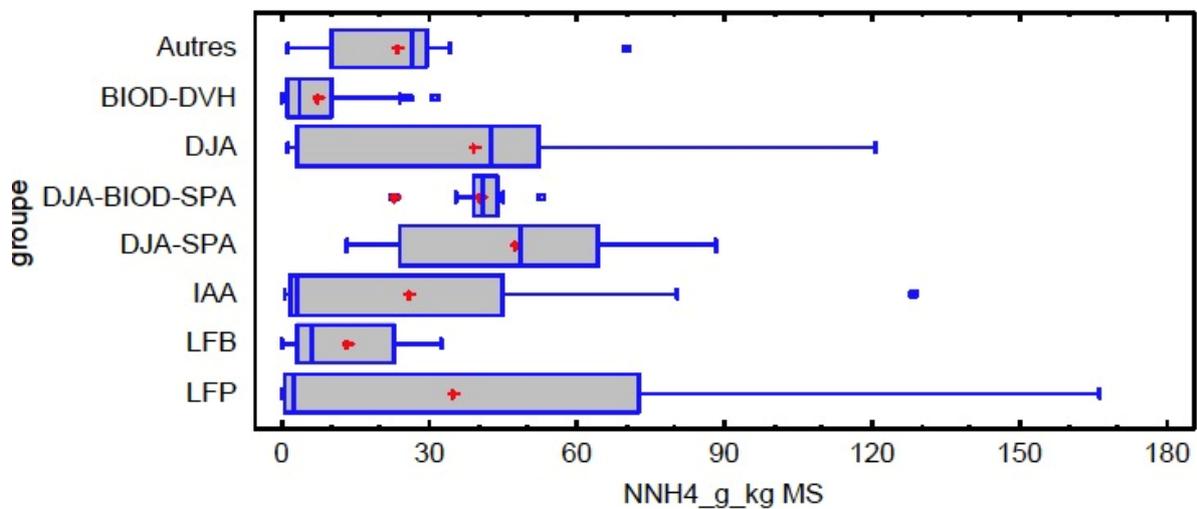


Figure 11: Teneur en azote ammoniacal (en g/kg MS) des digestats en fonction des intrants (source : issu Synthèse ADEME/RITTMO 2011)

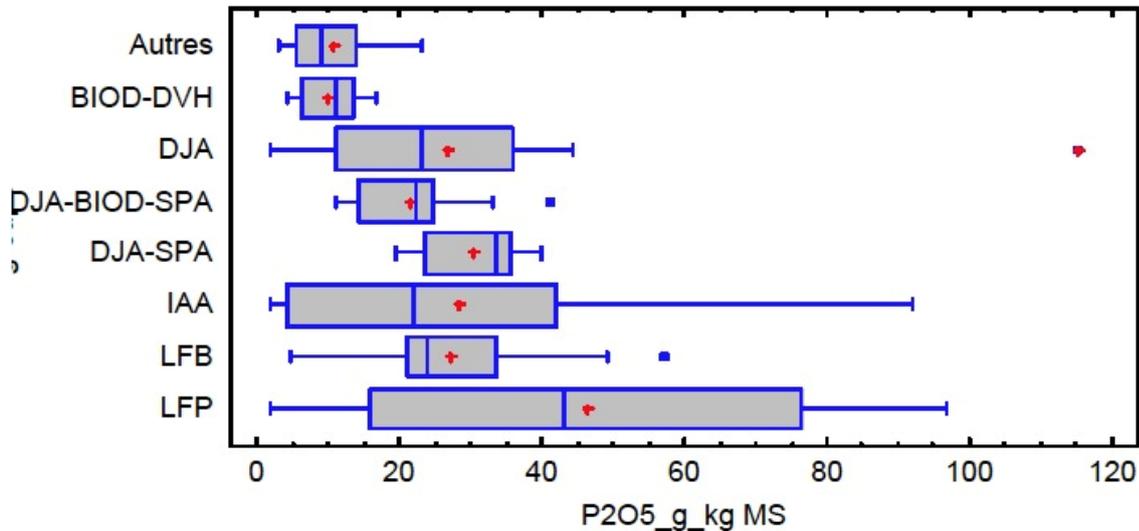


Figure 12: Teneur en phosphore (g/kg MS) des digestats en fonction des intrants (source : issu Synthèse ADEME/RITTMO 2011)

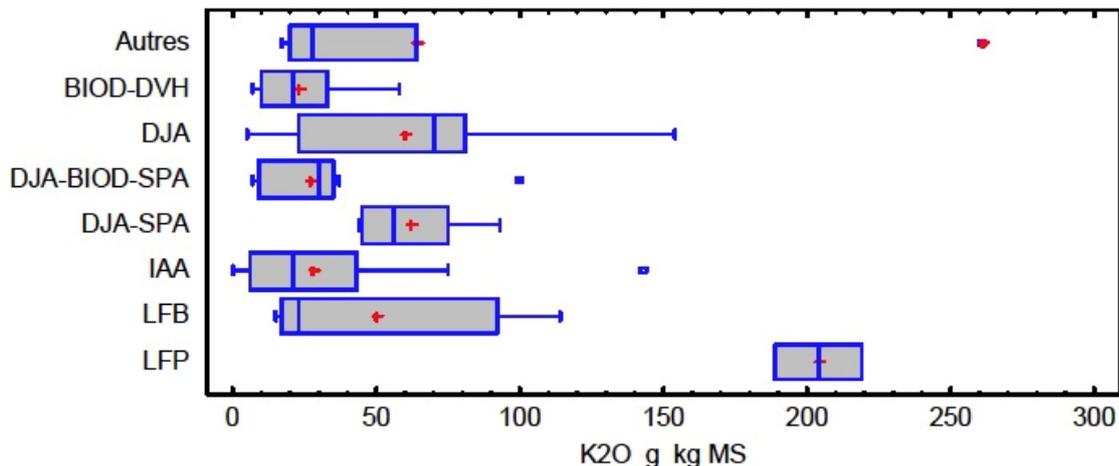


Figure 13: Teneur en potassium (g/kg MS) des digestats en fonction des intrants (source : issu Synthèse ADEME/RITTMO 2011)

On observe une grande variabilité dans la composition des digestats liée en partie au fait que tous les types de digestats (bruts, solides et liquides) sont regroupés dans une même catégorie. Les compositions en nutriments diffèrent selon les substrats entrant en méthanisation. Cependant, aucune relation nette ne permet de caractériser ces relations. L'analyse des données donne une tendance générale sans pouvoir apporter une fourchette et des conclusions en fonction du type de substrats entrants.

Pour les nutriments NPK, les teneurs les plus élevées sont observées pour des digestats issus de la méthanisation du lisier de porcs, des fumiers de volailles et des sous-produits animaux. A l'opposé, les teneurs les plus faibles sont associées à des digestats issus de la méthanisation de biodéchets, déchets verts et de lisiers/fumiers bovins.

Les teneurs en azote des digestats de LFP et de DJA sont très variables, probablement à cause de l'agrégation de données obtenues sur les lisiers et les fumiers et/ou à cause de problèmes d'hétérogénéité de prélèvement. La variabilité des teneurs en phosphore des digestats d'IAA est en revanche plus probablement liée à des types d'effluents ou déchets différents.

Les données fournies par l'AAMF ont été ajoutées à la représentation des moyennes des analyses répertoriées dans la synthèse ADEME/RITTMO 2011 (Figures 14 à 17).

Les abréviations pour les digestats d'AAMF sont :

- LFP – AAMF : digestats issus **majoritairement de lisiers/fumiers porcins** avec des co-substrats végétaux, éventuellement des graisses
- LFB – AAMF : digestats issus **majoritairement de lisiers/fumiers bovins** avec des co-substrats végétaux, éventuellement des graisses

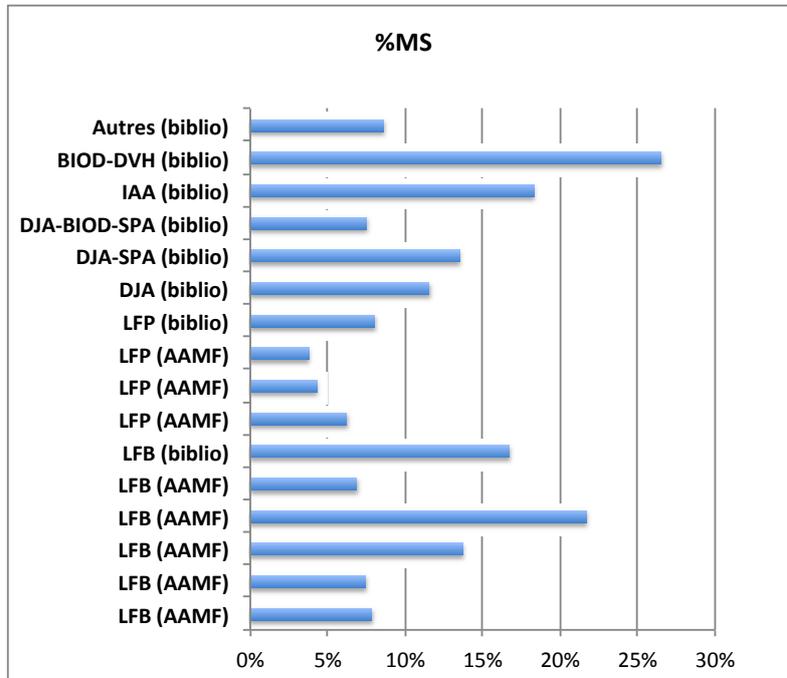


Figure 14: Teneur moyenne en MS (% de MB) des digestats en fonction du type de substrats (source : issu Synthèse ADEME/RITTMO 2011 et analyses AAMF 2012)

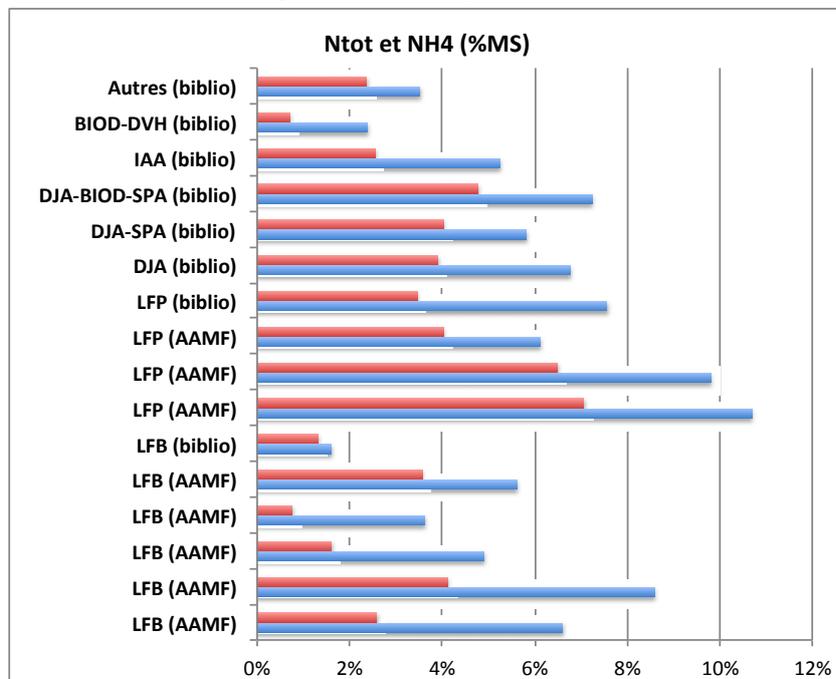


Figure 15: Teneur moyenne en N_{tot} (bleu) et NH₄ (rouge) (en % de la MS) des digestats en fonction du type de substrats (source : issu Synthèse ADEME/RITTMO 2011 et analyses AAMF 2012)

L'analyse des données montre que les teneurs en MS mesurées dans les digestats des AAMF sont inférieures à celles observées dans la bibliographie. En revanche, les teneurs en N, P et K sont supérieures (ou égales pour le P dans les LFB) dans les digestats des AAMF. Les taux de NH_4/N_{tot} sont importants dans les digestats et varient entre 48% et 67% sauf pour les digestats de biodéchets et déchets verts pour lesquels ce taux est de 30%.

Bien que donnant des tendances, ces résultats restent critiquables car, là encore, les moyennes présentées agrègent des mesures réalisées sur des lisiers et sur des fumiers. La comparaison des données agrégées et dissociées dans le Tableau 4 montre bien l'écart important et attendu entre les mesures faites sur les lisiers bovins (5-20% de NH_4/N_{tot}) et celles effectuées sur les fumiers bovins (40-60% de NH_4/N_{tot}).

Tableau 4: Rapport NH_4/N_{tot} des digestats en fonction des substrats entrant en méthanisation

| Type substrats entrants | Moyenne NH_4/N_{tot} (données AAMF uniquement) | Moyenne NH_4/N_{tot} (biblio) |
|---------------------------------|--|---|
| LFB (Bovin) | 48% (41%) | Fumier bovin : 5-20% Lisier bovin : 40-60% |
| LFP (Porcin) | 61% (66%) | Lisier porcin : 70% |
| DJA (mélange déjections) | 64% | - |
| IAA | 49% | - |
| BIOD-DV | 30% | - |
| Autres | 67% | - |

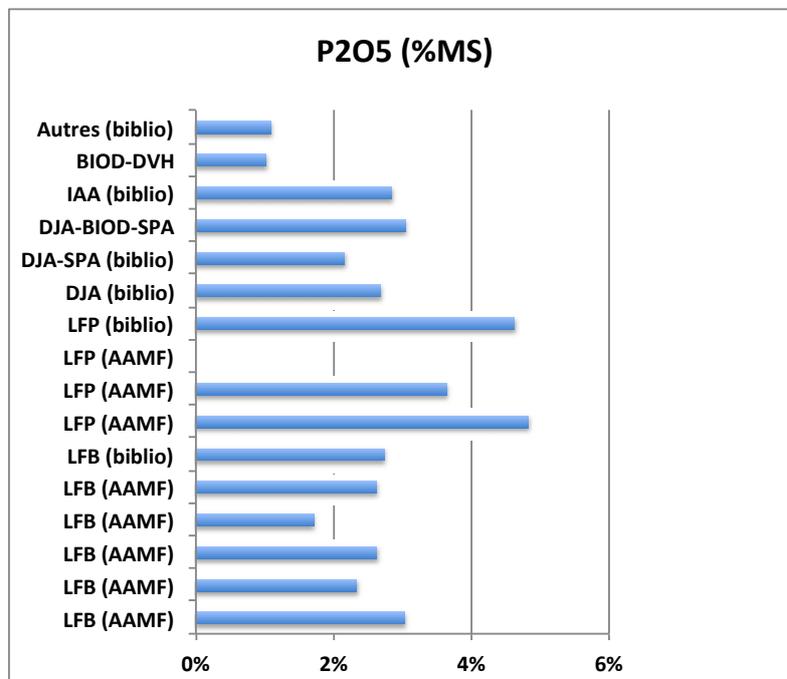


Figure 16: Teneur moyenne en P_2O_5 (en % de la MS) des digestats en fonction du type de substrats (source : issu Synthèse ADEME/RITTMO 2011 et analyses AAMF 2012)

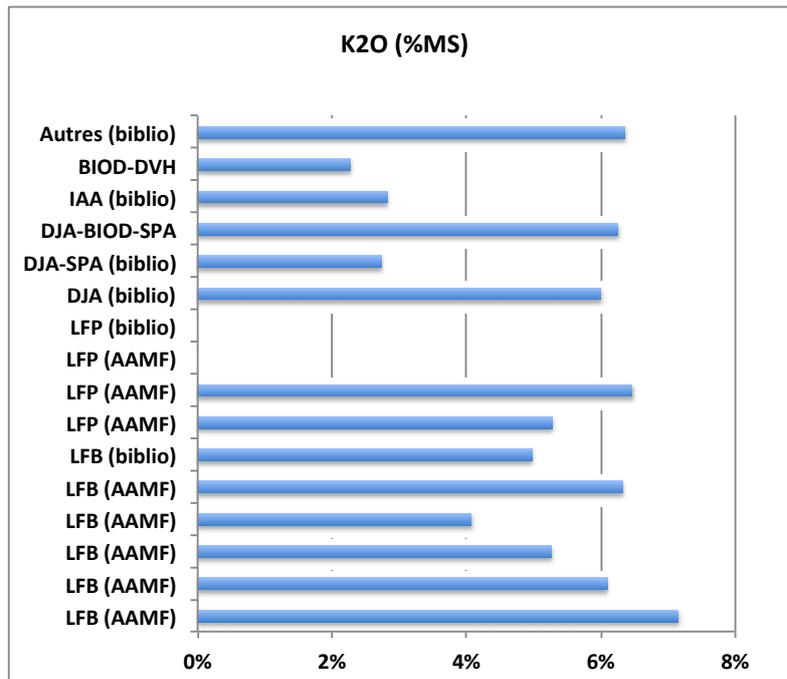


Figure 17: Teneur moyenne en K₂O (en % de la MS) des digestats en fonction du type de substrats (source : issu Synthèse ADEME/RITTMO 2011 et analyses AAMF 2012)

Ainsi, d'une manière générale les digestats français présentent (Tableau 5) :

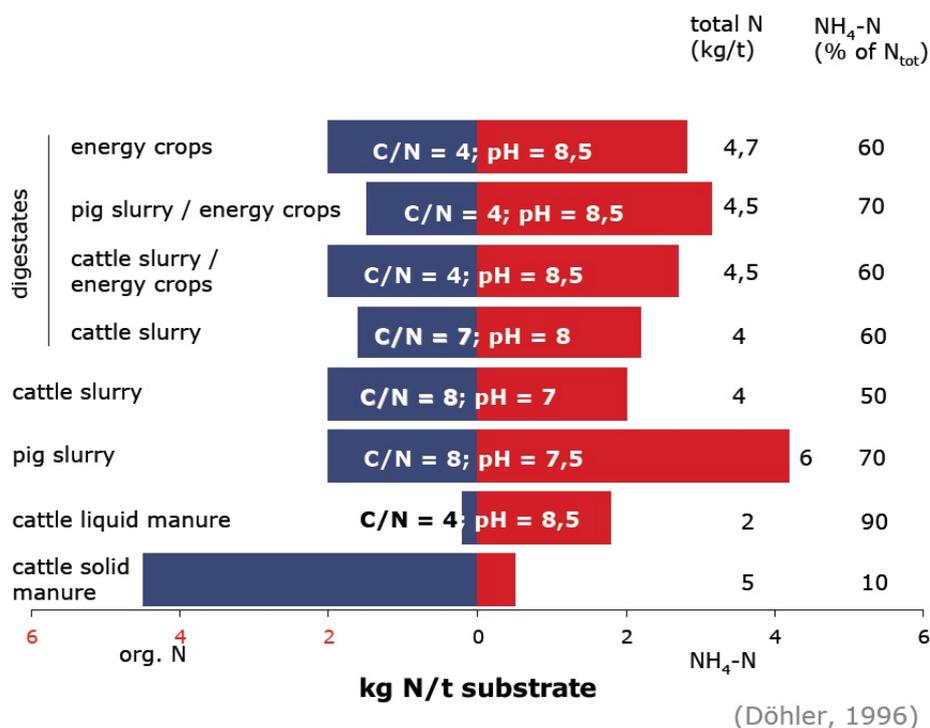
- un pH basique entre 7 et 8
- des teneurs variables en N en fonction des intrants, pouvant aller de 1 à 240 g d'azote total réduit / kg de MS pour des digestats de fumiers bovins et des digestats de lisiers porcins, respectivement.
- des teneurs variables en P en fonction des intrants, pouvant aller de 0,5 à 50 g de phosphore (P) / kg de MS pour des digestats de biodéchets et des digestats de déjections animales, respectivement.
- une proportion en azote ammoniacal pouvant représenter jusqu'à 65% de l'azote total des digestats bruts ou de la fraction liquide des digestats.

Tableau 5: Données de composition moyenne et/ou minimum-maximum des digestats français qu'ils soient bruts, solides ou liquides (Attention, à part le pH, C/N et MS, les valeurs sont données en g / kg de MS) (D'après Synthèse ADEME/RITMO 2011)

| Type de digestat | pH | C/N | MS | NTK | N-NH4 | P | K | Mg | Ca |
|---|-------------------|--------------------|--------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------|------------------------|
| | | | en % de MB | en g / kg de MS | | | | | |
| Digestats de déjections animales (DA) | 8 (7,1-8,5) | 5,9 (4,5-7,4) | 11,5 (1,7-41,6) | 67,59 (20,1-160) | 39,04 (0,93-120,59) | 11,68 (0,92-50,23) | 42,55 (3,26-109,28) | 3,56 (1,87-4,84) | 25,06 (19,65-33,56) |
| Digestats de DA & sous-produits animaux (SPA) | 7,6 (7,1-8) | - | 13,5 (4,6-27,5) | 58,13 (19,8-94,3) | 40,24 (22,65-53,04) | 9,40 (4,94-17,92) | 19,36 (4,95-70,84) | 2,20 (1,2-4,76) | - |
| Digestats de DA & SPA & biodéchets | 8 (7,7-8,2) | - | 7,5 (4,3-18,5) | 72,41 (43,1-97,5) | 47,62 (13,3-88,32) | 13,28 (8,6-17,39) | 44,31 (31,11-65,72) | 5,90 (4,47-9,03) | 25,59 |
| Digestats d'IAA | 7,7 (3,7-12,6) | 10,1 (5-17) | 18,3 (2,6-49) | 52,4 (8,1-172,6) | 25,51 (0,4-128,57) | 12,41 (0,89-40,15) | 20,04 (0,28-101,47) | - | 76,09 (3,7-285) |
| Digestats de Lisier / Fumier bovin | 7,7 (6,2-8,7) | 16,4 (3-34) | 16,7 (4,4-34) | 15,97 (1,1-64,9) | 13,17 (0,19-32,1) | 11,94 (2,05-25,04) | 35,31 (10,34-80,96) | 4,99 (0-10,55) | - |
| Digestats de Lisier / Fumier porcin | 7,7 (6,4-9,9) | 2,1 (0,3-4) | 8 (1-42,2) | 75,43 (1,5-240) | 34,53 (0,13-166,15) | 20,19 (0,79-42,3) | 144,80 (134,2-155,4) | - | 64,86 (49-75,5) |
| Digestats Autres | 7,5 (7,4-8,2) | 19,1 (3,7-38,5) | 8,6 (2,5-20,3) | 35,13 (13,2-102) | 23,64 (1,05-70,12) | 4,77 (1,48-10,1) | 45,10 (12,2-185) | 2,73 (0,96-5,85) | - |
| Digestats de déchets verts & biodéchets | 7,8 (7,5-8,3) | 18 (5,8-39,3) | 26,5 (4,5-54,5) | 23,74 (8,4-55,5) | 7,15 (0-31,46) | 4,43 (1,96-7,41) | 16,07 (4,99-41,1) | 4,20 (1,9-7,5) | - |
| Digestats de biodéchets | 8,2 (7,8-8,5) | 18,2 (3,1-45,7) | - | 49,49 (3,8-98) | 15,88 (2-35) | 14,13 (0,44-25,75) | 68,44 (4,61-173,14) | 12,00 | 32,02 |
| Digestats de boues urbaines | 8,7 (7-12,7) | 26 (2,1-86,6) | - | 55,38 (4,34-21,9) | 5,93 (0,55-36,6) | 21,17 (2,85-55,03) | 3,04 (0,16-20,58) | 4,20 (0,37-8,04) | 83,96 (7,01-283,74) |

Quelques travaux soulignent les différences essentielles entre un substrat brut et un digestat issu de ce même substrat (Figures 18) :

- Le pH est plus élevé (basique) pour le digestat
- Le taux de $\text{NH}_4/\text{N}_{\text{tot}}$ est plus élevé pour le digestat suite à la minéralisation de l'azote
- Le C/N est plus faible pour le digestat suite à la dégradation de la matière organique



Properties of undigested and digested cattle slurry

| | | Cattle slurry | | Digested cattle slurry |
|-----------------------------------|---------|---------------|---|------------------------|
| Dry matter | % FM | 8,9 | | 6,0 |
| pH | - | 7,3 | | 7,9 |
| C/N ratio | - | 10 | | 6 |
| N_{total} | kg/t FM | 4,0 | = | 4,1 |
| $\text{NH}_4\text{-N}$ | kg/t FM | 2,2 | | 2,5 |
| $\text{NH}_4\text{-N}$ of total N | % | 53 | | 62 |
| P_2O_5 | kg/t FM | 1,7 | = | 1,8 |
| K_2O | kg/t FM | 5,0 | = | 5,3 |

(Döhler 1989, Döhler and Haring 1989; Meßner 1988)

Figure 18: Comparaison des caractéristiques principales de déjections bovines et porcines avec leurs digestats correspondant. Graphe du haut, azote organique en bleu et azote ammoniacal en rouge (d'après Döhler 1989 et 1996, Döhler et Haring 1989 et Meßner 1988)

4.1.2 Les conseils d'utilisation du digestat

Aujourd'hui, étant donné les quantités de digestats en jeu, des conseils d'utilisation des digestats sont donnés, on citera notamment :

- Directive suisse 2010. Conseils d'utilisation : digestat liquide = lisier, digestat solide = fumier. Limiter la volatilisation de l'ammoniac : pendillard (Tableau ci-dessous)

| Parts de marché | 5% | 15% | 60% | 15% | 5% |
|---------------------|----------|--------|-------------|-----------------------------|--------------------|
| Groupes de produits | Digestat | | Kompost | | |
| Catégories | Liquide | Solide | Agriculture | Horticulture de plein champ | Cultures sous abri |
| Engrais | X | X | X | X | X |
| Amendements de sol | | (X) | (X) | X | X |
| Grandes cultures | X | X | X | X | X |
| Cultures spéciales | | (X) | (X) | X | X |
| Remise en culture | | | (X) | X | X |
| Horticulture | | | | X | X |
| Jardinage amateur | | | | (X) | X |
| Terres et substrats | | | | (X) | X |
| Cultures sous abri | | | | (X) | X |

Légende: ■ Domaine d'application recommandé sans restriction
■ Domaine d'application recommandé sous réserve de restrictions énoncées dans les recommandations d'utilisation
■ Domaine d'application non recommandé

- Le LfL (Institution bavaroise pour l'Agriculture) propose un guide d'utilisation du digestat comme fertilisant (Biogashandbuch Bayern - Materialienband, Kap. 2.2.7, Stand Dezember 2009) (Tableau ci-dessous).

| | JUL | AUG | SEP | OKT | NOV | DEZ | JAN | FEB | MÄR | APR | MAI | JUN |
|---------------------------|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Weizen, Triticale, Roggen | | | 1) 2) | | | | | | | | | |
| Wintergerste | | | 1) 2) | | | | | | | | | |
| Hafer, Futtergerste | | | | | | | | | | | | |
| Winterraps | | | 1) 2) | | | | | | | | | |
| Silo, Körnermais | | | | | | | | | | | | 3) |
| Zucker-, Futterrüben | | | | | | | | | | | | |
| Kartoffeln | | | | | | | | | | | | 3) |
| Feldgras | | | | | | | | | | | | |
| Wiesen, Mähweiden | | | | | | | | | | | | |
| Zwischenfrüchte | | | 4) | | | | | | | | | |
| Strohrotte | | | 4) | | | | | | | | | |

■ gute Ausnutzung ■ weniger gute Ausnutzung

- 1) nur wenn N-Bedarf vorhanden, sofortige Einarbeitung.
 - 2) maximal 40 kg Ammonium-N oder 80 kg Gesamtstickstoff/ha.
 - 3) im März mit Nitrifikationshemmer, sofortige Einarbeitung.
 - 4) maximal 40 kg Ammonium-N oder 80 kg Gesamtstickstoff/ha, sofortige Einarbeitung
- KTBL (2008), Betriebsplanung Landwirtschaft 2000/2009, 752 S

- La chambre d'agriculture des Deux-Sèvres (79) donne des grandes lignes sur la composition des digestats, les périodes propices à l'épandage et des conseils matériels.
- Le guide FNR (2010) donne des indications sur les périodes d'épandage et les doses à apporter avec du digestat.

4.1.3 Valeur fertilisante azotée

4.1.3.1 Données issues de la bibliographie

De nombreuses études ont été réalisées, elles donnent des résultats très variés selon le type de digestat utilisé et les cultures testées. De plus, la mise en œuvre des essais diffère aussi beaucoup d'une étude à une autre, rendant les comparaisons difficiles.

D'après le KTBL (Döhler 2010), pour des digestats agricoles de déjections/matières végétales, l'efficacité de l'azote est équivalente à celle du lisier de porcs.

En termes d'efficacité, le LfL (2009) constate que sur plusieurs années, la fertilisation avec 26 m³ de digestat brut par hectare, permet de produire autant qu'avec une fertilisation minérale à 53 kg N/ha. Pourtant, des essais allemands (chambre d'Agriculture du NordRhein – Westfahlen - Berendonk, 2011) sur 3 ans montrent qu'un digestat issu de déjections animales et un lisier non digéré n'atteignent pas l'efficacité des fertilisants minéraux, mais leur efficacité sur prairies est équivalente (15 kg MS/kg N apporté).

Une étude norvégienne (Haraldsen et al, 2011) montre que sur orge, l'efficacité du digestat liquide issu de la séparation de phase de digestat de biodéchets est équivalente à un fertilisant minéral, dès lors que la même quantité d'azote minéral (NH₄) est apportée.

Birkmose (2009) montre que le coefficient d'équivalent engrais (CEE) d'un lisier de porcs digéré est équivalent à celui de la fraction liquide d'un lisier de porcs non digéré, de l'ordre de 82-83%, contre 74% pour un lisier de porcs brut et 52% pour du lisier de bovins (Figure 19).

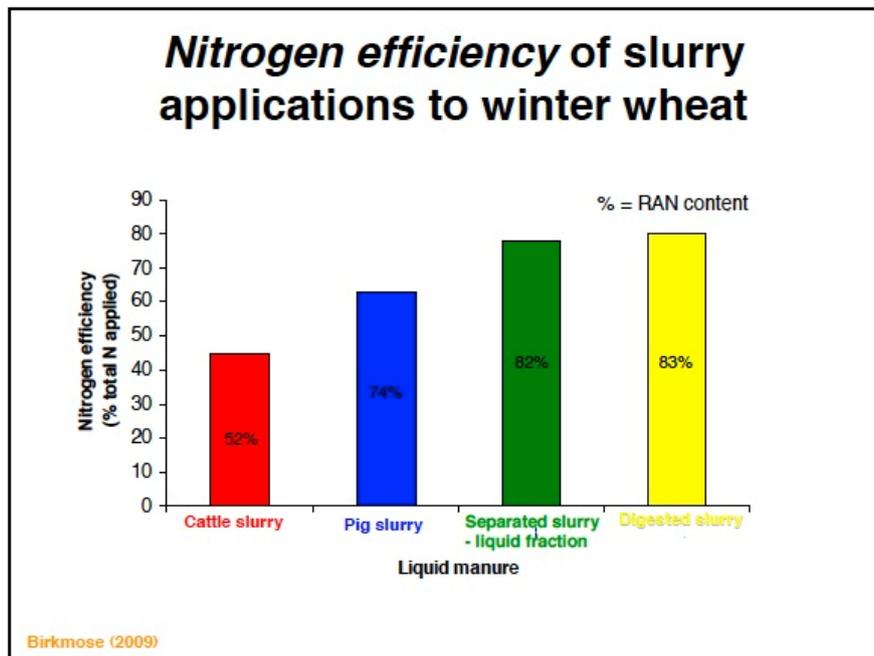


Figure 19: Coefficient d'équivalent engrais azoté de digestat de lisier de porc sur blé d'hiver (Birkmose, 2009)

Des essais allemands de 2010 (Chambre d'agriculture du Niedersachsen) montrent en revanche que pour le blé d'hiver, le CEE de plusieurs digestats est plus faible que celui du lisier de porc. Pour le maïs ensilage au contraire, le CEE de certains digestats est équivalent ou plus élevé que celui du lisier de porcs seul et se rapproche de l'engrais minéral (Figure 20).

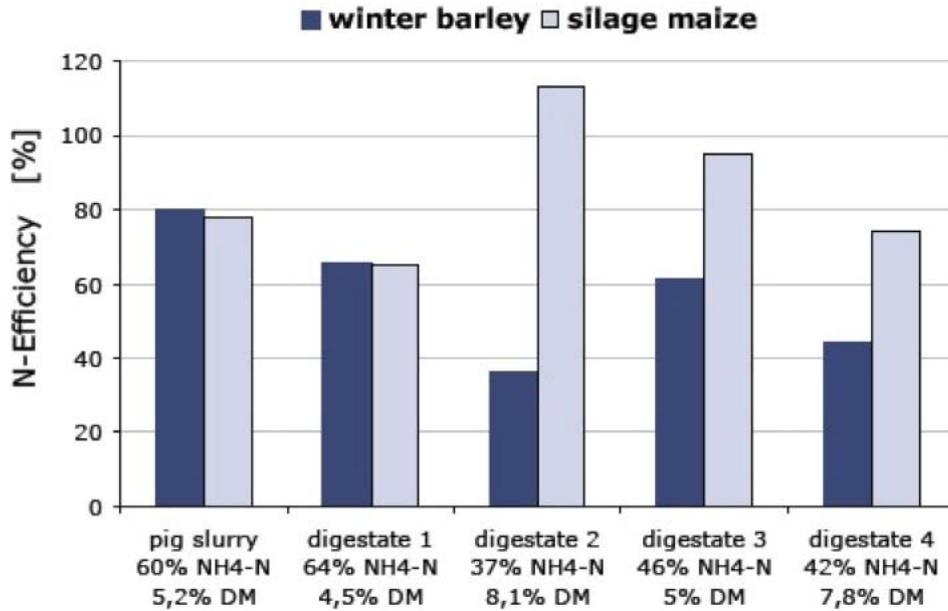


Figure 20: Coefficient d'équivalent engrais azoté de digestats de matières végétales (essais aux champs, LWK Niedersachsen, 2010)

Schröder et al (2007) montrent que, par rapport à un lisier de bovins non digéré, l'efficacité de l'azote du digestat du même substrat est plus importante la première année mais qu'elle augmente peu les années suivantes (Figure 21).

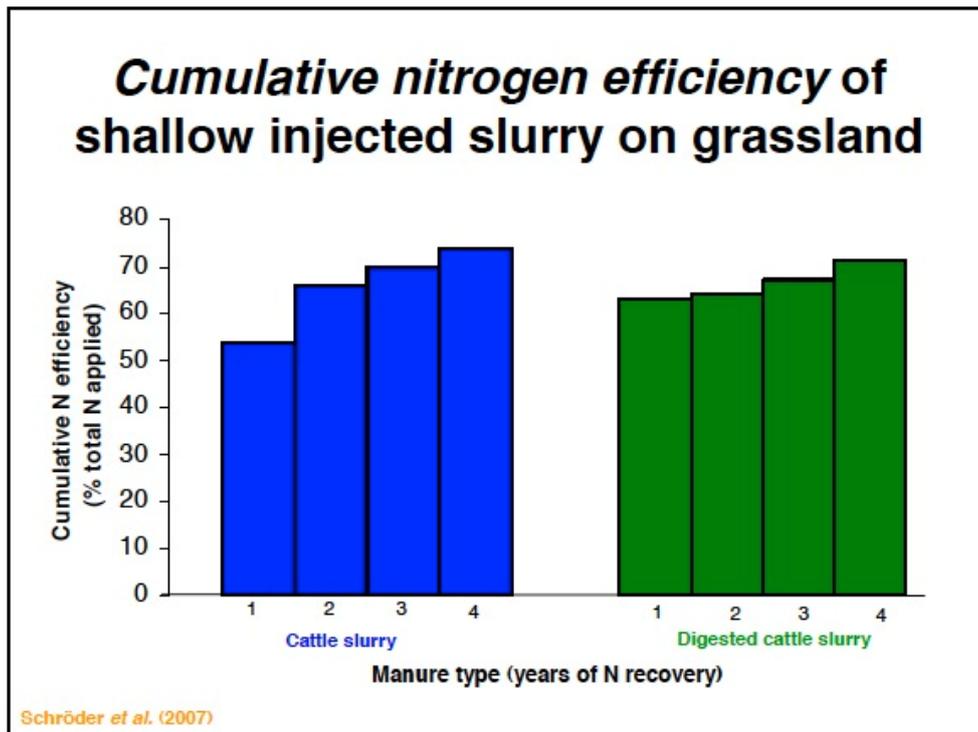


Figure 21: Coefficient d'équivalent engrais azoté de digestats de lisier bovin sur prairie (Schröder et al 2007)

Les études allemandes (Gutser et al., 2005) et danoises (Sorensen, 2008) (figures 22 et 23) montrent que la disponibilité de l'azote exprimée en CEE est plus importante la première année d'utilisation dans le cas de lisier digéré que de lisier brut.

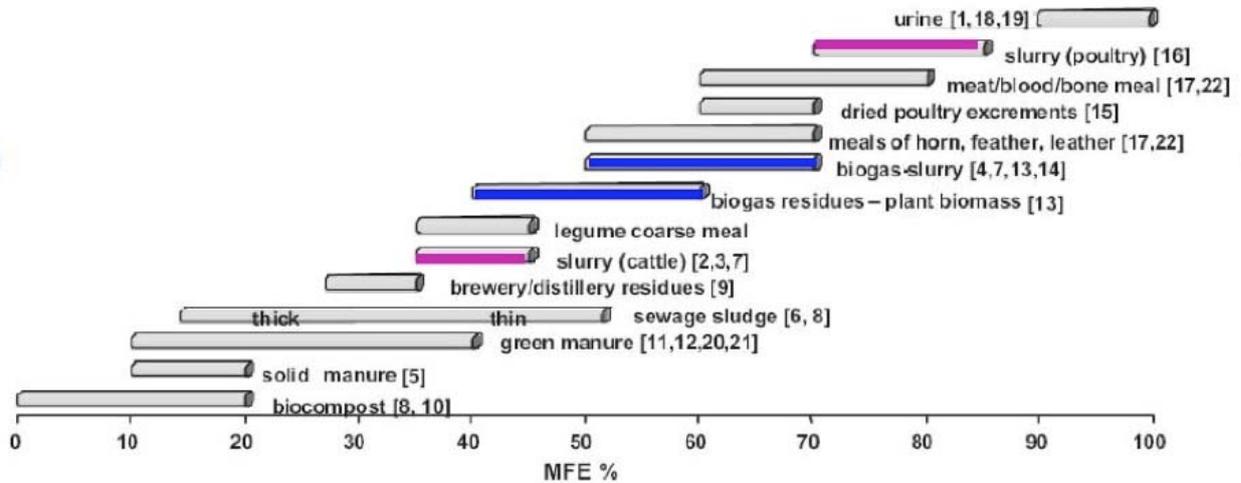


Figure 22: Coefficient d'équivalent engrais minéral azotée (en %) l'année d'utilisation (d'après Gutser et al, 2005)

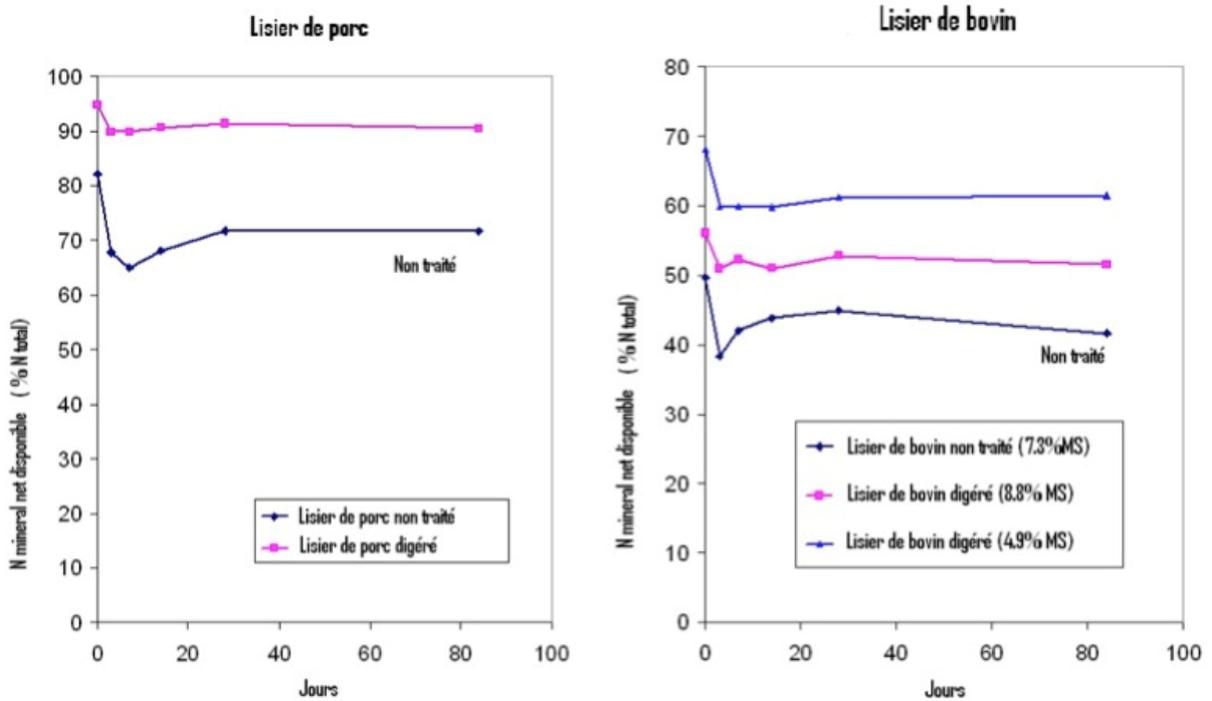


Figure 23: Disponibilité de l'azote issu de lisier et digestat de porc et bovin, la première année, après application sur sol sablonneux (Sorensen, 2008)

Une source allemande (Efficient Düngen, 2011), fait état d'un CEE pour un digestat issu de matières végétales de 40-60%, et celui d'un digestat issu de co-fermentation déjections animales/matières végétales/SPA, plus riche en NH_4 , de 50-70% (Tableau 6)

Tableau 6: Coefficient d'équivalent engrais minéral azoté de déjections animales et digestats (Efficient Düngen, 2011)

| Fertilisant organique | N-NH ₄ (%Ntot) | C/N | CEE (%) | %MS |
|---|---------------------------|------------|--------------|----------|
| Fumier | 5-20 | 12-15 | 10-20 | 25 |
| Lisier (bovin) | 40-60 | 8 | 35-45 | 7,5 |
| Digestat (issu de matière végétale) | 35-60 | 5-8 | 40-60 | 8 |
| Digestat (issu de lisier/fumier + matières végétales et SPA) | 45-70 | 2-3 | 50-70 | 6 |
| Fumier volaille | 60-80 | 4 | 70-85 | 15 |

D'après Albert (2007), l'efficacité moyenne de l'azote exprimée en CEE est de 40 à 60% à court terme et de 60 à 70% à long terme et comparable à celles des lisiers de porcs ou de volailles (Tableau 7).

Tableau 7: Coefficient d'équivalent engrais minéral azoté de plusieurs produits résiduaux (Albert, 2007)

| CEE (en %) | Court terme | Long terme |
|-----------------------------------|--------------|--------------|
| Fumier bovin | 10-20 | 20-50 |
| Fumier porcin | 15-30 | 30-60 |
| Fumier volaille avec paille | 15-30 | 30-60 |
| Fumier volaille (sec) sans paille | 30-50 | 50-70 |
| Fumier cheval | 10-20 | 20-50 |
| Lisier bovin | 30-50 | 50-70 |
| Lisier porcin | 40-60 | 60-70 |
| Lisier volaille | 40-60 | 60-70 |
| Digestat issu de lisier | 40-60 | 60-70 |
| Eaux usées | 80-90 | - |
| Boues urbaines épaissies | 40-50 | 50-60 |
| Boues urbaines liquides | 50-60 | 60-70 |
| Compost Déchets verts | 0-10 | 10-30 |
| Compost de biodéchets | 0-20 | 20-30 |
| Farine d'os | 70-85 | 85-90 |
| Tourbe | 0-10 | 10-30 |

Des essais aux champs réalisés en France montrent des résultats du même ordre de grandeur avec des CEE de 41 à 88% (cas de digestat enfoui) (Tableau 8, Figure 24 et chapitre 5).

Tableau 8: CEE de lisiers et digestats de lisier (issu de S. Houot, CRAB Bretagne 2011)

| | RG 1 | RG2 | Blé | Maïs |
|---------------------|------|------|------|------|
| Epandage | Juin | Mars | Mars | Mai |
| CEE digestats | 20% | 55% | 73% | 55% |
| CEE lisier | 20% | - | 71% | 75% |
| CEE digestat enfoui | | | | 88% |

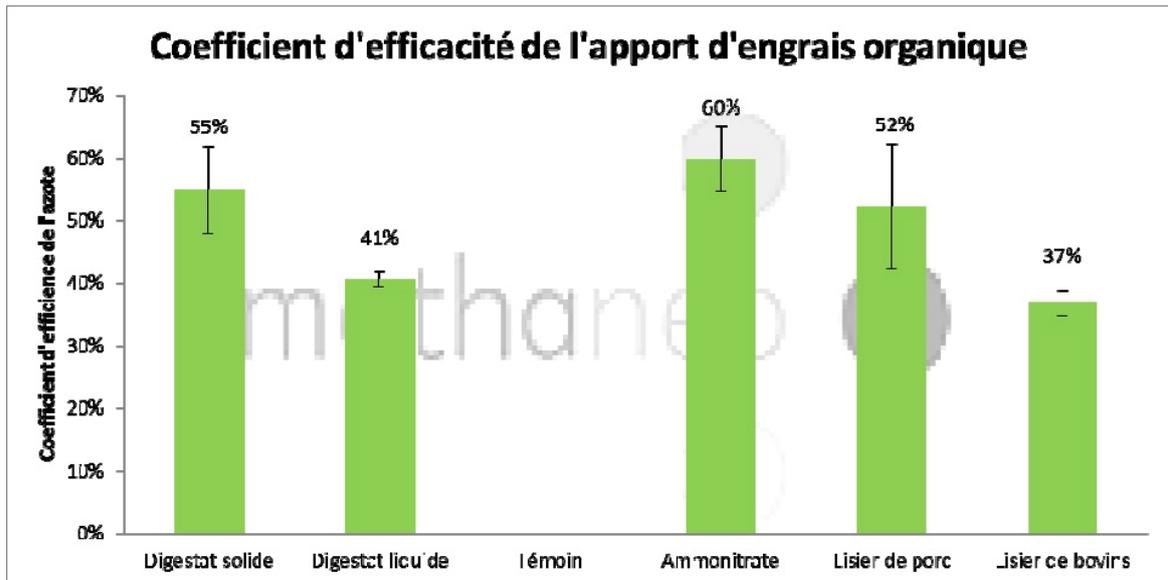


Figure 24: Essai au champ Méthanéo 2010 sur blé tendre

En conclusion, pour une grande partie des auteurs, la valeur fertilisante azotée d'un digestat équivaut à celle d'un lisier de porcs, avec un CEE variant de 40 à 70% suivant le type de substrat entrant. On trouve cependant des essais avec un gain de 20% du CEE par rapport au substrat d'origine (Sorensen, 2008) et dans le cas de digestat enfoui (CRAB, 2011).

4.1.4 Potassium

La digestion ne modifie pas les teneurs en potassium. Toutefois, cet élément se retrouve sous forme dissoute et donc est plus concentré dans la phase liquide après séparation de phase. Ainsi, il s'agira d'être vigilant pour un épandage de cette fraction sur des sols pauvres en calcium.

En outre, des essais (Möller et al., 2010) montrent que la disponibilité à court terme du potassium est plus importante pour un lisier (digéré ou non) que pour un fumier.

Marcato et al. (2008)², dans un procédé de méthanisation de lisier de porcs, montrent que la digestion anaérobie a consommé 53% de la matière organique. La plupart des éléments minéraux sont conservés sans aucune perte significative pour N, K, Fe, S, Al³⁺, Cu et Zn. La fraction azotée totale et le potassium persistent essentiellement dans la phase liquide du digestat. Cependant, des pertes significatives sont observées pour le P, Ca, Mg et Mn avec 36%, 44%, 32,5% et 32% des éléments respectifs manquant entre les intrants et le digestat. Cette perte est liée à la formation de précipités dans les conditions anaérobies du digesteur (cristallisation de phosphates de Ca et de Mg, et formation de struvite).

4.1.5 Phosphore

Pendant la méthanisation, une partie du phosphore est solubilisée dans la fraction liquide pour ensuite former des substances minérales insolubles qui précipitent au fond et sur les parois des digesteurs (struvite, hydroxyapatite). Ce phénomène conduit à des réponses très variables selon les études réalisées sur les digestats.

² Marcato, C. E., et al. (2008). "Particle size and metal distributions in anaerobically digested pig slurry." *Bioresource Technology* **99**(7): 2340-2348.

D'après le KTBL (Figure 25, Fertilizer Value of digestates from anaerobic digestion, S.Wulf, H. Döhler, H. Döhler, Managing livestock manure for sustainable agriculture, 24-25 November 2010, Wageningen), la méthanisation augmente la disponibilité du phosphore et son efficacité dans les digestats comparé aux intrants méthanisés.

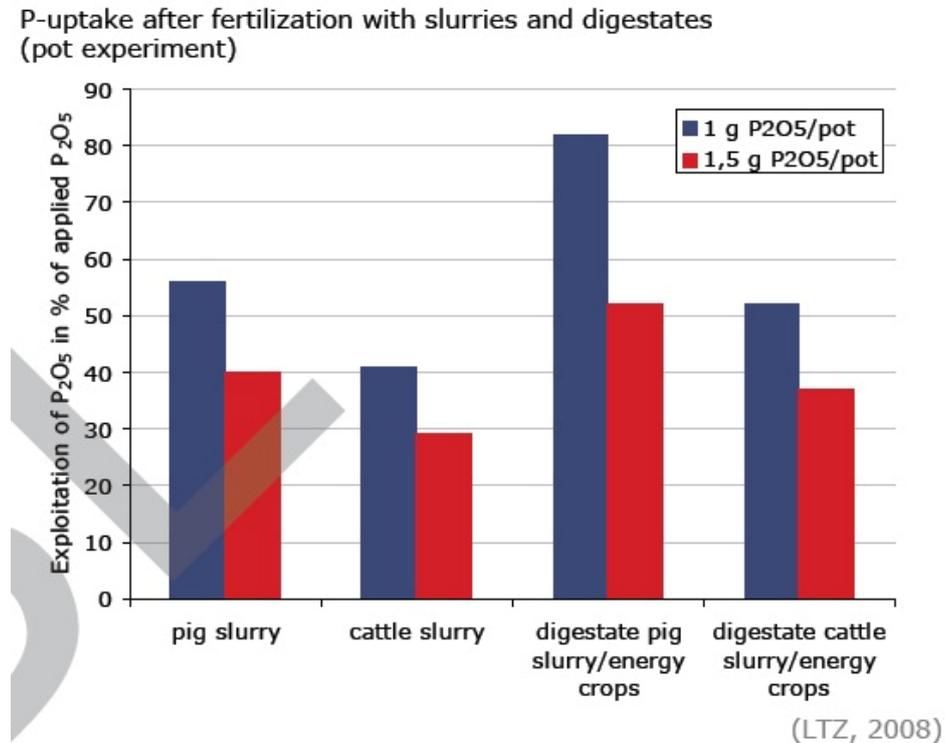


Figure 25: Disponibilité du phosphore (issu de KTBL, 2010)

Pour d'autres auteurs (Smith, 2010 – Burns et al, 1999), si ce fait semble acté, aucune donnée de suivi significative ne permet de montrer une augmentation du P soluble dans le digestat.

Pour le phosphore, d'après M. Benbrahim (2009) et dans le cas de la séparation de phase, la phase liquide qui contient des orthophosphates conserve une valeur fertilisante en phosphore plus importante que la phase solide du digestat ou qu'un compost.

Pourtant, la digestion comme le compostage, diminuent la biodisponibilité du P à court terme (Valeur Fertilisante Phosphatée ou VFP du digestat de boues urbaines : 71 ± 20 par rapport au phosphate soluble de dans l'eau : 100), par rapport au substrat non traité (VFP des boues urbaines biologiques 92 ± 16). Même si à long terme, l'équivalence entre la biodisponibilité du P de nombreux déchets organiques et celle d'une forme minérale soluble de phosphore est démontrée (Linères M. et Morel C., INRA, Recyclage et valorisation du phosphore des effluents - INSA Toulouse 23/11/2011).

Gungo et Karthikeyan (2008) ont montré que la digestion du fumier semble réduire la fraction de P biodisponible en augmentant la stabilité des phases solides retenant le phosphore (le P dissous minéralisé s'associe aux particules solides, augmentation des orthophosphates dans le fumier digéré).

Le compostage de biodéchets et des boues urbaines digérées a augmenté le P biodisponible (Odlare, 2007, issu de Synthèse ADEME/RITTMO 2011) par rapport à d'autres produits organiques (fumier, engrais minéral, digestat de biodéchets).

La compréhension des phénomènes de digestion sur le phosphore n'est pas encore clairement établie et requiert encore de nombreux travaux.

4.1.6 Humus, C/N, stabilité du digestat

D'après une étude allemande (Hermann, 2007), le digestat a une stabilité augmentée par la méthanisation comparé au produit frais. Cette observation est en accord avec une capacité de la méthanisation à produire de l'humus (Asmus und Linke, 1987, Gutser et al., 2005).

Montemurro (2008) montre que l'apport de digestat de lisier de porcs ou de digestats d'effluents viticoles pendant 2 années a permis de maintenir les niveaux de carbone humifié, de carbone organique et d'azote organique dans le sol.

Selon Kolbe (2009, issu Synthèse de l'ADEME/Rittmo 2011) le pouvoir de production d'humus du digestat est 2 fois moins important que celui du compost, mais équivalent à celui des déjections animales non méthanisées :

- Lisier = digestat liquide, soit 5 à 11 kg C-humus/t matière fraîche
- Fumier = digestat solide, soit 25 à 45 kg C-humus/t matière fraîche
- Compost mûr : 50 à 95 kg C-humus/t matière fraîche

Des essais de minéralisation du carbone dans le sol réalisés sur lisier brut et lisier digéré ont montré une réduction d'un tiers du pourcentage de minéralisation après méthanisation (Marcato, 2007, issu Synthèse ADEME/RITMO, 2011). L'hypothèse est qu'une partie du carbone a déjà été minéralisée au cours de la méthanisation, le digestat conservant la fraction organique la moins accessible aux bactéries.

La figure 26 montre les résultats des analyses de matière minérale et organique réalisées sur les digestats de l'AAMF en 2011. La méthanisation conduit à une augmentation de la fraction minérale et à une baisse du ratio C/N.

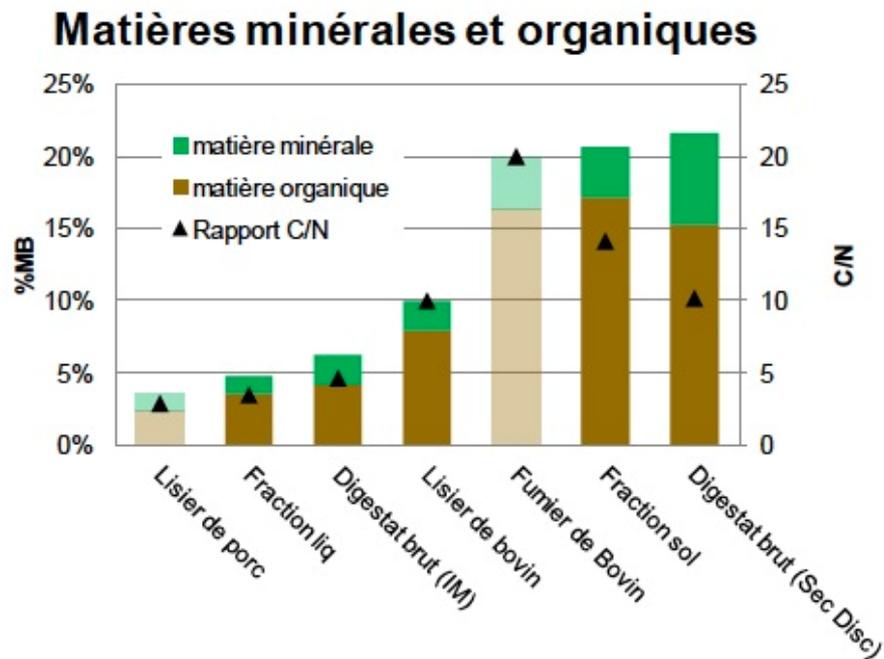


Figure 26: Analyse des fractions minérales et organiques de déjections animales et digestats (AAMF 2011)

La question de la qualité et de la stabilité biologique des digestats est primordiale dès lors que l'on souhaite les stocker et les commercialiser.

D'après une étude d'Abdullahi et al. (2008), du digestat d'OM est phytotoxique (test de germination) contrairement à ce même digestat composté pendant 70 jours.

Fuchs (2008) relève que l'activité microbienne s'intensifie dès la mise en contact du digestat avec l'oxygène. La question de la stabilité du digestat pendant la phase de stockage se pose, notamment dans le cas de la mise en marché des amendements organiques.

Des études sont en cours pour définir des indicateurs de stabilité et déterminer à partir de quand :

- un digestat issu du traitement de déchets biodégradables est stable
- un digestat ayant subi un compostage peut être considéré comme un compost.

Les travaux de l'INRA (Lashermes et al., 2009) montrent que l'indicateur de potentiel humique ISMO³ de 6 digestats est supérieur à celui des autres produits résiduaux organiques étudiés (plus de 400 analyses de 10 grandes classes de PRO). Ces résultats ont besoin d'être confirmés par un plus grand nombre d'analyses.

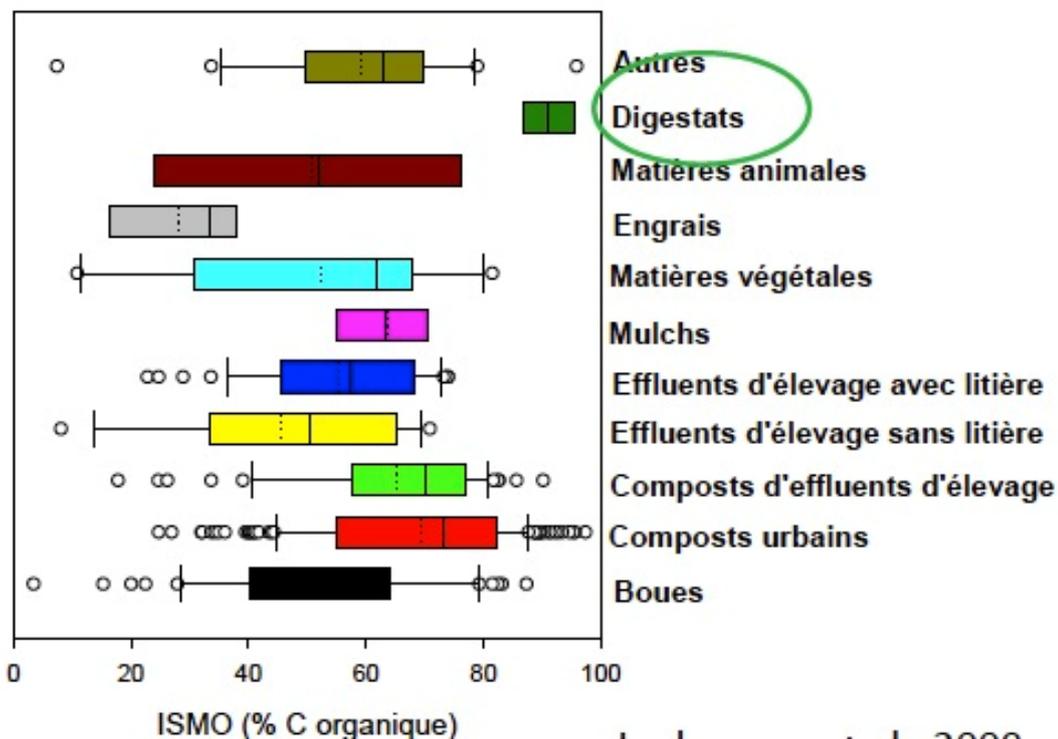


Figure 27: Valeur ISMO de différents produits résiduaux organiques

A ce jour, le critère retenu dans la Directive suisse 2010 comme seuil minimal de stabilité s'élève à 0,6 g NH₄/kg MS. Un produit est considéré comme compost lorsqu'il contient moins de 0,6 g NH₄/kg MS. Pour comparaison, les digestats solides contiennent de l'ordre de 4 à 13 g NH₄/kg MS.

D'après les travaux de C. Téglia (2011), la digestion anaérobie réalisée sur différents substrats stabilise incomplètement la matière organique. Certains digestats étudiés se sont révélés phytotoxiques en application directe sur les sols.

Ces travaux ont également mis en évidence que la fraction de C soluble à l'eau est un bon indicateur de biodégradabilité résiduelle.

³ ISMO, indicateur de potentiel humique, mesuré en % de C organique, basé sur le fractionnement biochimique de la MO et la minéralisation en temps courts). Utilisé pour les amendements organiques.

Des indicateurs de stabilité biologique sont listés dans le tableau ci-dessous (issu de C.Téglià, 2011).

| Respiratory index | Biological stability limit |
|------------------------|--|
| AT ₄ | 5 mgO ₂ /gDM |
| AT ₄ | 10 mgO ₂ /gOM |
| DRI | 1,000 mgO ₂ /kgOM/h |
| OUR | 1 mgO ₂ /gOM/h |
| Self-heating potential | 0–10°C ⇔ very stable and mature compost |
| | 10–20°C ⇔ moderately stable compost in maturation |
| | 20–30°C ⇔ active compost in fermentation |
| | 30–40°C ⇔ fresh compost at the beginning of fermentation |
| | 40–50°C ⇔ raw wastes |
| GB ₂₁ | 20 NI/kgDM |
| BMP ₂₁ | 10 NI/kgDM |
| BI | 10 d ⁻¹ /kgDM |

Concernant la stabilité des digestats et le potentiel d'humification, il semble nécessaire d'établir un ou plusieurs indicateurs pour caractériser et comparer les différents substrats. Le seuil minimal d'indicateur de stabilité proposé dans le cadre du règlement End-of-Waste de la Commission Européenne (2012) s'élève à 1500 mg d'acides organiques totaux/litre de digestat.

4.1.7 Effet sur les propriétés biologiques du sol

Plusieurs études (Synthèse ADEME/RITTMO 2011) constatent que le digestat a des effets bénéfiques sur les propriétés biologiques du sol par rapport à des produits organiques classiques (compost, déjections animales non traitées) :

- augmentation de l'activité respirométrique
- augmentation de l'activité nitrifiante des micro-organismes
- augmentation de la biomasse bactérienne et de l'activité enzymatique
- capacité d'échange cationique
- les actions sont équivalentes voire supérieures à celles des composts

Jacques G. Fuchs (2008, CODIS) montre que le compost et le digestat de biodéchets augmentent la valeur du pH et améliorent l'activité biologique du sol. Il conclue à l'amélioration de la croissance des végétaux avec la maturité du produit, un compost mûr présente néanmoins de meilleurs résultats que les digestats. Toutefois, il note une très grande variation d'un produit à l'autre.

Les résultats des tests sur plusieurs types de composts et de digestats (101 échantillons de biodéchets séparés à la source) montrent que les différences observées sur la croissance des plantes et la fertilité du sol dépendent plus de l'exploitation du procédé (compostage ou méthanisation) que des intrants eux-mêmes. Si la concentration en nutriments, en ETM et en sels dépend des intrants, la densité, la matière organique, les activités biologique et enzymatique et la phytotoxicité dépendent de la maturité du produit. Fuchs soulève la problématique d'immobilisation de l'azote observée pour des composts jeunes et pour des

digestats ayant subi un séchage (et donc ayant perdu l'azote ammoniacal que l'on retrouve en grande concentration dans le digestat brut).

4.1.8 Effet sur les propriétés physiques du sol

Il existe peu de données sur ces questions, seules quelques études (Synthèse ADEME/RITTMO 2011) concluent que la fertilisation avec du digestat liquide a une influence positive sur la structure du sol et sa faune (rétention en eau, population, densité, porosité).

En revanche, l'utilisation inappropriée du digestat liquide peut entraîner des dégâts sur les sols (acidification, destruction des agrégats du sol...), notamment l'usage de digestat liquide sur des sols pauvres en calcium du fait de l'effet négatif du potassium, que l'on retrouve totalement sous forme soluble dans la phase liquide.

D'après Bermejo et al (2010), la population de vers de terre, un mois après l'application de fertilisants, est la plus élevée pour les lisiers et fumiers, à C/N plus élevé. Le fait que la matière organique facilement dégradable soit moins accessible pour le digestat ainsi qu'un pH et une concentration de NH_4 plus élevés pourrait expliquer que la quantité de vers de terre soit moins importante après épandage de digestat. Ces résultats nécessitent toutefois d'être validés par d'autres expérimentations.

4.2 Emissions à l'atmosphère

4.2.1 Volatilisation de l'azote

D'après la Synthèse ADEME/RITTMO (2011), l'introduction d'une étape de digestion anaérobie dans un élevage n'aurait que peu d'impact sur les émissions. La méthanisation et le stockage des digestats étant considérés peu émetteurs par rapport à l'épandage et aux bâtiments. De plus, une solution simple de réduction est d'intégrer une couverture de silos. Toutefois, les données diffèrent selon les auteurs et les émissions varient de 5 à 40% de NH_3 par N_{total} . Au total, de 0 à 17% d'augmentation en termes d'émissions sont envisageables sur un projet de méthanisation (digestion et épandage) par rapport à un système sans méthanisation.

D'après Masse et al (2007, issu de Synthèse ADEME/RITTMO 2011) les pertes par volatilisation d'un digestat de fumier de porcs sont identiques à celles de fumiers non digérés. Ces résultats viendraient d'une plus faible viscosité du fumier digéré qui accroît l'infiltration dans le sol. Ces travaux sont en accord avec ceux de Chantigny et al (2004) qui concluent que la digestion anaérobie ne modifie pas significativement la proportion d'azote qui est perdue sous forme de NH_3 entre un lisier et un lisier digéré. Le digestat perdrait même moins d'azote par volatilisation comparativement au lisier non digéré (Tableau 9, Chantigny, 2010), notamment la volatilisation est plus faible les jours suivant l'épandage avec le digestat qu'avec le lisier non digéré.

Tableau 9: Caractérisation d'un lisier digéré et non digéré (issu de S. Houot, Chantigny et al, 2010)

| | Lisier brut | Lisier digéré |
|--------------------|-----------------|-----------------|
| MS (g/L) | 59 | 33 |
| N (g/L) | 6.8 (70% N-NH4) | 5.9 (81% N-NH4) |
| N perdu (% Ntotal) | 22.3% | 18.1% |
| N perdu (%N-NH4) | 34.0% | 23.4% |

Le KTBL souligne également ce double effet :

- pH élevé -> N-NH₃ élevé -> risque de pertes par volatilisation élevé
- teneur en MS plus faible -> viscosité plus faible -> diminue le risque de pertes

Le KTBL conseille donc la prise en compte de ces risques, comme pour les lisiers, et de mettre en place les conditions spécifiques d'épandage, notamment dans des conditions climatiques particulières (température chaude, vent fort) ou avec l'utilisation de digestat de cultures énergétiques à forte teneur en MS. Il conseille l'utilisation de pendillard à minima et l'incorporation dans le sol qui reste la solution la plus efficace pour limiter les pertes.

Ces constatations et conseils ont également été établis par la Chambre d'Agriculture de Bretagne sur des essais d'épandage réalisés en 2010 et 2011.

4.2.2 Odeurs

Les lisiers et fumiers digérés génèrent moins d'odeurs que les substrats non digérés (Synthèse ADEME/RITTMO 2011).

Cette constatation est également faite par la Chambre d'Agriculture de Bretagne sur des essais d'épandage réalisés en 2010 et 2011.

Toutefois cette assertion repose presque exclusivement sur des « dire d'experts ».

4.3 Innocuité

4.3.1 Pathogènes et indicateurs fécaux

La synthèse des analyses de digestats réalisée (Synthèse ADEME/RITTMO 2011) montre que 37% des digestats issus de substrats agricoles sont classés « douteux » sur les entérobactéries, salmonelles, *E. coli*, *Clostridium perfringens*, *Listeria*, les campylobactéries et les entérocoques.

Une étude autrichienne (Singer, 2005, issu Synthèse ADEME/RITTMO 2011) a mis en avant le fait que l'introduction de biodéchets en amont de la méthanisation impliquait la présence d'entérobactéries dans le digestat. De même, les digestats de toutes les installations traitant des graisses ou huiles alimentaires présentaient des salmonelles. L'étude met en avant l'importance d'une hygiénisation dès lors que de tels intrants sont traités.

4.3.1.1 La réduction des indicateurs fécaux et pathogènes en méthanisation

Coleran (2000) et Bendixen (1999) préconisent une pasteurisation en amont de la méthanisation dès lors que des substrats issus de déchets humains ou d'autres exploitations agricoles sont introduits dans le méthaniseur.

Plusieurs étapes de la filière de méthanisation peuvent participer à la réduction du nombre d'indicateurs fécaux et pathogènes dans les digestats comparé aux intrants.

Sur des essais sur fumiers de bovins au Québec (A. Crolla, 2007), la réduction des pathogènes varie de 70 à 95% par rapport au substrat non digéré (Tableau 10). Même si ces valeurs paraissent importantes, elles ne sont pas suffisantes pour hygiéniser des intrants fortement contaminés.

La réduction des pathogènes est plus rapide en méthanisation thermophile (55°C) que mésophile (35 à 40°C) (Tableaux 11 et 12)

La concentration des bactéries indicatrices et des pathogènes diminue encore dans le cas de la présence d'un post-digesteur (Singer, 2005). Le stockage de digestat liquide pendant un mois permet aussi une diminution importante des germes pathogènes.

Tableau 10: Réductions des agents pathogènes sur fumier de bovin (Anna Crolla et Chris Kinsley, Université de Guelph, projet AAC-E TEA, Québec, 2007)

| Pathogènes | Concentrations des bactéries (cts 100mL ⁻¹) | | | | | |
|----------------------|---|---------------|------------------|---------------|---------------|------------------|
| | Digesteur Klaesi | | | Digesteur EEC | | |
| | Fumier brut | Fumier digéré | Réduction en log | Fumier brut | Fumier digéré | Réduction en log |
| <i>E.coli</i> | 3.68E+07 | 6.75E+05 | 1.74 | 4.99E+05 | 3.03E+04 | 1.22 |
| <i>Salmonella</i> | 9.92E+05 | 1.82E+05 | 0.74 | 2.12E+05 | 1.84E+04 | 1.06 |
| <i>C.perfringens</i> | 1.37E+07 | 2.90E+06 | 0.67 | 6.89E+05 | 2.97E+04 | 1.37 |
| Enterococci | 2.50E+07 | 6.84E+06 | 0.56 | 1.32E+06 | 5.97E+04 | 1.34 |



E. coli dans des échantillons de fumier non digéré



E. coli dans des échantillons de fumier digéré

Tableau 11: T90 et T99, pour différents pathogènes en méthanisation mésophile ou thermophile (Source : Biogashandbuch Bayern – Materialienband , Kap. 1.6, Stand März 2007)

| Organismus | mesophil | | thermophil | |
|---|----------------------------------|-------------------------------------|---------------------|------------------------|
| | T ₉₀ ¹ (h) | T _{99,99} ² (h) | T ₉₀ (h) | T _{99,99} (h) |
| Viren: | | | | |
| CSFV (klass. Schweinepest) | 4,8 | 19,2 | 0,03 - 0,17 | 0,12 - 0,68 |
| PRV (Aujeszky'sche Krankheit) | 4,8 | 19,2 | 0,02 - 0,18 | 0,08 - 0,72 |
| SVDV (vesikul. Schweinekrankheit) | | | 0,01 - 0,13 | 0,04 - 0,52 |
| ASFV (Afrikanische Schweinepest) | | | 0,03 - 1,11 | 0,12 - 4,44 |
| FMDV (Maul- und Klauenseuche) | 24 | 96 | 0,13 - 1 | 0,52 - 4 |
| Poliovirus | 22,32 - 32,16 | 89,28 - 128,64 | 0,03 - 0,09 | 0,12 - 0,36 |
| FCV (Felin. Calicivirus) / Norovirus | 48 | 192 | | |
| Hepatitis A Virus | | | 0,17 | 0,68 |
| Humanes Rotavirus | | | 0,12 | 0,48 |
| Bovines Rotavirus | | | 0,3 | 1,2 |
| BPV (Bovines Parvovirus) | | | 4,67 - 17,1 | 18,68 - 68,4 |
| Bakterien: | | | | |
| <i>Escherichia coli</i> , EHEC | 19,2 - 74,48 | 76,8 - 297,9 | 0,03 - 0,4 | 0,12 - 1,6 |
| <i>Salmonella</i> sp. | 21,6 - 168 | 86,4 - 672 | 0,06 - 2 | 0,24 - 8 |
| Intestinale Enterokokken (fäkale Streptokokken) | 48 - 126,24 | 192 - 744,96 | 1 - 1,7 | 4 - 6,8 |
| <i>Listeria monocytogenes</i> | 295,2 | 1180,8 | 0,28 | 1,11 |
| Thermophile <i>Campylobacter</i> | 86,4 (- 1704?) | 345,6 (- 6816?) | 0,01 - 0,04 | 0,04 - 0,15 |
| <i>Bacillus cereus</i> | 670 - 240000 | 2681 - 960000 | 824 - 100000 | 3298 - 400000 |
| <i>Clostridium perfringens</i> | 240000 - ∞ | 960000 - ∞ | 2657 - 100000 | 10629 - 400000 |
| Parasiten | | | | |
| <i>Ascaris suum</i> | 336 | 1344 | 24 | 96 |
| <i>Cryptosporidium parvum</i> | 2,0 | 7,84 | 0,78 | 3,1 |

Tableau 12: réduction des pathogènes en méthanisation mésophile et thermophile (données collectées dans Synthèse ADEME/RITTMO 2011)

| T90 | Mésophile (37°C) | Thermophile (55°C) |
|---------------------------------------|---|---|
| <i>E. coli</i> | Réduction 10 ² bactéries dans 1 g de digestat T90 : 2,4 jours Pas d'effet sur les nématodes bovins | T90 : quelques heures |
| Salmonelles | Réduction 10 ² bactéries dans 1 g de digestat T90 : 2 à 10 jours | Destruction T90 : quelques minutes |
| Streptocoques, Coliformes | Réduction 10 ² bactéries dans 1 g de digestat | Réduction 10 ⁵ bactéries dans 1 g de digestat Mais concentration dans les digestats : 10 ³ à 10 ⁵ |
| <i>Clostridium perfringens</i> | de 0 à 10 ³ UFC/g | de 0 à 10 ³ UFC/g 10 à 100 fois plus qu'en mésophile |
| <i>Bacillus cereus</i> | Résistant | résistant |
| Entérovirus, parvovirus | Résistant | Réduction |
| Spores | Résistant | résistant |

4.3.1.2 Cas des *Clostridium*

Parmi les bactéries indicatrices, les *Clostridium* ont une place particulière. Ce sont des bactéries sporulantes qui se développent naturellement dans les milieux organiques riches, anaérobies et à 37°C. Elles sont donc a priori adaptées aux conditions de fonctionnement des méthaniseurs mésophiles.

Le ministère de l'agriculture anglais (DEFRA) dans le cadre de la réglementation PAS 110 pour l'homologation des digestats établit le manque de données sur l'effet de la méthanisation sur la bactérie *Clostridium botulinum*.

L'équipe allemande de P. Weiland (FAL, 2007) a montré que la quantité de *C. Botulinum* a été réduite pendant la méthanisation de lisier de bovins.

Skillman et al. (2009) observent qu'en digestion thermophile, il existe une relation inversée entre la quantité de *Clostridium perfringens* et la production de gaz (témoin d'une activité biologique importante dans le méthaniseur).

D'après les travaux de la suédoise Bagge E. (2009)⁴, la contamination par des bactéries pathogènes non sporulées (salmonelles par exemple) à partir de l'épandage de digestat sur les terres arables, est limitée par l'utilisation de la pasteurisation (70°C pendant 1 heure). En

⁴ Bagge, Elisabeth (2009). Hygiene aspects of the biogas process with emphasis on spore-forming bacteria. Diss. (sammanfattning/summary) Uppsala : Sveriges lantbruksuniv., Acta Universitatis agriculturae Sueciae, 1652-6880 ; 2009:28 □ ISBN 978-91-86195-75-5 □ [Doctoral thesis]

revanche, l'attention doit se porter sur les territoires sans problèmes de contamination endémique de bactéries sporulées (*Bacillus cereus* et *Clostridium*). En Suède par exemple, la recommandation officielle est l'épandage de digestat sur les terres arables et pas sur les prairies destinées au pâturage.

Dans le cadre d'un projet à l'Institut Vétérinaire (TiHo) d'Hanovre, le professeur vétérinaire Gerhard Breves, a montré qu'aucune *Clostridium* pathogène n'a été retrouvée dans le digestat des 15 unités de méthanisation (traitant du lisier bovin notamment) analysées (105 analyses au total). Selon lui, le fait que la méthanisation contribue à la prolifération n'a aucune base toxicologique ni microbiologique. Toutefois, ses travaux se sont limités à une région allemande et sur une période donnée.

4.3.1.3 Recontamination, pasteurisation, chaulage

Bagge (2005) relève que, sur des digestats de biodéchets, la recontamination et la croissance des bactéries ont été notées après la pasteurisation, que celle-ci soit en amont de la digestion ou en aval.

a) Recontamination

Le phénomène de recontamination du digestat (recolonisation et croissance dans le digestat) par certaines bactéries (coliformes et entérocoques) a été mis en avant, le nombre de bactéries indicatrices détecté est toutefois inférieur à celui des intrants initiaux.

b) Pasteurisation

La pasteurisation est réalisée à 70°C pendant 1 heure, de préférence en discontinu pour la maîtrise des conditions (temps de séjour/température). Elle permet la destruction des bactéries entériques et de beaucoup de virus, mais a peu d'effet sur les spores. En effet, les spores de *Clostridium perfringens* et certains champignons peuvent survivre à une hygiénisation de 1 heure à 70°C (Leven et al., 2005).

On notera que des références bibliographiques anciennes préconisent la pasteurisation avant méthanisation. Cette approche réduit le nombre de germes entrant dans le méthaniseur et permet de garder dans le digestat une flore « naturelle ». Dans cette logique, la pasteurisation du digestat en sortie de méthaniseur est déconseillée car l'absence de germes dans le digestat laisserait libre cours à la croissance des contaminants (Keller, 1983). Il existe à ce jour trop peu d'études sur ce sujet pour donner une recommandation effective. Les références plus récentes recommandent la pasteurisation pour des intrants « douteux ».

c) Chaulage

Le chaulage permet une inhibition des bactéries entériques et la destruction rapide des salmonelles. Les boues digérées nécessitent 30% de chaux en moins pour obtenir le même effet réducteur sur les bactéries. L'apport de chaux augmente les pertes en azote (volatilisation de l'ammoniac).

4.3.1.4 Risques à l'épandage

Les essais sur fumiers de bovins au Québec (Tableau 13, A. Crolla, 2007) montrent que les concentrations en indicateurs fécaux et pathogènes qui se retrouvent dans les eaux souterraines sont équivalentes entre un épandage de fumier non digéré et celui d'un fumier digéré.

Tableau 13: Teneurs en bactéries dans les eaux souterraines (Anna Crolla, Université de Guelph, Canada, 2007)

Bacteria in Subsurface Drains

Geometric Log Mean of Pathogen Indicator Numbers in Subsurface Drains (log CFU/100 mL)

| | <i>E.coli</i> | <i>Salmonella</i> | <i>E.coli</i> | <i>Salmonella</i> |
|------------------------|--|-------------------|--|-------------------|
| 2008 | 1x Agronomic Rate (75 kg N/ha) | | | |
| Raw Manure | 1.8 ± 0.9 | 0.8 ± 0.8 | | |
| Digested Manure | 1.7 ± 0.7 | 0.9 ± 0.7 | | |
| Control (no treatment) | 1.8 ± 0.5 | 0.7 ± 0.4 | | |
| 2009 | 1x Agronomic Rate (140 kg N/ha) | | 2x Agronomic Rate (280 kg N/ha) | |
| Raw Manure | 2.8 ± 0.9 | 2.1 ± 0.9 | 3.1 ± 0.5 | 2.3 ± 0.8 |
| Digested Manure | 2.6 ± 0.* | 2.0 ± 0.8 | 3.0 ± 0.3 | 2.0 ± 0.8 |
| Control (no treatment) | 1.6 ± 0.7 | 1.2 ± 0.6 | --- | --- |

4.3.2 Hormones et antibiotiques

Il existe très peu de travaux sur ce sujet. La contamination avec des antibiotiques (digestion de lisier de porcs) a été observée, le stockage du digestat sur 100 jours permet de diminuer la concentration détectée.

Concernant les hormones, les difficultés d'extraction de ces substances sur des matrices complexes ne permettent pas de conclure. Des recherches supplémentaires sont nécessaires.

4.3.3 Pesticides

Il existe très peu de travaux sur ce sujet. Les travaux de Fuchs (2008) montrent la présence de moins de pesticides dans le compost de digestat solide de biodéchets que dans le compost (seul) de biodéchets. Des recherches supplémentaires sont nécessaires.

4.3.4 Eléments traces métalliques

Quel que soit le type de digestats identifié (Synthèse ADEME/RITTMO 2011), les teneurs en ETM sont inférieures aux seuils des normes engrais ou amendement organique actuelles (NFU 44-051 et 44-095). Il existe cependant très peu de travaux sur les digestats étudiés dans DIVA (agricoles, biodéchets et OMR), la majorité des informations concernent les digestats de boues urbaines qui présentent des teneurs plus élevées.

Agriculture bio Suisse

Dans son rapport pour l'utilisation des digestats de biodéchets en agriculture biologique en Suisse, le VKS-ASIC conclue à la possibilité d'utiliser le digestat, comme le compost, en agriculture biologique étant donné que les éléments traces métalliques sont identiques pour les deux produits. L'organisation attire également l'attention sur le fait que les concentrations de métaux dans les différentes fractions de digestats (brut, liquide et solide) sont à analyser pour chaque phase. En effet, les concentrations en éléments nutritifs (azote, phosphore et potasse) ainsi que les métaux lourds rapportées à la matière sèche sont plus élevées dans la phase liquide. Pour eux, il est indispensable qu'au niveau de la réglementation pour l'agriculture biologique, des seuils limites soient proposés pour du digestat brut.

Boues urbaines

Pour les boues urbaines (Etude STEP Seine Amont, issu Synthèse ADEME/RITTMO 2011), le phénomène de concentration des éléments minéraux lié à la perte de carbone est clairement constaté, d'un facteur 1,7 pour les nutriments comme pour la majorité des ETM, sauf pour 3 d'entre eux : chrome, nickel et mercure, dont le taux de concentration est plus faible (1,5). La variabilité peut s'expliquer par une sédimentation en fond de digesteur lié à des complexes polymétalliques qui auraient piégé le phosphore et ces métaux de façon différentielle ou bien à une incertitude sur la mesure, voire également une volatilisation partielle du mercure.

L'épandage de boues digérées a le même impact que celui de boues non digérées.

Biodéchets

Pour les biodéchets, les digestats liquides contiennent en proportion de la matière sèche, plus de métaux lourds que les digestats solides et composts, tout en restant sous les seuils.

Déjections animales

Pour les déjections animales, la méthanisation influe peu sur la mobilité et la biodisponibilité du cuivre et du zinc pour les végétaux.

Dans certains cas, le cuivre et le zinc peuvent dépasser les seuils autorisés à l'épandage (cas des lisiers porcins et substrats provenant d'industries viticoles). Toutefois, d'après Montemurro (2008, issu Synthèse ADEME/RITTMO 2011), l'apport de digestat de lisier de porcs ou de digestat d'effluents vinicoles n'a pas augmenté les teneurs en ETM dans les sols. On notera cependant que 2 années de suivi avec un apport de digestat sous les seuils ne sont pas suffisantes pour détecter une accumulation d'ETM.

4.3.5 Polluants organiques

Il existe très peu de travaux sur ce sujet concernant les digestats étudiés dans DIVA (agricoles, biodéchets et OMR), la majorité des informations concernent les digestats de boues urbaines.

Les travaux réalisés pour les boues urbaines montrent que compte tenu de la réduction des doses épandues (concentration en P plus élevée), les quantités à l'hectare de CTO sont moins importantes. De même, il n'y aurait pas de problème par rapport à une concentration élevée en phénols (produits intermédiaires de la dégradation des polluants organiques) car ils sont rapidement dégradés (quelques jours) et ne provoquent pas d'effets négatifs dans le sol.

Concernant les digestats, la thèse de Lotta Leven (2006, issu Synthèse ADEME/RITTMO 2011) montre que la teneur en phénol est plus importante dans un digestat intégrant du lisier/fumier de porcs. Il y a une relation claire et positive entre le degré des effets inhibiteurs de l'activité des bactéries nitrifiantes et la teneur en phénol dans les digestats.

Cette même thèse montre une meilleure capacité de dégradations des mono-aromatiques en digesteur mésophile plutôt qu'en thermophile (lié à la diversité bactérienne ?).

Pour des équipes françaises de l'INRA (2009), le procédé de digestion anaérobie sur boues urbaines a démontré un potentiel de biodégradation des HAP, nonylphénol et PCB. Les concentrations de polluants organiques sont inférieures aux seuils des normes françaises actuelles (NFU 44-051 et 44-095). La méthanisation a un effet d'abattement sur ces polluants.

5. Résultats d'essais aux champs

5.1 Résultats bibliographiques

5.1.1 Résultats généraux issus de la synthèse ADEME/RITTMO 2011

Référence n° 37 : 1995 : C. Rivard : valorisation des digestats issus des déchets ménagers (USA)

Référence n° 38 : 2005 : Thèse Monica Odlare : résidus organiques, notamment biodéchets (Suède)

Référence n° 62 : 2010 : Montemurro (CRA Italie) digestat de marcs (Italie)

Référence n° 67 : 2007 : Odlare : résidus organiques : biodéchets, boues urbaines (Suède)

Référence n° 74 : 2004 : Svensson et Odlare : - Biodéchets (Suède)

Référence n° 75 : 2008 – O. Thiery – lisiers de porcs (CA 08 – France)

Référence n° 76 : 2007 : APESA – Déjections animales (France)

Autres : 2010 : G. Bermejo, F. Ellmer : Etude sur le rendement du sorgho (Allemagne)

Ces essais montrent l'intérêt de l'azote facilement biodisponible, voir l'équivalence d'engrais minéraux ainsi que l'augmentation des rendements plus ou moins importante par rapport aux substrats non digérés (6 à 20% pour des digestats d'origine agricole). Egalement Odlare (2007) montre que l'utilisation de digestat de biodéchet améliore le rendement des cultures de l'orge et de l'avoine par rapport à l'utilisation du compost. En revanche les rendements sont en règle générale inférieurs à ceux obtenus avec des engrais minéraux. Toutefois, à long terme, avec l'effet de la matière organique, on peut s'attendre à des rendements équivalents.

Ces essais donnent lieu à des préconisations par rapport à l'utilisation des digestats, comme par exemple : l'apport de digestat sur orge conduit à la production de grains trop riches en protéines, la possibilité d'apport sur les chaumes de la culture précédent le semis du colza, l'apport sur céréales au printemps pour le premier apport, en fin d'été sur les CIPAN avant maïs.

5.1.2 Autres programmes

On notera également un programme norvégien en cours : Programme Soileffects (2010-2014), effets des digestats sur la fertilité du sol, essais aux champs (Norvège), également des essais de digestat agricole sur dactyle (Tilvikiene, 2010 - Lituanie), notamment en vue de l'utilisation de l'herbe dans les digesteurs (équivalence sur l'efficacité entre le digestat et les engrais minéraux, amélioration du potentiel énergétique du dactyle après fertilisation avec du digestat comparé aux engrais minéraux).

Dans son rapport sur l'utilisation des digestats à l'échelle de la ferme, l'institut suédois de l'agriculture et de l'environnement (JTI, 2006) propose des scénarios pour la gestion des digestats liquide et solide. Basé sur les résultats d'essais aux champs sur céréales de printemps de 1999 à 2003 et sur l'utilisation de digestat de déchets d'alimentation (1 à 3% MS). Le coefficient d'équivalent engrais, compris entre 72 et 105% suivant les essais réalisés, est légèrement supérieur à celui du lisier de bovins. Les résultats varient fortement avec les conditions climatiques, notamment par temps froid et humide, les rendements sont moins bons pour le digestat que pour le fertilisant minéral. L'épandage du digestat peut être réalisé pendant la croissance végétale dans la mesure où un engrais starter a été épandu au semis. Cela peut être un avantage dans le cas de problème de compaction des sols.

5.2 Expérimentations aux champs en France

5.2.1 GAEC Beets

Le suivi du GAEC Beets par la Chambre d'agriculture du Loiret depuis 2009. Les substrats entrant sur l'unité de méthanisation, de l'ordre de 10 000 t/an, sont des lisiers porcins, des lisiers bovins, des fumiers bovins, des déchets industriels, des matières végétales agricoles.

Le digestat est utilisé, en brut, solide ou liquide pour l'épandage sur les plantations de colza, céréales, maïs et sorgho.

Les analyses montrent que 45% de la matière organique des intrants est dégradée pendant la méthanisation et que l'azote est minéralisé, la fraction NH_4/N_{tot} évolue de 52% sur le mélange entrant en méthanisation à 64% dans le digestat. Les autres nutriments ont conservé la même concentration.

Depuis 3 ans, les retours d'expérience montrent que les cultures qui valorisent le mieux les apports sont :

- sur colza : avant labour ou sur culture en place
- maïs/sorgho : avant labour de printemps ou sur culture en place après semis
- blé : sur culture en place en sortie d'hiver
- non recommandé : avant orge, trop sensible à la verse

Les essais de suivi des rendements n'ont pas montré d'effet significatif, voir des baisses de rendements.

Les points clés restent donc l'amélioration du matériel d'épandage et la recherche de références pour comprendre les effets du digestats (volatilisation, intoxication ammoniacale, arrière effet de la matière organique).

5.2.2 Agriculteur AAMF

Un des adhérents de l'association a réalisé des mesures et un suivi de l'épandage de son digestat brut sur maïs grain et blé tendre (Figures 28-30).

Sur cette unité, les analyses sur 18 mois montrent la stabilité de la qualité du digestat dans le temps sur les nutriments, avec un écart max de 10% (Figure 28).

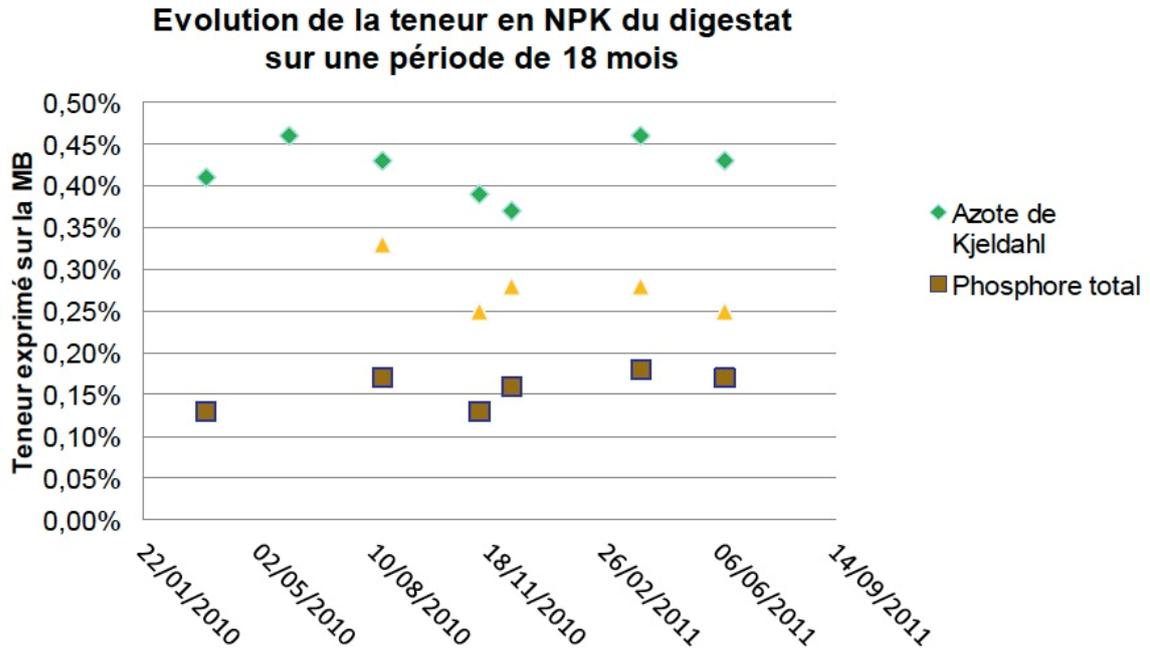


Figure 28: Stabilité de la teneur en NPK d'un digestat agricole sur une période de 18 mois

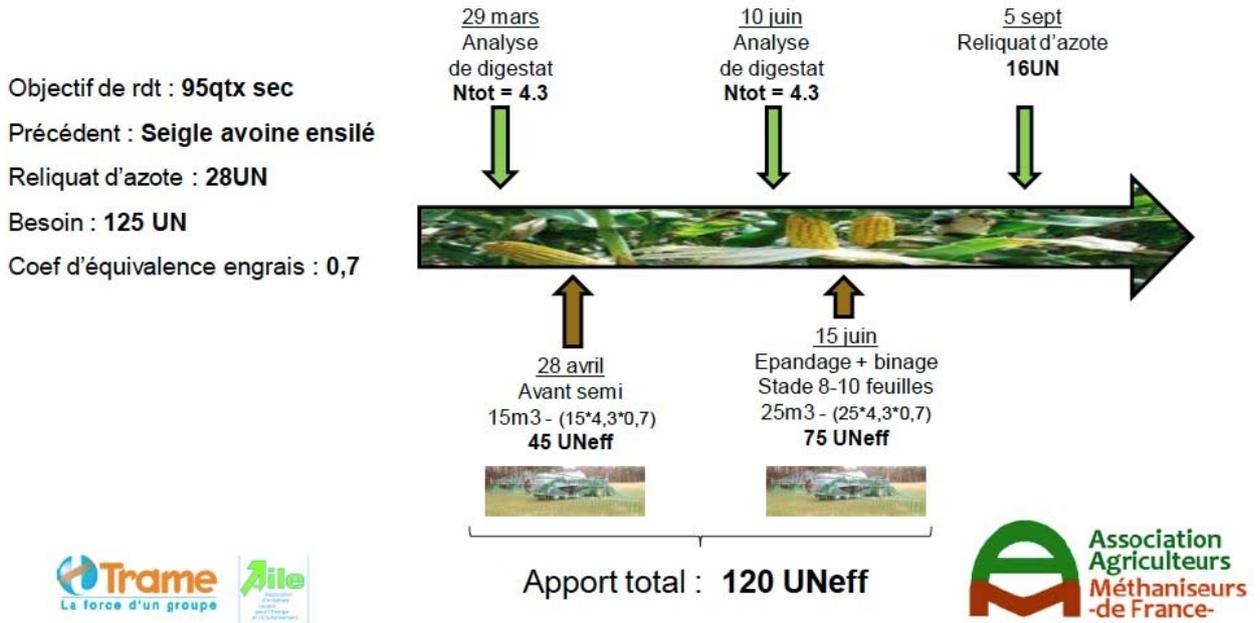


Figure 29: Exemple d'utilisation du digestat sur une culture de maïs grain

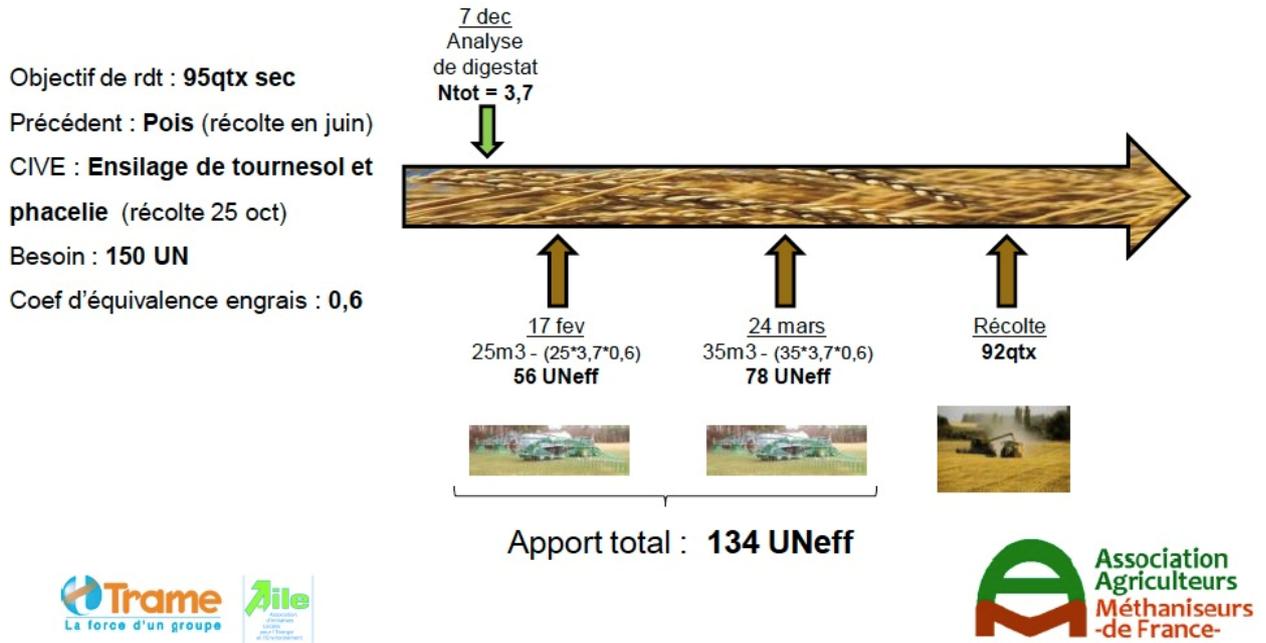


Figure 30: Exemple d'utilisation du digestat sur une culture de blé tendre

Par rapport à l'utilisation du lisier de porc, l'utilisation de digestat issu d'un mélange de lisier de porcs, de matières végétales et de graisses permet de ne pas utiliser d'engrais. Ceci est dû à l'apport supplémentaire d'azote lié aux graisses (Tableau ci-dessous).

| | Sans méthanisation | Avec méthanisation |
|-------------------------------|--|---|
| Produit à épandre | Lisier de porc | Digestat |
| | 3,6% de MS 3,5kg d'azote/m ³ | 4,4% de MS 4,2kg d'azote/m ³ |
| Apport de graisse | 0T/an | 1200T/an 3,3kg d'azote/T Apport de 4 000UN/an |
| Utilisation d'engrais minéral | 3 000 UN /an | 0 UN /an |

5.2.3 Essais réalisés par Méthanéo

L'entreprise Méthanéo a réalisé deux campagnes, en 2010 et 2011, sur maïs ensilage et sur blé.

Le digestat apporté est liquide, solide ou un mélange des deux.

L'hypothèse de disponibilité de l'azote la première année est prise égale à 60% de Norg et 100% de N-NH₄.

Essais sur maïs ensilage, Sol : limon argileux

Les essais n'ont pas permis de conclure :

- Essai en Mayenne (53) : la fourniture du sol très importante ne permet pas de conclure

- Essais en Deux-Sèvres (79) : gain de 1 à 2 tMS/ha par rapport au témoin en fonction des différentes modalités. Résultats à prendre avec précaution compte tenu du taux de MS variable entre les répétitions et de l'hétérogénéité des valeurs pour chaque répétition.

Essais sur blé tendre

L'objectif est de valider l'hypothèse de l'efficacité de l'azote des digestats supposée entre 70% et 90%.

◆ Essais de 2010

L'essai a montré dans son ensemble des rendements médiocres dus aux conditions climatiques sèches de l'année. De plus, de telles conditions climatiques n'ont pas été propices aux apports d'éléments organiques. Cependant, le digestat solide a plutôt bien réagi (Figure 31). En mars, les placettes fertilisées en digestat solide ont montré un visuel intéressant avec des blés plus foncés que ceux des parcelles ayant reçu un apport d'engrais chimique, l'azote ayant été très vite minéralisé.

Pour le digestat liquide, le coefficient d'utilisation de l'azote présente des résultats plus faibles pour lesquels on peut supposer une perte de la fraction ammoniacale selon plusieurs hypothèses : épandage similaire à un épandage à la buse, réorganisation, mauvaise valorisation sur sol calcaire.

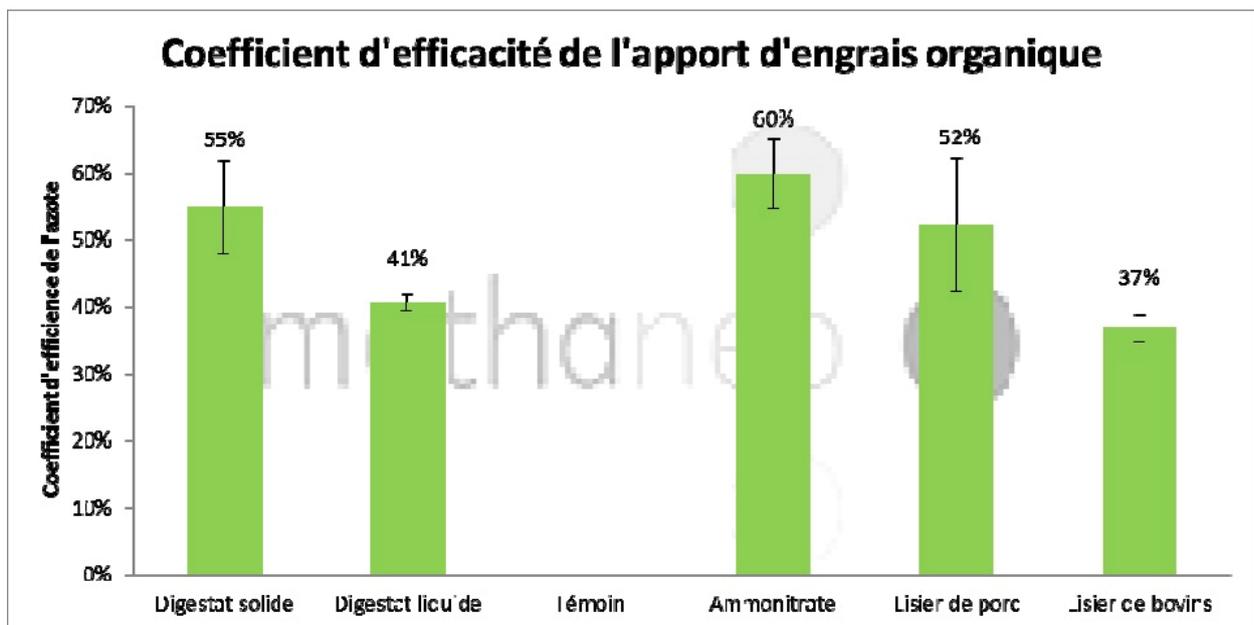


Figure 31: Coefficients d'utilisation de l'azote sur blé tendre (Méthanéo 2010)

◆ Essais 2011

Du fait des conditions climatiques (absence de précipitation à la fin du printemps), les rendements sont faibles. Toutefois, les résultats suivants ont été obtenus :

- La modalité digestat à 120 unités d'azote apportées le 16 mars équivaut à 90% du CAU (coefficient apparent d'utilisation) de l'ammonitrate
- L'apport précoce a favorisé les épis
- L'apport tardif est pénalisant pour le rendement
- Gain de rendement relativement faible (5 quintaux et 0,7 point de protéines) entre une dose de 60 unités et 160 unités

5.2.4 Chambre d'agriculture de Bretagne

Deux types de digestats ont été épandus en région Bretagne (départements 22 et 56) sur blé et maïs.

Les principaux résultats sont (Tableau 14) :

- Les coefficients d'équivalent engrais du digestat liquide ne sont pas très différents d'un lisier de porcs et peuvent être plus élevés s'il y a enfouissement à l'épandage. Cette pratique pour l'épandage est donc à recommander

Tableau 14: Coefficients d'équivalent engrais de lisier et digestat sur Ray-Grass, Blé et Maïs (issu Sabine Houot, Decoopman et al, 2010)

| | RG 1 | RG2 | Blé | Maïs |
|---------------------|------|------|------|------|
| Epandage | Juin | Mars | Mars | Mai |
| CEE digestats | 20% | 55% | 73% | 55% |
| CEE lisier | 20% | - | 71% | 75% |
| CEE digestat enfoui | | | | 88% |

- Les risques de perte par émissions d'ammoniac sont très élevés. Un apport à la buse palette doit être proscrit
- Le risque de pertes par pendillard, notamment dès que les températures s'élèvent lors de l'épandage, peut être élevé. L'injection doit être recommandée dans ce cas. Il y a évidemment moins de risques de pertes sur les apports de fin d'hiver (blé)
- Dans des conditions extrêmes (sécheresse 2010), l'équivalence engrais de type ammonitrate a été d'environ 30-35%
- Le dégagement d'odeur est moins marqué pour le digestat que pour le lisier de porcs (Tableau 15)

Tableau 15: Observations qualitatives lors de l'épandage de digestat comparé à un épandage de lisier de porcs (Chambre d'Agriculture de Bretagne)

Comparaison digestat / lisier de porc
Observations qualitatives

| | Digestat | Lisier de porc | |
|---|---|--|--|
| Dose d'épandage | 10 m ³ /ha | 15 m ³ /ha | |
| Consistance de l'effluent | Fluide assez épais, aspect un peu gluant. | Fluide, de consistance assez liquide pour un lisier d'engraissement. | |
| Vitesse d'infiltration dans le sol | Assez rapide, mais laissant en surface une boue assez humide qui se réduit plus lentement (couleur noire). | Très rapide, au bout de quelques minutes il ne reste que les fractions solides en surface du sol et en faible quantité (couleur marron). | La proportion de liquide s'infiltrant rapidement dans le sol est sans doute plus importante dans le cas du lisier. |
| Odeur à 20 m au moment de l'épandage | Odeur d'intensité modérée (3/10), composée d'une odeur piquante assez marquée et d'une odeur organique peu désagréable. | Odeur d'intensité moyenne (5/10), composée d'une odeur piquante et surtout d'une odeur putride de lisier. | Le lisier de porc produit une odeur plus marquée et plus désagréable que le digestat à l'épandage. |
| Odeur à 20 m, 20 minutes après l'épandage | Odeur d'intensité très faible (1 à 2 / 10) mais encore perceptible (grande surface épandue, vent latéral). | Odeur d'intensité très faible (1/10) difficile à percevoir (vent faible, convection plus importante du fait de la chaleur). | Persistance des odeurs faibles dans les 2 cas. Le digestat aurait une persistance un peu plus longue (en lien avec un résidu de surface plus important ?). |

6. Post-traitement des digestats

Le volume de digestat produit sur une installation de méthanisation équivaut à peu près à celui des intrants méthanisés (sauf apport important d'eau au niveau du digesteur). Aujourd'hui, de nombreux procédés de post-traitement se mettent en place pour valoriser au mieux les digestats, exporter la fraction solide des digestats en dehors des zones vulnérables ou transformer les digestats en produits commercialisables. Dans ce dernier objectif, seul le compostage caractérisé permet de transformer les digestats (statut de déchet) en produit normé (compost NFU 44-051). Tous les autres produits issus des digestats conservent actuellement le statut de déchet.

6.1 Séparation de phase

6.1.1 Objectif et paramètres

L'objectif est de pouvoir obtenir deux produits aux caractéristiques différentes afin de les valoriser au mieux.

6.1.2 Types d'équipements et performances

La bibliographie n'est pas riche sur la séparation de phase des digestats. L'étude EREP (2009) ainsi que des retours d'expériences en France donnent les résultats suivants en termes de taux de capture et de %MS des différentes phases sur des digestats agricoles, lisier/fumier avec ou non des substrats industriels (Tableau 16).

6.1.2.1 Performances des équipements

Pour le décanteur centrifuge, les performances décroissent avec l'augmentation du taux de matière sèche dans le digestat brut. Cet équipement est très sensible au type de digestat brut introduit (proportion de graisses notamment).

D'autres résultats montrent que le taux de capture des presses à vis après méthanisation du lisier sont plus faibles que sur du lisier de porcs non digéré (R.Bock, 2010 d'après Kowalewsky, LWK Niedersachsen 2005).

Tableau 16: Performances des équipements de séparation de phase des digestats (EREPA 2009)

| | Source | GAEC Beets (CA 45, 2010) | | EREPA (2009) presse à vis | | EREPA (2009) - centrifugation | | Masse et al (2007) - décantation | |
|---|------------------|-----------------------------------|---------|---------------------------|-----------------|-------------------------------|--------------------|----------------------------------|---------|
| | Digestat issu de | lisier porcin, bovin, déchets IAA | | | | | | | |
| | Fractions | solide | liquide | solide (25%-30% MS) | liquide (5% MS) | solide (15%-35% MS) | liquide (1%-3% MS) | solide | liquide |
| | %MS | 20% | 3% | 28% | 5% | 25% | 2% | | |
| | t/an | 22% | 78% | 20% | 80% | 7% | 93% | | |
| Proportion de flux dans chaque fraction | MES | 65% | 35% | 58% | 42% | 48% | 52% | 60% | 40% |
| | Ntot | 33% | 67% | 8%-25% | 75%-92% | 22% | 78% | 38% | 62% |
| | NH4 | 27% | 73% | 3%-11% | 89%-97% | 10% | 90% | | |
| | P2O5 | 60% | 40% | 72%-92% | 8%-28% | 27%-99% | 1%-27% | 67% | 33,50% |
| | K2O | 22% | 78% | 6%-13% | 87%-94% | 3% | 97% | 30% | 70% |

6.1.2.2 Nutriments et ETM

Les données présentées sont issues de la séparation de phase (presse à vis), digestat liquide et solide du digestat brut issu des installations bavaroises sont répertoriés par le LFL (2009) (Tableau 17), de la Chambre d'Agriculture du Loiret (Figure 32, Lejars, 2011, GAEC Beets) et de la Synthèse ADEME/RITTMO (2011, Tableau 18).

Tableau 17: Répartition du N, P, K lors de la séparation de phase des digestats (LFL 2009)

| | % MS | N _{tot} (kg / m ³) | NH ₄ (kg / m ³) | P ₂ O ₅ (kg / m ³) | K ₂ O (kg / m ³) |
|---------------------|-------|--|---|---|--|
| Digestat brut moyen | 6,7% | 5,4 | 3,5 | 2,5 | 5,4 |
| Min | 2,9% | 2,4 | 1,5 | 0,9 | 2 |
| Max | 13,2% | 9,1 | 6,8 | 6 | 10,6 |
| Phase liquide | 5,7% | 4,9 | 3 | 2,3 | 6,2 |
| Phase solide | 24,3 | 5,8 | 2,7 | 5 | 5,8 |

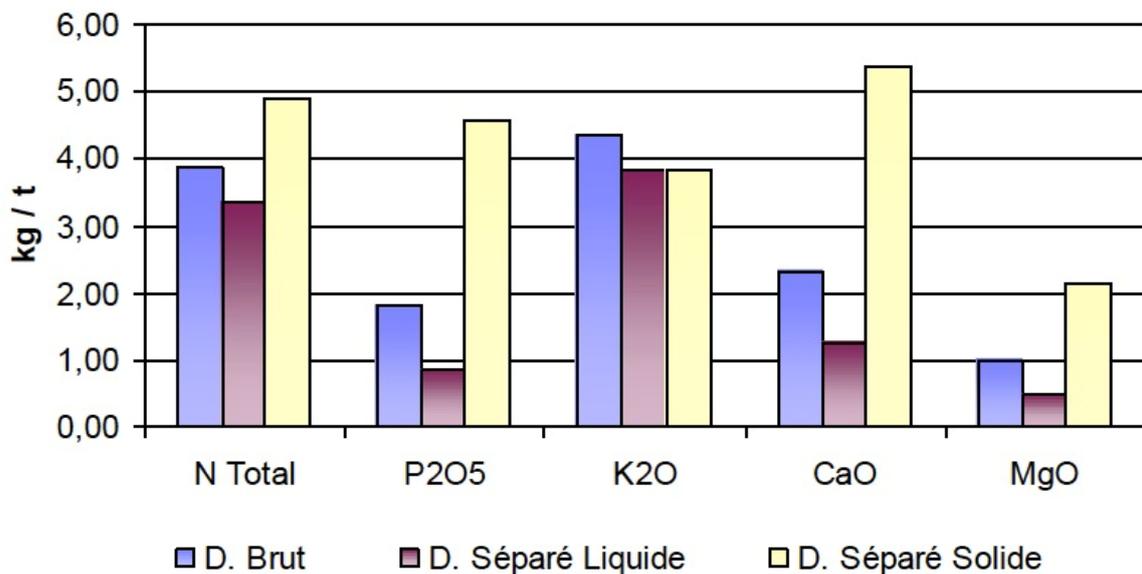


Figure 32: Répartition des éléments minéraux du digestat avant et après séparation de phase (Lejars, 2011)

Malgré quelques différences entre les études, la tendance générale est que lors de la séparation de phase des digestats le NH₄, le K et le Mg passent préférentiellement dans la phase liquide tandis que le P, le Ca et les ETM liés à la matière organique se retrouvent majoritairement dans le digestat solide (Synthèse ADEME/RITTMO 2011). En terme de concentration, le faible taux de MS dans le digestat liquide (<5% de MS), conduit à des concentrations élevées (Tableau 18).

Peu de bibliographie est disponible sur des résultats plus détaillés et notamment sur des conseils d'utilisation de la séparation de phase. Möller et al. (2012) soulignent un changement physique important entre les intrants plutôt solides (fumiers) et les digestats plutôt liquides, permettant une meilleure répartition lors des épandages et une meilleure pénétration dans le sol.

Les conclusions que l'on retrouve sur la séparation de phase sur lisier (Installation et essais à la ferme d'un système de séparation solide-liquide du lisier de porcs complété par la stabilisation et l'entreposage de la fraction solide, IRDA 2006) pourraient sans doute s'appliquer au digestat issu de lisier de porcs.

Sur la fraction liquide, une attention spéciale est à noter sur le déséquilibre créé entre les contenus en potassium et ceux en calcium et magnésium. En effet, à l'opposé du contenu en

potassium qui demeure sensiblement inchangé, les contenus en calcium et magnésium de la fraction liquide diminuent.

Dans les sols pauvres en ces éléments au départ, ou sur les sols bien pourvus mais faisant suite à l'emploi à long terme de la fraction liquide, de fortes doses d'application pourraient ainsi induire un déséquilibre cationique dans les fourrages et entraîner des problèmes pour l'élevage (fièvre du lait ou une tétanie d'herbage). Il serait donc recommandable de balancer les apports de calcium et magnésium avec des applications d'engrais minéraux.

Dans cette phase liquide, du côté du phosphore, la faible proportion qui se retrouve dans la fraction liquide est probablement sous forme dissoute, principalement composée d'orthophosphates (95%) très labiles et d'un peu de phosphore organique (5%) (Giusquiani *et al.*, 1998, Gigliotti *et al.*, 2002). Le phosphore organique sera probablement sous forme de monoester, principalement de l'acide phytique, très présent dans la diète des porcs qui ne peuvent pas l'assimiler. Ce type de phosphore organique est aussi particulièrement résistant à l'attaque par les microorganismes du sol et ne devrait donc pas contribuer à la nutrition des cultures. Il sera plutôt rapidement rétrogradé (fixé) dans le sol où il s'accumulera lentement. L'acide phytique est d'ailleurs reconnu comme étant un des composés phosphorés organiques les plus fixés par le sol où il forme souvent plus de 50% du phosphore.

6.1.3 Verrous

Concernant la séparation de phase, un grand nombre de données et de résultats existent pour des substrats non méthanisés, principalement des lisiers de porcs ou de bovins, mais peu de résultats existent concernant les digestats. Les besoins de connaissance concernent les bilans matières ainsi que les **performances des différents équipements (presse à vis, centrifugation) en fonction de différents paramètres et notamment du taux de matières sèches du digestat brut et du type de digestat (co-digestion, OMR, etc.)**.

Ainsi, il semble intéressant de valider ou non une suggestion de la synthèse ADEME/RITTMO 2011 concernant **la perte d'azote ammoniacal lors de la séparation de phase**, basée sur le fait que les teneurs en N-NH₄ du digestat brut sont de manière générale plus élevées que celles du digestat liquide (compilation des analyses de digestat brut, liquide et solide).

Tableau 18: Données de composition moyenne et/ou minimum-maximum des digestats français en fonction de leur type : brut, liquide ou solide (Attention, à part le pH, C/N et MS, les valeurs sont données en g / kg de MS) (D'après Synthèse ADEME/RITTMO 2011)

| Digestat | n | pH | C/N | MS | MO | NTK | N-NH4 | P | K | Mg | Ca |
|---|-------|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | | | en % de MB | en g / kg de MS | | | | | | |
| Digestats bruts de déchets agricoles et matières végétales | 10-57 | 7,4 (3,7-8,4) | 9,12 (4-17) | - | 63,6 (38,6-75,1) | 65,2 (1,1-240) | 32,6 (0,1-129) | 12,8 (0,79-42,3) | 49,6 (1,2-155) | 13,8 (0,47-190) | 48,3 (17,6-254) |
| Digestats liquides issus de déchets agricoles et matières végétales | 36-54 | 7,9 (7,3-9,9) | 7,86 (0,3-12,9) | - | 56,7 (28,6-76,5) | 52,43 (6,1-149) | 18,78 (0,6-93,8) | 8,61 (0,9-25) | 34,27 (0,28-185) | 13,98 (1,87-286) | 33,68 (3,7-59,2) |
| Digestats solides issus de déchets agricoles et matières végétales | 38-46 | 8 (7,1-12,6) | 26,07 (4,9-39,3) | - | - | 20,56 (1,4-76) | 1,78 (0-10,3) | 7,23 (0,9-50,2) | 10,33 (0,6-32,3) | 5,23 (0,2-20,4) | 63,97 (7,2-286) |
| Digestats liquides de et biodéchets IAA (Suisse) | 4 | - | - | 12,7 (7,5-15,5) | 43 (39,4-47,4) | 23,1 (21,2-25,1) | - | 6 (5,2-6,5) | 30,1 (26,5-32,9) | 9,5 (8,5-10,8) | 33,6 (31,1-37,5) |
| Digestats solides de et biodéchets IAA (Suisse) | 11 | - | - | 55,9 (45,5-75,2) | 49,7 (28,9-73,4) | 15,1 (9,4-20,3) | 0,45 (0,25-0,82) | 3,9 (2-8) | 12,6 (6,4-20,8) | 6,8 (3,7-9,7) | 71,4 (23-152) |

6.2 Séchage

6.2.1 Objectif et paramètres

On retrouve l'utilisation du séchage de digestat dans le cas des installations de méthanisation territoriale et à la ferme.

Pour les installations territoriales et les installations à la ferme situées en zone d'excédent structurel (zone vulnérable, ZES), l'objectif du séchage de digestat est l'exportation des nutriments (azote et phosphore), du fait, d'une part de la diminution des coûts de transport et d'autre part, de la possibilité (future ?) d'homologation des produits sortants. Il faut noter toutefois que la phase de séchage du digestat peut entraîner la perte de 90 % du NH_4^+ qui aura été transformé en NH_3 . Il faut absolument récupérer les buées du sécheur.

Dans ce cas, les paramètres recherchés sont donc la teneur en matière sèche du produit séché ou la quantité de digestat séché, ainsi que la teneur en azote de la solution de sulfate d'ammonium, issue du traitement de l'air (obligatoire, en règle général, voir plus bas). Le paramètre limitant reste la quantité de chaleur disponible pour le séchage.

Pour des installations à la ferme hors zone d'excédent disposant d'une cogénération, le séchage est envisagé pour la valorisation de la chaleur dans le cas où aucun débouché thermique n'est disponible à proximité. Dans ce cas, la valorisation de la chaleur cogénérée pour le séchage du digestat permet de bénéficier de la prime à l'efficacité énergétique s'ajoutant au tarif d'achat de l'électricité. Ce paramètre est basé sur une adéquation optimale valorisation de la chaleur/coût d'investissement du sécheur. Dans ce cas, les porteurs de projets recherchent également la polyvalence de l'outil dans le but de proposer des prestations de séchage d'autres produits (fourrage, plaquette, etc), afin d'optimiser les recettes liées à la chaleur.

6.2.2 Types d'équipements et performances

On retrouve plusieurs types d'équipements pour le séchage des digestats, qui diffèrent selon la taille et le type de digestat par rapport à la taille de l'installation.

| | Type d'installation concernée (nombre de références en France) | Récupération N- NH_4 dans l'air de séchage | Plage de température de séchage |
|-------------------|--|---|--|
| Sécheur à bande | Métha Ferme (2) | Lavage à l'acide sulfurique Avec ou sans ajout d'eau | 90°C |
| Sécheur à disques | Métha Territ (1) | Traitement par lavage + biofiltre | 180°C |
| Tambour rotatif | Métha OMR (Potentiellement) | | Température des fumées ou 180°C selon les technologies |

Les travaux de l'IFIP (ADEME, 2010) concluent à la nécessité d'une pré-concentration du digestat avant l'introduction dans le sécheur. L'étude préconise l'utilisation d'un pré-concentrateur thermique (type Techno-one). Celui-ci permet l'optimisation de l'utilisation de la chaleur sans produire une fraction liquide. Toutefois, l'air humide doit être traité (lavage) pour

recupérer l'azote ammoniacal. L'étude précise que l'agence de l'eau Loire-Bretagne a cependant autorisé l'utilisation de ce mode de déshydratation sans lavage d'air jusqu'à 15 000 kg N entrant annuellement.

6.2.2.1 Sécheur à bande

Le séchage à bande fonctionne pour du digestat solide (> 15% MS) en base. Certains constructeurs, proposent des procédés de séchage de digestat brut ou liquide, avec un système de recirculation de la fraction séchée ou d'un autre support sec (type pulpe de betterave, essais installateur WPS).

Le système proposé possède deux étages avec injection d'air chaud par en dessous et aspiration au-dessus. L'air chaud traverse la matière verticalement. L'air chargé est lavé par une solution d'acide sulfurique en mélange ou non avec de l'eau.

Le constructeur (WPS) propose d'incorporer du sulfate de fer dans le digestat brut avant séparation de phase pour permettre la précipitation de l'azote ammoniacal dans la fraction solide et permettre ainsi de limiter la volatilisation pendant le séchage et limiter l'étape de lavage de l'air à l'acide sulfurique. Les résultats de la société WPS sont présentés ci-dessous :

- Des problèmes de colmatage ont été relevés, notamment en Belgique pour le séchage de fractions solides très fibreuses. Le sécheur fonctionne donc maintenant sur une partie du digestat brut qui permet la production de granulés. En revanche, l'énergie n'est pas suffisante pour sécher tout le digestat brut.
- Le GAEC de Grivée (Eurekalias) dispose d'un sécheur à bande qui fonctionne sur la fraction solide du digestat. Aucun souci particulier n'a été relevé lors du fonctionnement. La production de granulés secs est valorisée en épandage, et non pas comme combustible comme ce qui avait été imaginé à la conception du projet.

Les quantités d'énergie nécessaires limitent la quantité de digestat séché. L'étude IFIP (2010) a réalisé des calculs pour apprécier la quantité de digestat qui peut être potentiellement séchée en fonction du delta de température (Tableau ci-dessous).

| Chauffage de l'air | Débit d'air réchauffable avec la chaleur disponible (m ³ / h) | Capacité évaporatoire (g/ m ³) | % de digestat déshydratable |
|--------------------|--|--|-----------------------------|
| +20°C | 105645 | 8,52 | 48% |
| +15°C | 140860 | 7,65 | 64% |
| +10°C | 211290 | 5,78 | 73% |
| +5°C | 422581 | 3,91 | 98% |

6.2.2.2 Sécheur à disques

Les sécheurs à disques sont classiquement utilisés pour les boues urbaines. L'unité de Géotexia possède ce type de sécheur sur digestat solide mais il n'est pas encore en fonctionnement.

L'énergie thermique utilisée est celle récupérée sur les fumées des moteurs de cogénération pour atteindre la température demandée pour chauffer l'huile thermique circulant à l'intérieur du rotor (180°C en entrée, 120°C en sortie). Le taux de matière sèche en sortie peut atteindre 85% de MS.

Pour ce type de sécheur, la question se pose sur la phase plastique du produit à sécher afin de régler les paramètres de fonctionnement, essentiellement le taux de recirculation du produit sec notamment pour le mélange avec le produit à sécher (taux de siccité entrée de 65% en règle générale).

6.2.2.3 Sécheur à tambour

Le séchage à tambour peut être appliqué sur du digestat de déchets municipaux, même si à ce jour, peu de références existent sur du digestat d'ordures ménagères.

6.2.3 Verrous

Les technologies proposées, notamment par des constructeurs travaillant pour les installations allemandes, ne sont pas adaptées à des digestats issus de mélanges de substrats (convoyage, viscosité...).

Les différentes questions posées sur le séchage du digestat, notamment d'origine agricole, sont entre autres :

- Le traitement de l'air de séchage : consommation d'acide sulfurique, mélange eau/acide, concentration en N dans la solution de sulfate d'ammonium
- La problématique énergétique : adéquation quantité d'énergie / quantité à sécher, dans le cas de sécheurs à bande (basse température) et de sécheurs à disques (haute température)
- Le manque de retours d'expériences sur l'ajout de sulfate de fer en amont du séchage

Pour les OMR et Biodéchets, les retours d'expériences manquent sur le séchage mais la question pourrait se poser et se concrétiser si le règlement européen (End-of-Waste) s'applique comme il est présenté à ce jour, notamment en considérant le séchage comme un prétraitement à l'incinération ou à la mise en décharge.

6.3 Compostage

6.3.1 Objectifs et paramètres

L'objectif est de pouvoir stabiliser (innocuité et séchage) la matière digérée et si possible la transformer en compost normé NFU 44-051. Le séchage par compostage permet d'autre part une consommation modérée d'énergie via la montée en température.

6.3.2 Types d'équipements et performances

6.3.2.1 Stabilité

Le compostage permet l'augmentation du degré de maturité qui entraîne une diminution de la salinité et du pH. La stabilité du produit et sa compatibilité avec les plantes sont nettement améliorées. Le digestat permet d'apporter des nutriments et de la matière organique labile, mais il n'a pas les propriétés structurantes d'un compost. Il peut constituer une source d'azote pour le compostage de matières ligneuses (exemple : certains déchets verts) (Fuchs, 2011).

D'après les essais d'Abdullahi et al (2008), les résultats sont meilleurs (tests de germination) quand l'application du digestat d'OM composté est réalisé à plus faible dose que ce qui est habituellement réalisé et lorsque l'intervalle entre l'épandage et le semis est plus long.

Un niveau de maturité trop poussé n'est pas forcément intéressant (disponibilité N, activité biologique...) :

- Compost d'OMR (C/N = 12), si C/N > 15 on a une altération de l'équilibre microbiologique du sol
- Déchets agricoles, si C/N > 18, on a une immobilisation de l'azote dans le sol

6.3.2.2 Procédés – ajout de matière structurante

Le compostage peut être réalisé avec ou sans ajout de co-substrats ligneux.

En Suisse (Fuchs, 2007) des essais sur digestat ont permis d'observer une montée en température similaire à un compostage de substrats « classiques ». Ces travaux montrent également que le mélange de digestats bruts avec d'autres produits (compost ligneux jeune, pulpe de papier, argiles, bois de refus de tamisage de composts mûrs...) permet de limiter les pertes azotées tout en permettant un processus de compostage (montée en température notamment) très satisfaisant. Ces produits ajoutés permettraient de piéger cet azote et apporteraient une microflore activant la nitrification de l'azote. Toutefois, la « bonne » gestion du compostage (aération, humidité, porosité des andains,...) est essentielle pour obtenir un produit de qualité (qu'il s'agisse de digestats ou non) avec des pertes limitées en azote.

Les analyses des paramètres de certains digestats (Téglià, 2011) indiquent que le temps nécessaire pour la stabilisation sera sans doute plus court que pour des substrats non digérés ainsi que la quantité d'aération nécessaire. Cela reste à vérifier par des expérimentations.

Ces travaux mettent également en avant que le manque de structure des digestats limiterait l'auto-compostage. Ainsi, le mélange avec des matériaux organiques et/ou de la restructuration seraient nécessaires.

6.3.2.3 Volatilisation

La volatilisation de l'ammoniac (Synthèse ADEME/RITTMO 2011) est de l'ordre de 20 à 30%, voire 50% de l'azote présent dans les matières entrantes. Il peut être récupéré par condensation ou dans des tours de lavage.

6.3.2.4 Types de procédés

◆ *Aération forcée à la ferme sans traitement de l'air*

A ce jour, le compostage de digestat est réalisé sur l'unité de méthanisation de Ter Biogaz. Le digestat est composté sur la plate-forme existante avec d'autres substrats organiques non digérés et avec un structurant.

◆ *Aération forcée avec traitement de l'air vicié*

Toutes des unités de méthanisation de biodéchets et d'OMR en France sont équipées d'un post-traitement des digestats par compostage (6 unités en fonctionnement en 2011). Le principe est généralement le suivant :

- Aération forcée par aspiration
- Retournement
- Maturation / stockage
- Traitement de l'air vicié en biofiltre

L'ajout de structurant ligneux (déchets verts ou refus) n'est pas systématique. Le ratio digestat/structurant dépend des sites.

6.3.3 Verrous

Le post-traitement du digestat par compostage est une solution pour augmenter le taux de matière sèche (Téglià, 2011) comme le sont le séchage ou la séparation de phases.

D'autres questions se posent encore vis-vis des caractéristiques du traitement :

- Les paramètres du compostage spécifiques à des substrats digérés en fonction des objectifs attendus : auto-compostage et ajout de structurant ligneux, aération et durée
- Les pertes d'azote et les possibilités de récupération

6.4 Filtration membranaire

6.4.1 Objectifs et paramètres

La filtration membranaire permet la séparation des phases liquides du digestat sous l'effet d'un gradient de pression. Elle conduit théoriquement à la concentration de la phase liquide dans une phase contenant les matières en suspension et les composants fertilisants, et une phase contenant seulement de l'eau.

6.4.2 Types d'équipements et performances

Le traitement proposé par A3 water solutions, un des principaux constructeurs de procédés membranaires sur digestat, se déroule en trois étapes principales (Figures 33 et 34) :

- Séparation de phase solide-liquide par presse à vis, centrifugeuse puis tamis vibrant. Elle s'accompagne d'un ajout de flocculant afin de permettre une séparation des matières en suspension.
- Ultrafiltration, à l'aide de membranes poreuses en céramique, permettant d'éliminer les particules contenues dans le produit. Après cette étape, les produits (passant) sont stériles.

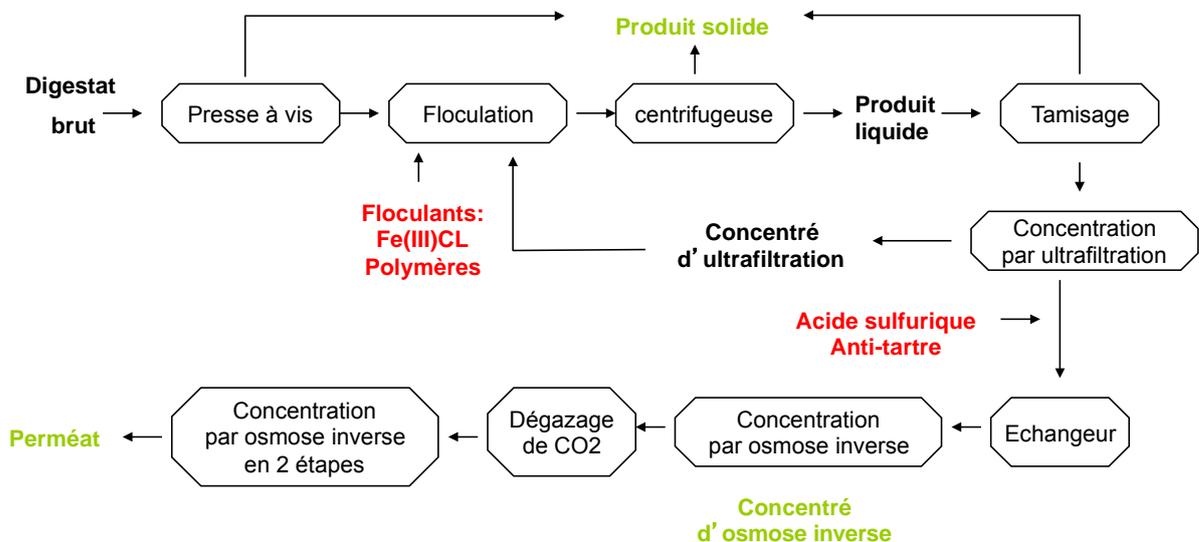


Figure 33: Représentation schématique des étapes de post-traitement d'un digestat brut par filtration membranaire

- Osmose inverse, avec des membranes denses, permettant la séparation des particules dissoutes comme l'azote, le phosphore ou encore les sels. La séparation se fait par différence de solubilité entre les différents éléments. Avant de réaliser l'osmose inverse, de l'acide sulfurique est introduit dans le produit afin de réduire le pH et améliorer ainsi la rétention d'ammonium dans la phase aqueuse. De plus, de l'antitartre est injecté afin de prévenir la formation de tartre.

Pour le KTBL, le coût de traitement par filtration membranaire s'élève à 11,13 €/m³ mais aurait tendance à baisser. En 2006, le bureau d'études Bigatec annonce des coûts s'échelonnant de 6 à 14 €/m³ pour des installations (décantation + ultra-filtration + osmose inverse) traitant de 12 000 à 36 000 m³/an.

Les bilans des flux au cours du procédé sont les suivants (Erep, 2009 et Bigatec, 2006).

| | EREP 2009 d'après A3 Water Solutions | | | | | |
|-------------------------------|--------------------------------------|-----|-----|-----|-----|--------|
| | volume | N | P | K | MES | %MS |
| Solide issu centrifugation | 17,50% | 18% | 76% | 17% | 70% | 28% |
| Concentré UF - Engrais P(N/K) | 12% | 13% | 20% | 12% | 30% | 16,70% |
| Concentré OI - Engrais N/K | 17,50% | 70% | 4% | 70% | 0% | - |
| Effluent OI | 53% | 0% | 0% | 0% | 0% | - |

D'autres sources font état de bilans différents, notamment sur les volumes :

| | Bigatec - 2006 |
|-------------------------------|----------------|
| | volume |
| Solide issu centrifugation | 16% |
| Concentré UF - Engrais P(N/K) | 22% |
| Concentré OI - Engrais N/K | 14% |
| Effluent OI | 49% |



Figure 34: Sous-produits issus d'une étape d'ultra-filtration (rétantat d'UF) + osmose inverse (concentrat d'OI et eau osmosée) (Meritec GmbH, 2004)

6.4.3 Verrous

Selon les allemands du KTBL, si la technologie membranaire est mature, l'application au digestat liquide manque encore d'expériences.

On compte toutefois plusieurs références sur digestat notamment de deux constructeurs :

- A3 GmbH : 5 références sur digestat (dont Géotexia), pour des tonnages allant de 23 000 à 80 000 t/an de digestat
- Haase : de nombreuses références sur lixiviats de décharge – positionné sur le traitement du digestat des unités de méthanisation industrielle et TMB

Les principales difficultés et questionnements vis à vis de ce traitement sont :

- La séparation de phase en amont : un taux de MS max de 3% est requis (Döhler 2007)
- La consommation d'énergie : grandes variations observées, entre 12,8 kWh/t selon [KTBL] et 28 kWh/m³ [Lemmens] ou 30 kWh/t lisier selon [WUR], 22 kWh/m³ (calcul à partir des données de A3 Watersolutions)
- Risque de concentration des polluants dans les concentrés, notamment ceux d'osmose inverse, chargés également en sels. La question se pose de leur évacuation (20% des volumes entrant)
- Effet d'échelle : des sociétés allemandes proposent des unités pour des installations à la ferme, quels sont les coûts pour des petites unités ?
- Les consommables : pas de données précises sur le type et les doses à apporter

6.1 **Evaporation - Stripping**

6.1.1 Objectifs et paramètres

Elle s'applique sur la phase liquide issue de centrifugation (cas de TIPER, de nombreuses références sur lisier brut, lixiviats ou autres effluents industriels) ou sur le concentrat d'osmose inverse (GEOTEXIA, concentrats issus de lixiviats de décharges).

La solution d'évaporation permet la production d'un concentrat, souvent mélangé à la fraction solide issue de la séparation de phase. Quant au condensat, chargé en ammoniac, il subit une étape de stripping (ajout d'acide sulfurique) afin de concentrer l'azote sous la forme d'un produit fertilisant, le sulfate d'ammonium, à environ 8% de N (Figures 35 et 36).

6.1.2 Types d'équipements et performances

Ces procédés sont déjà utilisés dans le traitement de lisiers de porcs (5 références pour France Evaporation). Sur digestat, nous ne disposons pas de retour d'expériences.

Le KTBL annonce un coût de traitement de 9,88 €/m³ sans compter l'étape de stripping des condensats.

6.1.3 Verrous

Les principales questions sur ces procédés sont :

- Des données précises et validées sur les consommables (énergie, réactifs notamment acide)
- Le manque de retours d'expériences sur digestat
- L'effet d'échelle : de nombreux agriculteurs s'intéressent à ce type de traitement permettant la production de fertilisants concentrés : rentabilité économique, technicité, dangerosité des produits utilisés (acides).

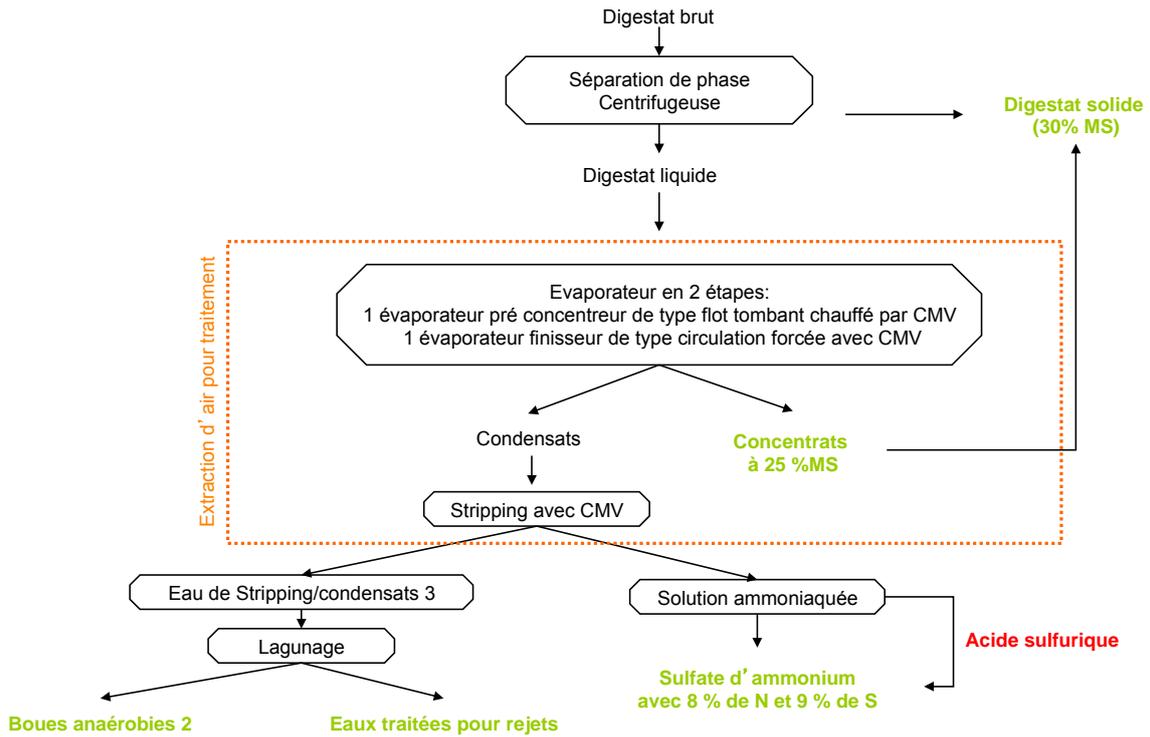


Figure 35: Représentation des étapes du procédé d'évaporation-stripping de la société France Evaporation

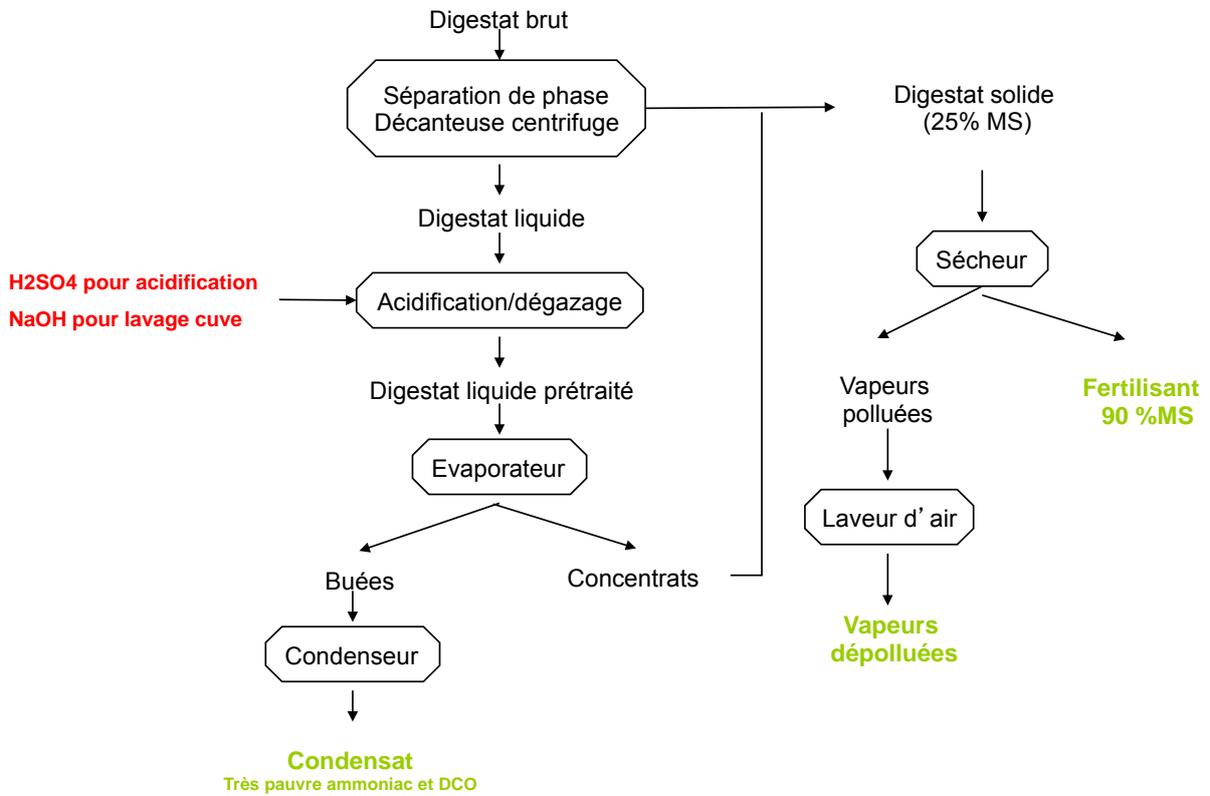


Figure 36: Représentation des étapes du procédé d'évaporation-stripping de la société GEA Engineering process

6.2 Stripping

6.2.1 Objectifs et paramètres

L'unité de stripping a pour objectif de récupérer, en vue d'une valorisation agricole, l'azote ammoniacal contenu dans le digestat sous forme d'un nitrate ou sulfate d'ammonium, facilement transportable et utilisable comme fertilisant.

Le principe est de favoriser un changement d'état lors des différentes étapes du procédé pour séparer et déplacer la forme azotée du digestat dans une autre solution. Par diminution de la pression partielle, le composant volatile se transfère dans la phase gazeuse. La volatilisation de l'ammonium vers l'ammoniac est augmentée par la température (60-70°C dans le cas de valorisation de la chaleur cogénérée) et du pH, jusqu'à avoir 100% d'ammoniac.

Le système comporte trois étapes (Figure 37) :

- Séparation de phase : centrifugation avec ajout de polymères
- Stripping à l'air en milieu basique de l'ammoniac volatile dans une colonne d'échange gaz/liquide. NH_4^+ (liquide) \rightarrow NH_3 (gaz). Les paramètres de pilotage : température, pH, débit, encrassement doivent être ajustés
- Absorption de l'ammoniac dégazé par une solution d'acide nitrique ou d'acide sulfurique NH_3 (gaz) \rightarrow NH_4NO_3 (en solution)

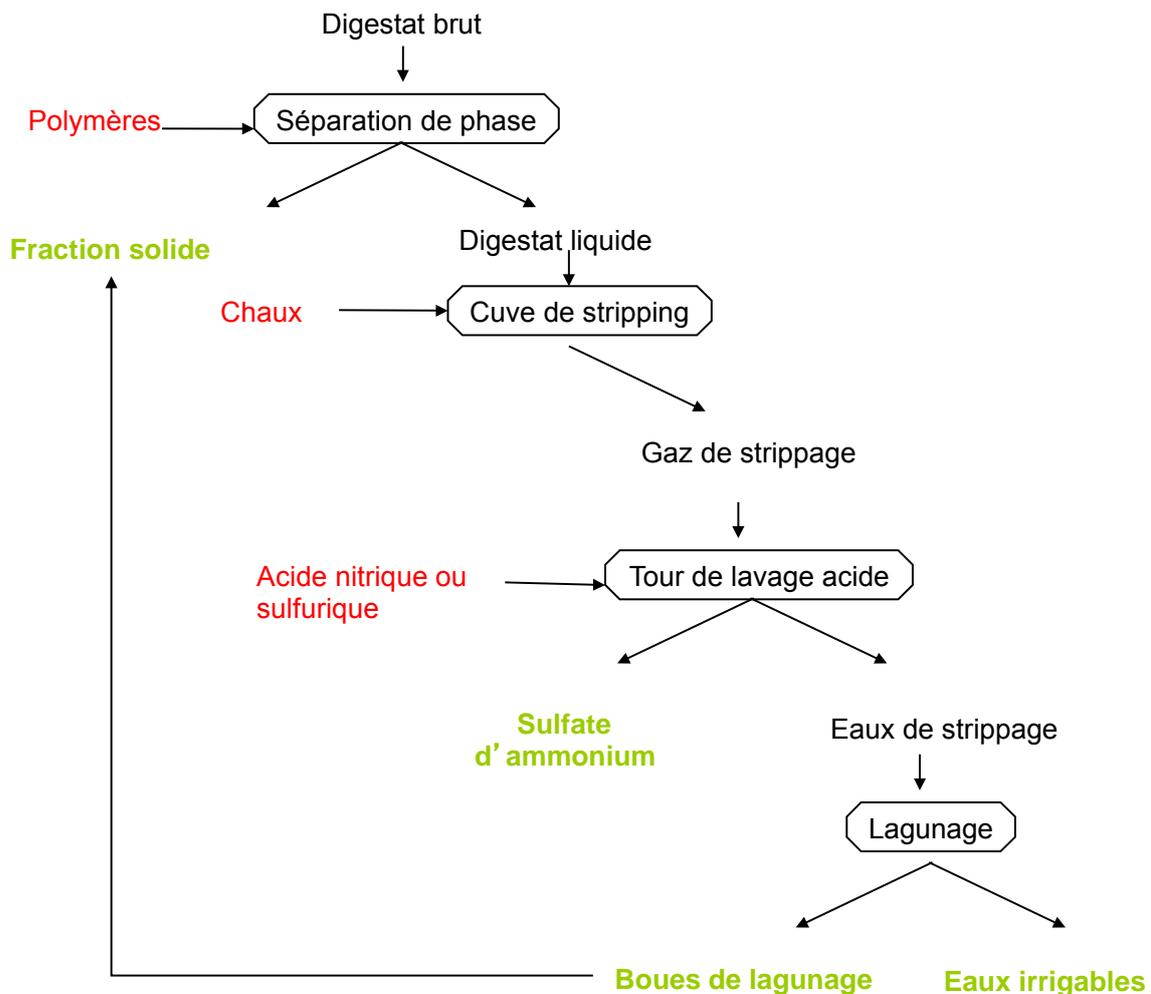


Figure 37: Représentation des étapes du procédé de stripping

6.2.2 Types d'équipements et performances

Ce système est installé sur l'unité de Biogasy1 (Figure 38). Les premiers résultats sont présentés ci-dessous.

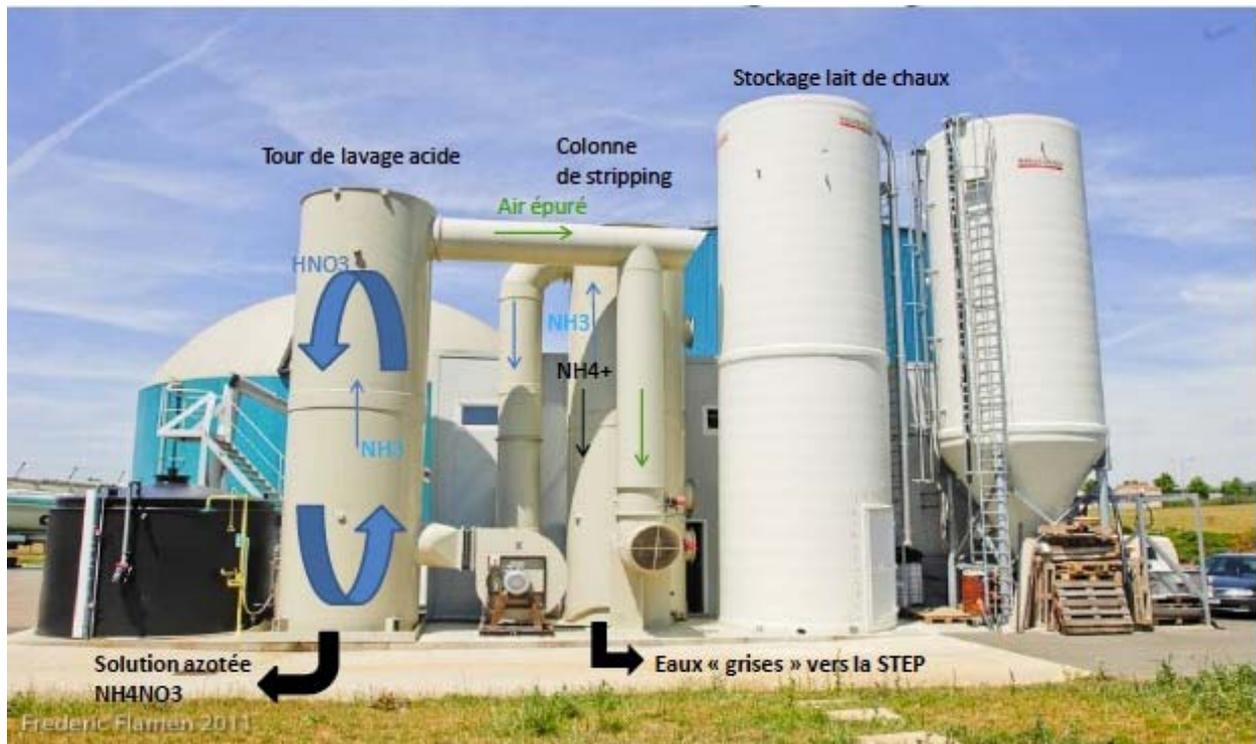


Figure 38: unité de stripping Biogasy1

Résultats pour l'unité de Biogasy1 :

20 000 m³ digestat à 5 g NH₄/l,
plusieurs mois de fonctionnement en continu.

Centrifugation :

- 0,16 m³ polymères/m³ digestat
- 100 kg boues à 20-25% MS

Unité de stripping :

- Performances : 94% d'abattement de NH₄
- Nitrate d'ammonium : 2-3% du volume initial – 150-200 g N/l
- Eaux grises : 97% du volume - 150-200 mg NH₄/l

Coût traitement : 13€/t. le KTBL (2010) annonce un coût de traitement équivalent (11 €/m³).

Le process de stripping est plus intéressant sur du lisier digéré que sur du lisier brut (Piccinini, 2013) :

- Plus le taux de NH₄ est élevé (51,5% dans le cas des lisiers, 65% dans le cas des digestats), meilleures sont les performances sur l'abattement de NH₄
- Plus le taux de MS est faible (5,2% dans le cas des lisiers, 3,05% dans le cas des digestats, meilleures sont les performances sur l'abattement de NH₄ (incidence sur le flux d'air)
- Plus le pH initial est élevé, plus le stripping de l'ammoniac est facile
- Moins de formation de mousse et moins d'accumulation de matières organiques en fond du réacteur et sur les parois
- Utilisation de l'énergie thermique issue de la cogénération

6.2.3 Verrous

Les principales questions vis à vis de ce traitement sont le retour d'expériences sur digestat et notamment l'application à l'échelle de la ferme. En effet, le stripping n'est pas facilement applicable à l'échelle d'une exploitation agricole (Meier, issu EREP 2009) du fait de l'utilisation de produits chimiques qui supposent des étapes de manutention, stockage, approvisionnement, désapprovisionnement, et qui demandent une opération professionnelle pas forcément compatible avec le travail de l'agriculteur.

Le retour d'expérience à Biogasyll relève des difficultés/améliorations à apporter sur :

- L'automatisation et la régulation du procédé
- Le traitement de la DCO sur rejet eaux « grises »
- La normalisation ou l'homologation de la solution azotée

6.3 Autres procédés combinés

6.3.1 Anastrip : basé sur du stripping

D'autres procédés existent, notamment l'ANASTRIP propose une solution de traitement du digestat brut. Ce procédé est prévu pour des unités traitant plus de 40 000 t/an (concept de bioraffinerie)

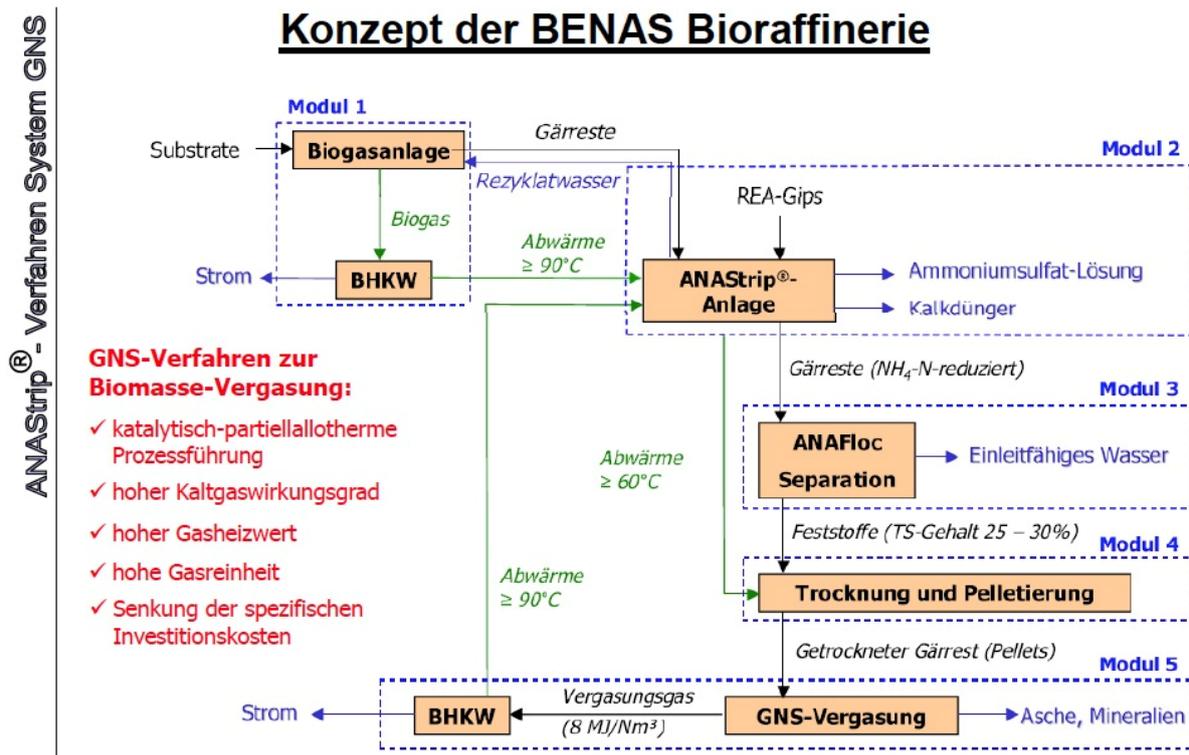


Figure 39: Schéma du procédé Anastrip (source SSM Technology)

6.3.2 Enoferti d'Akaeno basé sur de l'évaporation et du compostage

Akaeno propose une évaporation du digestat liquide après séparation de phases. Ensuite, les concentrats riches en azote et en potasse sont mélangés avec des plumes et du bois et compostés pour produire un engrais organique.

Les condensats d'évaporation sont traités par SBR (Boues activées par traitement séquentiel combiné), l'effluent est ensuite rejeté dans le milieu naturel.

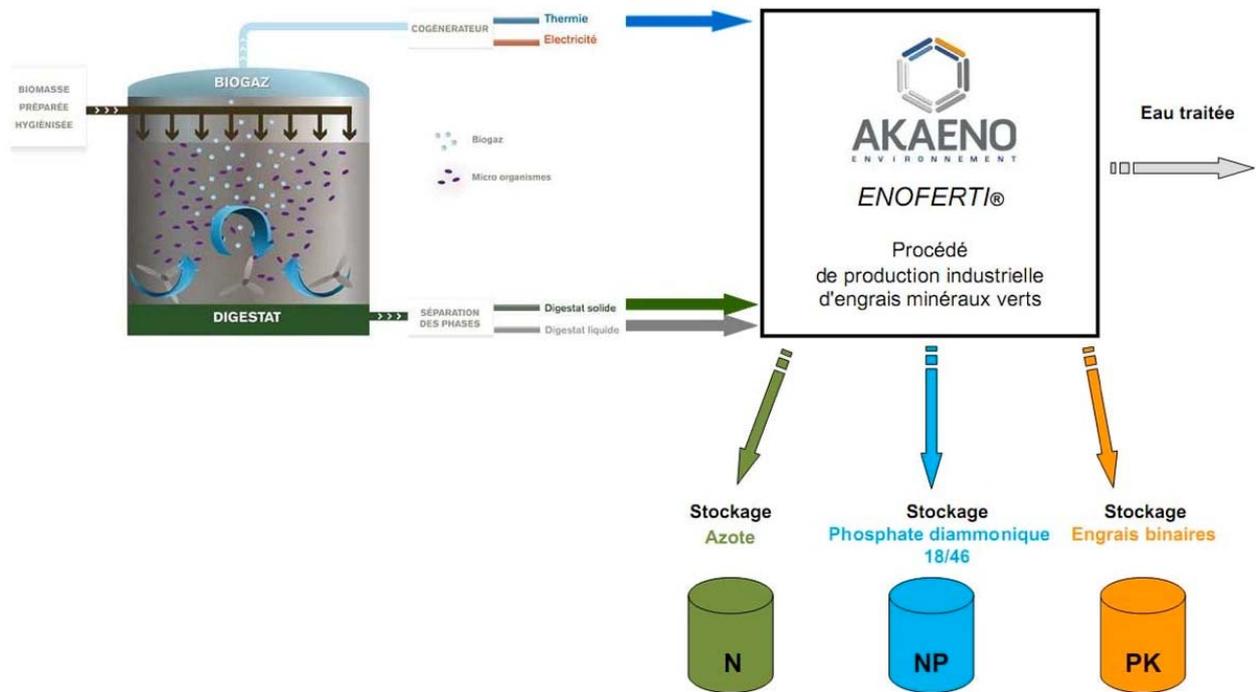


Figure 40: Schéma du procédé Enoferti (source Akaneo)

7. Conclusions

L'analyse de la bibliographie permet de confirmer et affiner les objectifs de DIVA au niveau des connaissances des digestats, de leurs procédés de post-traitement et de leur valorisation agronomique.

◆ *Des besoins de connaissances sur les caractéristiques des digestats*

La variabilité des intrants va définir en grande partie la qualité des digestats qui en résultera (Synthèse ADEME/RITTMO 2011). Toutefois, même si on peut montrer de grandes tendances concernant les teneurs des différents éléments fertilisants ou des polluants des digestats, il est impossible à ce jour de définir précisément et donc de statuer sur l'impact de chacun des substrats étudiés sur la qualité des digestats. En effet, les données collectées aujourd'hui ne permettent pas de relier les caractéristiques agronomiques des intrants (trop peu souvent analysées) à celles des digestats produits.

Sur les caractéristiques des digestats, même si la bibliographie s'enrichit d'année en année sur ces thématiques, il reste des questions ou des validations à apporter sur :

- Stabilité des digestats, potentiel d'humification
- Coefficient d'équivalent engrais à court et long termes
- Volatilisation à l'épandage – émissions gazeuses
- Biodisponibilité du phosphore
- Effet sur les propriétés du sol : minéralisation du carbone, activité biologique des sols

Il est nécessaire de pouvoir fournir à l'utilisateur de digestat le gain ou les différences apportées par l'épandage du digestat, quelle que soit sa forme, par rapport à des déjections animales brutes ou à du compost.

Les analyses des paramètres prévus dans le programme DIVA (Tableau 19) ont pour objectif de répondre à l'ensemble des questions qui se posent tant au niveau réglementaire (respect des normes actuelles et futures) qu'au niveau de la compréhension du comportement des digestats en post-traitement et retour au sol (émissions, valeur agronomique, stabilité...).

Ces analyses seront complétées par :

- Valeur fertilisante immédiate : Test en pots (Suez Environnement)
- Test de phytotoxicité (Suez Environnement)
- Valeur fertilisante de l'azote : cinétique (INRA)
- Stabilité et valeur amendante (INRA)
- Degré d'humification de la MO (INRA)
- Emissions gazeuses à l'épandage : N₂O et NH₃ (INRA – Irstea)
- Essais aux champs : digestats, effluent d'élevage et OMR (INRA, Suez Environnement)

Tableau 19: Analyses et méthodes prévues dans DIVA

| Paramètre | Origine |
|-------------------------------|---|
| pH | NF U 44 051 |
| Matière sèche | NF U 44 051 / NF U 44 095 |
| Matière organique | NF U 44 051 / NF U 44 095 |
| Carbone Total | NF U 44 051 / NF U 44 095 |
| Carbone soluble | Biodégradabilité |
| Azote Total | NF U 44 051 / NF U 44 095 / NF U 42 001 |
| Azote organique | NF U 44 051 / NF U 42 001 |
| Azote nitrique | NF U 42 001 |
| Azote ammoniacal | NF U 42 001 |
| Azote uréique | NF U 42 001 |
| P205 total | NF U 44 051 / NF U 44 095 |
| P205 soluble (milieu alcalin) | NF U 42 001 |
| K2O total | NF U 44 051 / NF U 44 095 |
| K2O soluble (aq) | NF U 42 001 |
| CaO total | NF U 44 051 / NF U 44 095 |
| CaO soluble (aq) | NF U 42 001 |
| MgO total | NF U 44 051 / NF U 44 095 |
| MgO soluble (aq) | NF U 42 001 |
| SO3 total | NF U 42 001 |
| SO3 soluble (aq) | NF U 42 001 |

| | |
|---|---------------------------|
| Métaux lourds | NF U 44 051 / NF U 44 095 |
| Oeufs d'helminthes viables | NF U 44 051 / NF U 44 095 |
| Salmonella | NF U 44 051 / NF U 44 095 |
| E. Coli | NF U 44 095 |
| Clostridium Perfringens | NF U 44 095 |
| Listeria monocytogenes | NF U 44 095 |
| Entérocoques | NF U 44 095 |
| HAP (3) | NF U 44 051 / NF U 44 095 |
| PCB (7) | NF U 44 095 |
| Inertes | NF U 44 051 / NF U 44 095 |
| Fractionnement biochimique | NF U 44 051 |
| Minéralisation du carbone et de l'azote dans le sol | NF U 44 051 |
| DCO | Biodégradabilité |
| Polysaccharides | |
| Protéines | |
| Lipides | |
| Respirométrie | |
| BMP | |

◆ **Valoriser au mieux les digestats**

Si les matières entrant en méthanisation sont significatives pour la valorisation du digestat, la situation géographique du site de production et la taille de l'unité déterminent les enjeux et le type de valorisation qui devra être mis en place.

Pour les post-traitements proposés, les verrous restent pour la plupart le manque de retours d'expériences sur les digestats. Des travaux sont donc nécessaires pour tester, optimiser et valider les post-traitements les plus courants au niveau technologique.

Au vu du nombre de projets de méthanisation déposés par des exploitants agricoles, en zone vulnérable ou ZES mais aussi pour des projets territoriaux avec des post-traitements permettant de concentrer les nutriments, la question se pose également sur la performance et la faisabilité de ces procédés à l'échelle de la ferme.

Si les post-traitements apportent une réponse en concentrant les éléments et ainsi facilitant leur utilisation, il n'en reste pas moins que l'utilisation de digestat brut, ou liquide apporte un intérêt non négligeable en termes de coûts. Ainsi l'amélioration de l'utilisation des digestats bruts ou liquides passerait par des recherches sur les technologies d'épandage (épandage sans tonne, quadra@ferti..) ou sur l'adaptation du système de production des cultures (rotation des cultures, techniques culturales simplifiées, non labour...).

Dans ce sens, des travaux doivent aussi être réalisés pour évaluer les intérêts économiques et environnementaux de l'utilisation des digestats, afin de favoriser les filières présentant le meilleur rapport bénéfice /risque.

Enfin, d'un point de vue réglementaire, la mise en œuvre de la réglementation européenne End-of-Waste pourrait remettre en cause le système français en cours actuellement par d'une part la sortie des OMR et des boues urbaines de la normalisation et d'autre part, l'intégration des déjections animales dans la liste positive. L'acquisition de données sur les caractéristiques des digestats français doit permettre de faire évoluer les réglementations.

8. Références

- Abdullahi et al. (2008) : Investigating the effects of anaerobic and aerobic post-treatment on quality and stability of organic fraction of municipal solid waste as soil amendment, *Bioresour Technology* 99 8631-6.
- ADEME (2008) "Les installations de traitement d'ordures ménagères - Résultats 2006."
- ADEME (2011) Qualité agronomique et sanitaire des digestats
- ADEME-Gaz de France (2004) "Le marché de la méthanisation en France."
- Albert (2007) Wirksamkeit organische Dünger, Berechnung der pflanzenbaulichen Wirksamkeit der Nährstoffe organischer Dünger, Lebensministerium, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft
- Asmus, F. u. Linke, B. (1987): Zur pflanzenbaulichen Verwertung von Gülle-Faulschlamm aus der Biogasgewinnung; *Feldwirtschaft* 28, S. 354-355.
- ASTEE (2006) Vade-Mecum du porteur de projet de méthanisation des déchets des collectivités. *TSM*, 4: 16-75.
- Bagge, Elisabeth (2009). Hygiene aspects of the biogas process with emphasis on spore-forming bacteria. Diss. (sammanfattning/summary) Uppsala: Sveriges lantbruksuniv., Acta Universitatis agriculturae Sueciae, 1652-6880 ; 2009:28. ISBN 978-91-86195-75-5 [Doctoral thesis]
- Bagge, Sahlström, Albin (2005). The effect of hygienic treatment on the microbial flora of biowaste at biogas plants. National veterinary institute, Uppsala, Sweden. *Water research* 39 : 4879-4886
- Bakx T., Y. Membrez, A. Mottet - *EREP SA*, A. Joss, M. Boehler – *EAWAG* (2009) Etat 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
- Benbrahim (2009) Comparaison de l'intérêt agronomique des composts, des digestats et des digestats Méhanisation des déchets d'un territoire : enjeux et débouchés compostés. Colloque national ADEME Lille 23-25 juin 2009
- Bendixen (1999) Hygiene aspects of anaerobic digestion of mixed wastes. Sanitation requirements in Danish Biogas plants. In Colleran, E (Ed). *AD Conference*, Galway, 4-5th November 1999. National University of Ireland.
- Bermejo G., F. Ellmer (2010) Use of dry and wet digestates from biogas plants as fertilizer in plant production, Humboldt-Universität zu Berlin, Faculty of Agriculture and Horticulture, Department of Agronomy, 14th Ramiran International conference, september 2010
- Bigatec (2006) Ökonomische und ökologische Bewertung von zwei gärresteauflerungssystemen, 15. Jahrestagung des Fachverband Biogas e.V. - 25.-27. Januar 2006
- Birkmose T.S (2009) Nitrogen recovery from organic manure. Improved slurry application techniques and treatment – the Danish scenario. In *Proceedings 656*, International Fertilizer Society, York, UK.
- Bock Karsten (2010) Document de synthèse Chambre d'agriculture NordRhein-Westfalen, Biogas and Treatment of Slurry and Digester Substrate, Reducing the high Nutrient Level in Regions with high Livestock Density, ZNR Haus Düsse
- Burns Robert et al (1999) Effect of anaerobic digestion on struvite production for nutrient removal from swine waste prior to land application, Written for Presentation at the 1999 ASAE Annual International Meeting Sponsored by ASAE, Sheraton Centre Toronto, Ontario, Canada July 18 – 21, 1999

- Chambre d'Agriculture de Bretagne (CRAB) (2011) Valeur agronomique du digestat de méthanisation, ADEME
- Chantigny M., P. Rochette, D. A. Angers, D Masse, and D. Côte. (2004). Ammonia Volatilization and Selected Soil Characteristics Following Application of Anaerobically Digested Pig Slurry. *Soil Science Society of America, J.* 68:306–312
- Chantigny M.H. et al (2010) Chantigny, Soil nitrous oxide emissions following band-incorporation of fertilizer nitrogen and swine manure. *Journal of Environmental Quality*, 39 (5): 1545-1553.
- Chantigny, et al (2009). Ammonia volatilization following surface application of raw and treated liquid swine manure. *Nutr Cycl Agroecosyst* 85, 275–286.
- Colleran E. (2000) Hygienic and sanitation requirements in biogas plants treating animal manures or mixtures of manures and other organic wastes, American Biogas Council, www.americanbiogascouncil.org
- Crolla Anna (2007) Assessment of the Production and Land Application of Anaerobically Digested Manure from Medium Sized Livestock Farms Growing the Margins: Energy Conservation and Generation for Farms and Food Processors, April 11-14, 2007 London Convention Centre, London, Ontario
- Döhler, H. (2010). Qualität, Aufbereitung und Verwertung von Gärresten aus Biogasanlagen. KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Deutschland. Présentation Power-Point au Symposium: "Angepasster Energiepflanzenanbau zur Biogasproduktion im Saarland" du 87 juin 2010 à D-Eppelborn
- Döhler, H.; Haring, F. (1989): Ammoniakverluste nach der Gülleausbringung in Abhängigkeit von Boden und Ausbringungstermin. *Poster DBG-Tagung September 1989.*
- Döhler, H.; Zapf, R. (1996): Emissionsminderungspotentiale für Ammoniak aus der Tierhaltung im Kreis Coburg, Studie KTBL, unveröffentlicht. 73 S.
- Effizient Düngen (2011) Stickstoff-Mineraldüngeräquivalent von organischen Düngern http://www.effizientduengen.de/download/Newsletter_10_2011.pdf
- Fuchs J. (2011) : Valorisation agronomique des digestats, présentation Biogaz Europe, FIBL
- Fuchs J.G, A.Berner, L.Tamm, JochenMayer, H.Bachmann, U.Baier, H.Zweifel, A.Wellinger, K.Schleiss, (2007). « Compost et digestat en Suisse ». Téléchargeable sur : www.environnement-suisse.ch/uw-0743-f. Référence : UW-0743-F
- Fuchs Jacques G., (2008): Compost and digestate : sustainability, benefits, impacts for the environment and for plant production. Proceedings of the international congress CODIS 2008, February 27-29, 2008, Solothurn, Switzerland.
- Gigliotti, G., K. Kaiser, G. Guggenberger et L. Haumaier. 2002. Differences in the chemical composition of dissolved organic matter from waste material of different sources. *Biol. Fertil. Soils* 36 : 321-329.
- Giusquiani, P. L., L. Concezzi, M. Businelli et A. Macchioni. 1998. Fate of pig sludge liquid fraction in calcareous soil : agricultural and environmental implications. *J. Environ. Qual.* 27 : 364-371.
- Gungor, K., Karthikeyan, K.G., (2008) Phosphorus forms and extractability in dairy manure: a case study for Wisconsin on-farm anaerobic digesters. *Bioresource Technology*, 99, 425-36.
- Gutser, R., et al. (2005). "Short-term and residual availability of nitrogen after long-term application of organic fertilizers on arable land." *Journal of Plant Nutrition and Soil* 168(4): 439-446.
- Haraldsen et al, (2011) Liquid digestate from anaerobic treatment of source-separated household waste as fertilizer to barley, *Waste Manag Res.* 29(12):1271-6.

- Hermann Antje (2007) Stickstoff- und Humusproblematik des Gärresteeinsatzes in Mais-Monokultur Grünland und Futterbau/Ökologischer Landbau Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, DLG Ausschuss für Ackerbau, 26. Juni 2007
- IFIP (2010) Méthanisation dans la filière porcine, Séparation de phases, séchage et normalisation d'un digestat, ADEME
- JTI (2006) Handling of digestate on farm level, JTI-rapport, 347
- Keller (1983) Technology of sewage sludge hygienisation. Zentral Bakteriologie mikrobiol Hyg B 178(1-2):111-141
- Kolbe (2009) Den Humus nicht vergessen: Dauerhafte Bodenfruchtbarkeit erfordert eine ausgeglichene Humusbilanz. BLW 52/53: 28-29.
- Kupper, T. and J. Fuchs (2007). Compost et digestat en Suisse. Connaissance de l'environnement. B. Office fédéral de l'environnement. 0743: 124 p.
- Lashermes G., Nicolardot B., Parnaudeau V., Thuriès L., Chaussod R., Guillotin M.L., Linères M., Mary B., Metzger L., Morvan T., Tricaud A., Villette C., Houot S. (2009) Indicator of potential residual carbon in soils after exogenous organic matter application European Journal of Soil Science, 60, 9, 297-310.
- Lessirard J. et Quevremont P. (2008), La filière porcine française et le développement durable. Rapport du CGAAER et IGE. 84 pages.
- Levén L. (2006) Anaerobic Digestion at Mesophilic and Thermophilic Temperature With Emphasis on Degradation of Phenols and Structures of Microbial Communities. Thèse de "Swedish University of Agricultural Sciences" Uppsala 2006. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae 2006:116
- Leven L., Schnurer A.. (2005). Effects of temperature on biological degradation of phenols, benzoates and phthalates under methanogenic conditions. International Biodeterioration & Biodegradation 55 (2005) 153–160
- LfL (2009) Biogashandbuch Bayern - Materialienband, Kap. 2.2.7, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Stand Dezember 2009
- Marcato C.E. (2007) Thèse présentée pour obtenir le titre de Docteur de l'Institut National Polytechnique de Toulouse octobre 2007. Origine, devenir et impact du cuivre et du zinc des lisiers porcins.
- Marcato, C. E., et al. (2008). "Particle size and metal distributions in anaerobically digested pig slurry." Bioresource Technology 99(7): 2340-2348.
- Masse D., Croteau F., Masse L. (2007). The fate of crop nutrients during digestion of swine manure in psychrophilic anaerobic sequencing batch reactors. Bioresource Technology 98 (2007) 2819–2823
- Meritec GmbH (2004) Biogastechnologie in Kombination mit der Membrantrennung, Kombination der energetischen und stofflichen Nutzung von Gülle und Gärsubstraten
- Messner, H. (1988). Düngewirkung anaerob fermentierter und unbehandelter Gülle, Dissertation, Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau, TU München, 1988 (in German).
- Möller K, Stinner W. (2010) Effects of organic wastes digestion for biogas production on mineral nutrient availability of biogas effluents. Nutr Cycl Agroecosyst (2010) 87:395–413
- Möller, K. and T. Müller (2012). "Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review." Engineering in Life Sciences 12(3): 242-257.
- Montemurro F., S.Canali, G.Convertini, D.Ferri, F.Tittarelli, C.Vitti. (2008). Anaerobic digestates application on fodder crops: effects on plant and soil. Agrochimica, Vol.LII - N°5, septembre-octobre

- Odlare M., M.Pell, K.Svensson, 2008. Changes in soil chemical and microbiological properties during 4 years of application of various organic residues. *Waste management* 28 : 1246-1253.
- Piccinini et al (2013). Nitrogen recovery from digestate with ammonia stripping : results of 27 tests. International conference ManuREsource 2013, CRPA, Research Centre on Animal Production - Reggio E. – Italy, December 5-6, 2013 Bruges, Belgium
- Saveyn, H. and P. Eder (2014). End-of-waste criteria for biodegradable waste subjected to biological treatment (compost & digestate): Technical proposals E. S. a. T. R. series, European Commission: 312 p.
- Schröder et al. (2007). Long-term nitrogen fertilizer replacement value of cattle manures applied to cut grassland. *Plant Soil*. 2007;299:83–99.
- Singer M. (2005). Erfassung des hygienischen Zustandes von Gärrückständen aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen und Darstellung des daraus resultierenden Risikopotentials. Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung der Universität für Bodenkultur, Bundes- und Forschungsanstalt Raumberg-Gumpenstein, Oesterreich.
- Skillman et al (2009) Influence of high gas production during thermophilic anaerobic digestion in pilot-scale and lab-scale reactors on survival of the thermotolerant pathogens *Clostridium perfringens* and *Campylobacter jejuni* in piggery wastewater, *Water research* 43 (2009) 3281–3291
- Smith K.A. et al (2010) Nutrient value of digestate from farm based biogas plants, Ramiran, 14th International Conference Ramiran, Lisboa
- Sorensen P. (2008) The fate of nitrogen from animal manure in soil-crop systems : experiences with dairy and pig slurries. Milan, 25 janvier 2008
- Tégliá, C., et al. (2010). "Characterization of Solid Digestates: Part 1, Review of Existing Indicators to Assess Solid Digestates Agricultural Use." *Waste and Biomass Valorization* 2(1): 43-58.
- Tégliá, C., et al. (2011). "Characterization of Solid Digestates: Part 2, Assessment of the Quality and Suitability for Composting of Six Digested Products." *Waste and Biomass Valorization* 2(2): 113-126.
- Tilvikiene, (2010) Effect of digestate application on cocksfoot on biomass production and quality, 14th International conference Ramiran, Lisboa
- Weiland P. (2007) Untersuchungen zum qualitativen und quantitativen Vorkommen von *Clostridium botulinum* in Substraten und Gärrückständen von Biogasanlagen, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)

