

Projet ANR- 10-BIOE-007

DIVA

Programme BIOENERGIES 2010

| | | |
|----------|---|-----------|
| A | IDENTIFICATION | 2 |
| B | RESUME CONSOLIDE PUBLIC | 3 |
| B.1 | Résumé consolidé public en français..... | 3 |
| B.2 | Résumé consolidé public en anglais..... | 6 |
| C | MEMOIRE SCIENTIFIQUE | 11 |
| C.1 | Résumé du mémoire..... | 11 |
| C.2 | Enjeux et problématique, état de l'art | 14 |
| C.3 | Approche scientifique et technique..... | 15 |
| C.4 | Résultats obtenus..... | 17 |
| C.4.1 | Caractérisation des digestats, comparaison aux normes actuelles et capacité des digestats bruts à être épandus ou déshydratés (Tâche 3, L3.1-3) | 18 |
| C.4.2 | étude des procédés de post-traitement des digestats (Tâche 4, L4.x.x) | 20 |
| C.4.3 | retour au sol des digestats, valeur agronomique et émissions à l'épandage (Tâche 5, L5.1-4) | 25 |
| C.4.4 | Evaluation environnementale et économique des filières de post-traitement (Tâche 6, L6.1-2) | 28 |
| C.5 | Exploitation des résultats..... | 30 |
| C.6 | Discussion | 31 |
| C.7 | Conclusions | 33 |
| C.8 | Références | 34 |
| D | LISTE DES LIVRABLES | 35 |
| E | IMPACT DU PROJET | 40 |
| E.1 | Indicateurs d'impact | 40 |
| E.2 | Liste des publications et communications | 41 |
| E.3 | Liste des éléments de valorisation..... | 44 |
| E.4 | Pôles de compétitivité (projet labellisés) | 45 |
| E.5 | Impact au niveau des partenaires industriels (le cas échéant).... | 46 |
| E.6 | Bilan et suivi des personnels recrutés en CDD (hors stagiaires) | 48 |

A IDENTIFICATION

| | |
|---|--|
| Acronyme du projet | DIVA |
| Titre du projet | Caractérisation des DIGESTATS et de leurs filières de Valorisation Agronomique |
| Coordinateur du projet (société/organisme) Co-coordonateur du projet (société/organisme) | Patrick Dabert IRSTEA (ex-CEMAGREF) Christian Couturier Solagro |
| Période du projet (date de début - date de fin) | 01 décembre 2010 - 30 novembre 2014 |
| Site web du projet, le cas échéant | |

| | |
|-------------------------|--------------------------|
| Rédacteur de ce rapport | |
| Civilité, prénom, nom | M. Patrick Dabert |
| Téléphone | 02 23 48 21 53 |
| Adresse électronique | patrick.dabert@irstea.fr |
| Date de rédaction | 31 janvier 2015 |

| | |
|---|--|
| Si différent du rédacteur, indiquer un contact pour le projet | |
| Civilité, prénom, nom | |
| Téléphone | |
| Adresse électronique | |

| | |
|---|--|
| Liste des partenaires présents à la fin du projet (société/organisme et responsable scientifique) | <ul style="list-style-type: none"> • Irstea – Patrick DABERT • Solagro – Christian COUTURIER • ARMINES - RAPSODEE - Ecole des Mines d'Albi-Carmaux – Patricia ARLABOSSE • Université de Montpellier – Institut Européen des Membranes – Marc HERAN • GEOTEXIA – Caroline ZEMB • SUEZ ENVIRONNEMENT (CIRSEE) – Jean-Luc MARTEL • INRA – Sabine HOUOT |
| Pas de changement en cours de projet | |

B RESUME CONSOLIDE PUBLIC

B.1 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN FRANÇAIS

Comment valoriser les digestats de méthanisation ?

Evaluation agronomique, technique, économique et environnementale de la valorisation des digestats de méthanisation par épandage direct ou par séparation de phase puis séchage ou compostage des solides et traitement biologique ou filtration membranaire des liquides.

1. Les enjeux de la gestion des digestats de méthanisation

Les incitations politiques des 10 dernières années ont conduit à une diversification des filières de méthanisation vers les déchets agricoles (seuls à la ferme ou en mélange en méthanisation territoriale), les biodéchets et les ordures ménagères résiduelles. Toutefois, malgré leurs atouts avérés (production d'énergie renouvelable, captage des émissions de gaz à effet de serre (GES) des déchets, valorisation de la matière organique), ces filières peinent à se développer, en partie par manque de valorisation efficace des digestats.

Les digestats sont les résidus organiques générés lors du processus de méthanisation. Ils représentent un volume équivalent à celui des déchets traités et possèdent des caractéristiques propres à leur filière. Ils ont aujourd'hui le statut de déchet et ne peuvent être gérés que par un plan d'épandage ou par compostage caractérisé¹.

L'objectif de DIVA était d'acquérir des connaissances sur la composition des digestats et sur leurs filières de post-traitement dans le but d'évaluer les bénéfices/risques de leur utilisation en agriculture et de fournir des données aux acteurs de la filière. Plusieurs solutions technologiques ont été évaluées et comparées à l'option d'un épandage direct des digestats brut : la séparation de phase et l'épandage des phases séparées ou leur post-traitement par séchage ou compostage pour les phases solides et par traitement biologique ou filtration membranaire pour les phases liquides.

2. Les filières étudiées et les méthodes mises en œuvre dans DIVA

Le projet s'est concentré sur 2 installations à la ferme, 1 installation territoriale et 2 usines de méthanisation-compostage (1 traitant des biodéchets et 1 traitant la fraction fermentescible des ordures ménagères). Cinq campagnes de prélèvement ont été réalisées sur 1 an pour chaque site, avec collecte des digestats bruts et séparés (phases solides et liquides), et lorsque c'était possible post-traités (composts de digestats, digestats séchés, condensats de filtration membranaire). En l'absence de cadre réglementaire, les caractéristiques physique et chimique des digestats ont été analysées selon les normes engrais et amendement existantes (NFU44-051, NFU44-095 et NFU42-001), ainsi que par des tests de rhéologie, de déshydratabilité et d'activité biologique (respirométrie, potentiel méthanogène).

Le comportement des digestats bruts et séparés (phases liquide et solide) des cinq filières a été étudié en pilotes de laboratoire lors de différents post-traitements : séchage ou compostage pour les digestats bruts et phases solides, oxydation biologique ou séparation membranaire pour les phases liquides. Chaque fois que c'était possible, les performances en termes d'hygiénisation, de séchage, d'émissions gazeuses, et de consommation énergétique lors du traitement ont été déterminées. La composition des produits obtenus a été analysée.

¹ (ADEME, 2006 ; AFNOR, 2006)

La valeur agronomique des digestats bruts, séparés et post-traités ainsi que les bénéfices/risques associés à leur retour au sol ont été déterminés par des essais au laboratoire et au champ, et de la modélisation. Ces essais ont permis de déterminer la valeur fertilisante azotée et les risques de volatilisation d'ammoniac et d'émission de N₂O à court terme après l'apport au sol, ainsi que la dynamique de minéralisation du carbone (C) et de l'azote (N) à moyen terme et la capacité des apports de digestats à entretenir les stocks de matière organique dans les sols, les risques de phytotoxicité, et la simulation du devenir au champ du C et N.

Les données obtenues par les partenaires du projet, associées aux données des sites réels et, lorsque nécessaire, aux données bibliographiques ont été utilisées pour l'évaluation environnementale (via l'Analyse du Cycle de Vie) et l'évaluation économique des filières de post-traitement en comparaison avec un épandage direct du digestat brut.

3. Résultats majeurs du projet

La composition et les propriétés physiques des digestats bruts dépendent de la composition des déchets méthanisés mais varient peu (moins de 10%) pour une même filière malgré la variation des déchets entrant dans le digesteur. Cette observation est importante vis-à-vis des dossiers d'homologation qui demandent une constance de composition et comportement des produits homologués.

Les propriétés d'écoulement et la capacité de déshydratation mécanique des digestats peuvent être définies à partir de leur taux en matière sèche et du ratio matière organique/matière sèche. Ces données peuvent être utilisées pour le dimensionnement des épandeurs et des presses.

Au niveau des post-traitements, **la séparation de phase**, en séparant l'ammoniac et le potassium dans la phase liquide d'un côté et le carbone, le phosphore et les métaux dans la phase solide d'un autre côté, supprime le lien qui existait entre la composition des déchets méthanisés et la composition des digestats. C'est une étape intéressante dans la filière car elle permet une réduction globale des émissions de N₂O (gaz à effet de serre) après épandage des phases séparées comparé à l'épandage du digestat brut.

Le séchage des phases solides des digestats entraîne la volatilisation de 75% de l'ammoniac à 70°C et de 100% au-dessus de 90°C. Il conduit à une perte importante de la valeur fertilisante des digestats. Tous les sècheurs de digestat devraient donc être munis d'un système de collecte efficace des buées pour éviter les émissions dans l'atmosphère et assurer la sécurité des travailleurs sur site. Le séchage sous air chaud, technologie rencontrée lors de la méthanisation à la ferme, ne permet pas une hygiénisation du digestat car il ne détruit pas les spores de *Clostridium perfringens*. Le séchage par contact-agitation, avec des temps de séjour plus long et des températures plus élevées dans le produit, hygiénise le digestat mais génère un produit très pulvérulent qui a posé des problèmes techniques lors de sa manipulation. Ce problème ne s'est pas posé pour les procédés de séchage sous air chaud.

Le compostage des phases solides des digestats peut requérir l'ajout de structurant et/ou de co-substrats pour obtenir une montée en température correcte. Il peut cependant être utilisé pour sécher les digestats. La forte teneur en ammoniac des digestats entraîne des émissions importantes en début de compostage. Il y a donc là encore une perte importante de la valeur fertilisante des digestats. Comme pour le séchage, ces émissions doivent être captées pour éviter la pollution de l'air et assurer la sécurité des travailleurs sur site.

La **nitrification** des digestats liquides permet d'éviter les émissions d'ammoniac tout en gardant l'azote dans le digestat, cette piste de recherche pourrait être mieux explorée.

Les **procédés de filtration membranaire** requièrent des prétraitements importants des digestats liquides pour limiter les problèmes de colmatage des membranes. Ils permettent cependant de capter plus de 93% de la matière organique résiduelle et 95% des ions des digestats pour produire un liquide incolore.

Les digestats présentent des **propriétés agronomiques** proches à la fois des engrais et des amendements, très largement expliquées par leur teneur en azote ammoniacal et en matière organique stabilisée dont la proportion dépend de l'efficacité de la phase de digestion anaérobie. Les conditions d'épandage doivent être maîtrisées pour limiter la volatilisation qui peut entraîner la perte de 30 à 84% de l'azote ammoniacal. Une fois dans les sols, les digestats induisent des émissions de N₂O supérieures à celle des engrais minéraux. Ces émissions sont plus importantes pour les digestats qui possèdent un faible C/Norg. Les essais au champ n'ont pas montré d'effet très positif ou très négatif de l'apport des digestats sur les rendements de production des cultures, avec des coefficients équivalent engrais mesurés de 40 à 50%.

L'**évaluation des filières** montre que l'épandage direct des digestats est la solution la plus économe et, en général, la moins impactante au niveau environnemental global. Les post-traitements plus poussés n'ont un réel intérêt que dans un contexte d'excédents en azote ou en phosphore qui imposent l'exportation du digestat ou dans un processus de commercialisation des produits générés.

4. Perspectives

De par son étendue, le projet a permis de tester différentes possibilités pour obtenir une vision globale des filières et des technologies. Les verrous qui restent à travailler sont multiples :

Réglementaires. Les digestats ne satisfaisant à aucune des normes existantes, il est nécessaire de poursuivre les demandes d'homologation pour faire avancer la législation et les connaissances des digestats. Dans ce sens, des travaux et une réflexion de fond doivent être entrepris pour les indicateurs entérocoques et *Clostridium perfringens* pour lesquels les méthodes normalisées actuelles fonctionnent mal et posent problème.

Technologiques. Les travaux réalisés et les nombreux retours d'informations collectées pendant DIVA ont montré que la mise en œuvre de chacun des procédés de post-traitement des digestats requiert une optimisation pour obtenir les produits escomptés. La plupart des procédés installés sur site fonctionnent mal, voire pas du tout. Leurs coûts de maintenance sont largement sous-estimés. D'autre part, il est absolument nécessaire de travailler sur la récupération des émissions d'ammoniac au séchage et au compostage pour au minimum réduire les émissions vers l'atmosphère et assurer la sécurité des travailleurs ainsi que sur la récupération de l'azote pour le valoriser.

Agronomiques. Au-delà des nécessaires besoins de données et de modélisation à poursuivre, il apparaît que des essais au champ sont toujours nécessaires pour tester la mise en œuvre de l'épandage réel des digestats (technologies disponibles), confirmer et prédire leurs valeurs de coefficient équivalent engrais et valider l'innocuité à long terme de leur épandage.

Analyse environnementale. L'analyse du cycle de vie est une méthode d'évaluation des impacts environnementaux d'un service, qui est quantifié au travers d'unités fonctionnelles et dans un périmètre déterminé. Le caractère global de cette méthode a soulevé des interrogations sur l'intérêt du post-traitement des digestats, sans toutefois obtenir de réponse ferme. L'ACV demande encore beaucoup de développement pour l'évaluation localisée d'un impact, ce qui est absolument nécessaire dans le cas du retour au sol des déchets.

5. Production scientifique et brevets depuis le début du projet

Les travaux réalisés dans DIVA ont été diffusés dans 24 conférences internationales, 16 conférences de vulgarisation et ont fait l'objet de 4 publications scientifiques. Cependant, l'impact de DIVA a été plus visible au niveau national par la présentation des résultats chaque année à un comité de suivi composé d'acteurs de la filière, des associations, des collectivités et des donneurs d'ordre ; la participation aux comités de pilotage du projet CASDAR Valdipro pour l'homologation des digestats agricoles et par la présentation des travaux au BN Ferti et aux colloques nationaux.

6. Illustration

Une illustration avec un schéma, graphique ou photo et une brève légende. L'illustration doit être clairement lisible à une taille d'environ 6cm de large et 5cm de hauteur. Prévoir une résolution suffisante pour l'impression. Envoyer seulement des illustrations dont vous détenez les droits.

7. Informations factuelles

Le projet DIVA est un projet de recherche Industrielle coordonné par Irstea Rennes et la PME Solagro. Il associe aussi l'INRA Grignon, l'Institut Européen des Membranes Montpellier, ARMINES des Mines Albi et les entreprises Géotexia et Suez Environnement. Le projet a débuté en décembre 2010 et a duré 48 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 1 226 387 € pour un coût global de l'ordre de 3 817 104 €.

B.2 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN ANGLAIS

Suivre impérativement les instructions ci-dessus.

How to value digestate from anaerobic digestion?

Agronomic, technical, economic and environmental assessment of the benefits of managing digestate by direct spreading or by phase separation followed by drying or composting of the solid phase and biological treatment or membrane filtration of the liquid phase.

1. The challenges of managing digestate

Political incentives of the past 10 years have led to a diversification of biogas production to agricultural waste (farm's waste alone or mixed with other waste from a territory), biowaste and residual household waste. However, despite their recognized value (renewable energy production, capture of greenhouse gases emissions (GHG), recycling of organic matter), these sectors are struggling to grow, partly due to a lack of effective valuation of digestate.

Digestates are organic residues generated during the anaerobic digestion process. It represents a volume equivalent to the one of the treated waste and has characteristics

depending on its origin. Nowadays, digestates have a status of waste and can only be managed by a spreading plan or composting.

The objective of DIVA was to acquire knowledge on the composition of digestates and on their post-treatment systems in order to assess the risk /benefit of their use in agriculture and to provide data to stakeholders. Several technological solutions were evaluated and compared to the option of a direct application of raw digestate: phase separation and application of separate phases or after treatment by drying or composting for solid phases and biological treatment or membrane filtration for the liquid phases.

2. The sectors studied and the methods implemented in DIVA

The project focused on 2 farm anaerobic digesters, 1 territory digester and 2 digester-composting plants of urban waste (1 treating biowaste and 1 treating the fermentable fraction of household waste). Five sampling campaigns were carried out on 1 year for each site with collection of raw digestate, separated digestates (solid and liquid phases), and where possible post-processed digestates (composts, dried digestate, membrane filtration condensate). In the absence of a regulatory framework for digestate, their physical and chemical characteristics were analyzed using existing standards for fertilizer and amendment (NFU44-051, NFU44-095 and NFU42-001) and by rheological tests, dehydratability, and biological activity (respirometry, methanogen potential).

The behavior of raw and separated digestate (liquid and solid phases) of the five sectors was studied in laboratory pilots during various post-processing: drying or composting for raw digestates and solid phases, biological oxidation or membrane separation for liquid phases. Whenever possible, the performance in terms of sanitization, drying, gaseous emissions and energy consumption during processing was determined. The composition of the products obtained was analyzed.

The agronomic value of raw, separated and post-processed digestates, and the benefits/ risks associated with their return to the soil, were determined by tests in the laboratory and in the field, and modeling. These tests were used to determine the nitrogen fertilizer value and risk of volatilization of ammonia and N₂O emission in the short term after spreading. The contribution to soil in the medium term, carbon (C) and nitrogen (N) mineralization dynamics and the ability of the contributions of digestates to maintain organic matter stocks in soils, risk of phytotoxicity and simulation of C and N fate into the field were determined.

The data obtained by the project partners combined with data from real sites and, when necessary, bibliographic data were used for the environmental assessment (using the Life Cycle Analysis) and the economic evaluation of digestate post-treatment in comparison to a direct application of raw digestate.

3. Project main results

The composition and physical properties of raw digestate depend on the composition of the digested waste but does not change dramatically (less than 10 %) for the same sector despite the big variation of waste entering the digester. This observation is important for digestate homologation that requires constant composition and behavior of approved products.

The flow properties and the mechanical dewatering capacity of digestate can be defined from their amount of dry matter and the ratio: organic matter / dry matter. These data can be used for the design of spreaders and presses.

The **phase separation post-treatment**, by separating ammonia and potassium in the liquid phase on one side and carbon, phosphorus and metals in the solid phase on another side, removes the link between the composition of the waste digested and the one of the digestate. This is an interesting step in anaerobic digestion plants because it enables an overall reduction of the N₂O emissions (greenhouse gas) by spreading the separated phases compared to spreading raw digestate.

Drying the solid phase of digestates causes the volatilization of 75% of the ammonia at 70°C and 100% above 90°C. It therefore leads to a significant loss of the digestate fertilizer value. All digestate drier must thus be equipped with an effective system for collecting the vapors to prevent emissions into the atmosphere and ensure the safety of workers on site. Hot air drying technology used for on-farm anaerobic digestion, does not allow for sanitization of digestate as it does not destroy spores of *Clostridium perfringens*. Drying by contact - agitation, with longer residence times and higher temperatures in the product, sanitizes digestate but generates a powdered product that posed technical problems during handling. This problem did not arise for hot air drying processes.

Composting of raw or solid phase digestates may require the addition of structuring and /or co-substrates to obtain a correct temperature rise. However, it can be used to dry the digestate. The high ammonia content digestate causes significant emissions at the beginning of composting. There is therefore still an important loss of the digestate fertilizer value. As for drying, these emissions must be captured to prevent air pollution and ensure the safety of workers on site.

Nitrification of liquid digestate prevents ammonia emissions while keeping the nitrogen in the digestate, this line of research could be better explored.

Membrane filtration processes require significant pretreatment of liquid digestate to limit membrane clogging problems. However, they allow capturing over 93% of the residual organic matter and 95% of digestate ions to produce a colorless liquid.

Digestate have **agronomic properties** close to both fertilizers and amendments, largely explained by their ammonia nitrogen content and stabilized organic matter. The land application must be mastered to limit volatilization which may cause the loss of 30-84% of ammonia nitrogen. Once in the soil, digestate induce N₂O emissions superior to that of mineral fertilizers. These emissions are greater for digestate which have a low C / N_{org}. Field trials did not show very positive or negative effect of digestate on crops yields, with fertilizers equivalent coefficients measured from 40 to 50%.

The **assessment** analysis shows that direct application of digestate is the most efficient solution and, in general, with the less impact at global environmental level. The most advanced post-treatments have a real interest either in a context of nitrogen or phosphorus surpluses which impose digestate exportation, or in a marketing process to generate new products.

4. Prospects

Because of its scope, the DIVA project has tested different possibilities to get an overview of sectors and technologies of digestate management. The remaining locks are multiple:

Regulation. Digestates do not satisfy any of the existing standards, it is necessary to continue to apply for homologations to get advance in the legislation and better knowledge of

digestate. In this sense, a work and deep questioning should be undertaken about the use of enterococci and *Clostridium perfringens* as indicators for which current standardized methods are problematic.

Technology. The work done and many returns of information collected on site showed that the implementation of digestate post-processing requires optimization to achieve desired product quality. Most of the processes installed on site are only poorly or not working at all. Their maintenance costs have been greatly underestimated. Moreover, it is absolutely necessary to work on the recovery of ammonia emissions from dryers and from composting for, at least, reduce emissions to the atmosphere and ensure the safety of workers and, better, capture and recycle nitrogen.

Agronomy. Beyond the necessary needs in data and modeling, it appears that field trials are still needed to test the efficiency of digestate spreading (available technologies), confirm and predict digestates value as fertilizer equivalent coefficient and validate the long-term safety of their application.

Environmental analysis. The Life Cycle Assessment method is used to assess the environmental impacts of a service, which is quantified by the means of functional units applied in a defined area. The global character of this method has raised questions on the interest of post-processing digestate, without obtaining firm answer. LCA still requires many developments for the assessment of localized impacts, which is absolutely necessary in the case of application of waste on soil.

5. Scientific production and patents since the project began

Work in DIVA was presented in 24 international conferences, 16 public conferences and published in 4 scientific publications. However, the impact of DIVA was more visible at national level by presenting the results every year to a monitoring committee made up of stakeholders in the sector, associations, collectivities and ministries; participating in the steering committees of the CASDAR Valdiopro project for the approval of agricultural digestate and by presenting of work at the BN Ferti and national conferences.

6. Illustration

7. Factual information

The DIVA project is an Industrial research project coordinated by Cemagref Rennes and Solagro SMEs. It also associates INRA Grignon, the European Membrane Institute in Montpellier, ARMINES of Mines Albi and Géotexia and Suez Environnement companies. The project started in December 2010 and lasted 48 months. It received founding from ANR up to € 1,226,387 for a total cost of about € 3,817,104.

C MEMOIRE SCIENTIFIQUE

Mémoire scientifique confidentiel : NON

C.1 RESUME DU MEMOIRE

Comment valoriser les digestats de méthanisation ?

Évaluation agronomique, technique, économique et environnementale de la valorisation des digestats de méthanisation par épandage direct ou par séparation de phase puis séchage ou compostage des solides et traitement biologique ou filtration membranaire des liquides.

1. Les enjeux de la gestion des digestats de méthanisation

Les incitations politiques des 10 dernières années ont conduit à une diversification des filières de méthanisation vers les déchets agricoles (seuls à la ferme ou en mélange en méthanisation territoriale), les biodéchets et les ordures ménagères résiduelles. Toutefois, malgré leurs atouts avérés (production d'énergie renouvelable, captage des émissions de gaz à effet de serre (GES) des déchets, valorisation de la matière organique), ces filières peinent à se développer, en partie par manque de valorisation efficace des digestats.

Les digestats sont les résidus organiques générés lors du processus de méthanisation. Ils représentent un volume équivalent à celui des déchets traités et possèdent des caractéristiques propres à leur filière. Ils ont aujourd'hui le statut de déchet et ne peuvent être gérés que par un plan d'épandage ou par compostage caractérisé².

L'objectif de DIVA était d'acquérir des connaissances sur la composition des digestats et sur leurs filières de post-traitement dans le but d'évaluer les bénéfices/risques de leur utilisation en agriculture et de fournir des données aux acteurs de la filière. Plusieurs solutions technologiques ont été évaluées et comparées à l'option d'un épandage direct des digestats brut : la séparation de phase et l'épandage des phases séparées ou leur post-traitement par séchage ou compostage pour les phases solides et par traitement biologique ou filtration membranaire pour les phases liquides.

2. Les filières étudiées et les méthodes mises en œuvre dans DIVA

Le projet s'est concentré sur 2 installations à la ferme, 1 installation territoriale et 2 usines de méthanisation-compostage (1 traitant des biodéchets et 1 traitant la fraction fermentescible des ordures ménagères). Cinq campagnes de prélèvement ont été réalisées sur 1 an pour chaque site, avec collecte des digestats bruts et séparés (phases solides et liquides), et lorsque c'était possible post-traités (composts de digestats, digestats séchés, condensats de filtration membranaire). En l'absence de cadre réglementaire, les caractéristiques physique et chimique des digestats ont été analysées selon les normes engrais et amendement existantes (NFU44-051, NFU44-095 et NFU42-001), ainsi que par des tests de rhéologie, de déshydratabilité et d'activité biologique (respirométrie, potentiel méthanogène).

Le comportement des digestats bruts et séparés (phases liquide et solide) des cinq filières a été étudié en pilotes de laboratoire lors de différents post-traitements : séchage ou compostage pour les digestats bruts et phases solides, oxydation biologique ou séparation membranaire pour les phases liquides. Chaque fois que c'était possible, les performances en

² (ADEME, 2006 ; AFNOR, 2006)

termes d'hygiénisation, de séchage, d'émissions gazeuses, et de consommation énergétique lors du traitement ont été déterminées. La composition des produits obtenus a été analysée.

La valeur agronomique des digestats bruts, séparés et post-traités ainsi que les bénéfices/risques associés à leur retour au sol ont été déterminés par des essais au laboratoire et au champ, et de la modélisation. Ces essais ont permis de déterminer la valeur fertilisante azotée et les risques de volatilisation d'ammoniac et d'émission de N₂O à court terme après l'apport au sol, ainsi que la dynamique de minéralisation du carbone (C) et de l'azote (N) à moyen terme et la capacité des apports de digestats à entretenir les stocks de matière organique dans les sols, les risques de phytotoxicité, et la simulation du devenir au champ du C et N.

Les données obtenues par les partenaires du projet, associées aux données des sites réels et, lorsque nécessaire, aux données bibliographiques ont été utilisées pour l'évaluation environnementale (via l'Analyse du Cycle de Vie) et l'évaluation économique des filières de post-traitement en comparaison avec un épandage direct du digestat brut.

3. Résultats majeurs du projet

La composition et les propriétés physiques des digestats bruts dépendent de la composition des déchets méthanisés mais varient peu (moins de 10%) pour une même filière malgré la variation des déchets entrant dans le digesteur. Cette observation est importante vis-à-vis des dossiers d'homologation qui demandent une constance de composition et comportement des produits homologués.

Les propriétés d'écoulement et la capacité de déshydratation mécanique des digestats peuvent être définies à partir de leur taux en matière sèche et le ratio matière organique/matière sèche. Ces données peuvent être utilisées pour le dimensionnement des épandeurs et des presses.

Au niveau des post-traitements, **la séparation de phase**, en séparant l'ammoniac et le potassium dans la phase liquide d'un côté et le carbone, le phosphore et les métaux dans la phase solide d'un autre côté, supprime le lien qui existait entre la composition des déchets méthanisés et la composition des digestats. C'est une étape intéressante dans la filière car elle permet une réduction globale des émissions de N₂O (gaz à effet de serre) après épandage des phases séparées comparé à l'épandage du digestat brut.

Le séchage des phases solides des digestats entraîne la volatilisation de 75% de l'ammoniac à 70°C et de 100% au-dessus de 90°C. Il conduit à une perte importante de la valeur fertilisante des digestats. Tous les sècheurs de digestat devraient donc être munis d'un système de collecte efficace des buées pour éviter les émissions dans l'atmosphère et assurer la sécurité des travailleurs sur site. Le séchage sous air chaud, technologie rencontrée lors de la méthanisation à la ferme, ne permet pas une hygiénisation du digestat car il ne détruit pas les spores de *Clostridium perfringens*. Le séchage par contact-agitation, avec des temps de séjour plus long et des températures plus élevées dans le produit, hygiénise le digestat mais génère un produit très pulvérulent qui a posé des problèmes techniques lors de sa manipulation. Ce problème ne s'est pas posé pour les procédés de séchage sous air chaud.

Le compostage des phases solides des digestats peut requérir l'ajout de structurant et/ou de co-substrats pour obtenir une montée en température correcte. Il peut cependant être utilisé pour sécher les digestats. La forte teneur en ammoniac des digestats entraîne des émissions

importantes en début de compostage. Il y a donc là encore une perte importante de la valeur fertilisante des digestats. Comme pour le séchage, ces émissions doivent être captées pour éviter la pollution de l'air et assurer la sécurité des travailleurs sur site.

La nitrification des digestats liquides permet d'éviter les émissions d'ammoniac tout en gardant l'azote dans le digestat, cette piste de recherche pourrait être mieux explorée.

Les procédés de filtration membranaire requièrent des prétraitements importants des digestats liquides pour limiter les problèmes de colmatage des membranes. Ils permettent cependant de capter plus de 93% de la matière organique résiduelle et 95% des ions des digestats pour produire un liquide incolore.

Les digestats présentent des **propriétés agronomiques** proches à la fois des engrais et des amendements, très largement expliquées par leur teneur en azote ammoniacal et en matière organique stabilisée. Les conditions d'épandage doivent être maîtrisées pour limiter la volatilisation qui peut entraîner la perte de 30 à 84% de l'azote ammoniacal. Une fois dans les sols, les digestats induisent des émissions de N₂O supérieures à celle des engrais minéraux. Ces émissions sont plus importantes pour les digestats qui possèdent un faible C/Norg. Les essais au champ n'ont pas montré d'effet très positif ou très négatif de l'apport des digestats sur les rendements de production des cultures, avec des coefficients équivalent engrais mesurés de 40 à 50%.

L'évaluation des filières montre que l'épandage direct des digestats est la solution la plus économe et, en général, la moins impactante au niveau environnemental global. Les post-traitements plus poussés n'ont un réel intérêt que dans un contexte d'excédents en azote ou en phosphore qui imposent l'exportation du digestat ou dans un processus de commercialisation des produits générés.

4. Perspectives

De par son étendue, le projet a permis de tester différentes possibilités pour obtenir une vision globale des filières et des technologies. Les verrous qui restent à travailler sont multiples :

Réglementaires. Les digestats ne satisfaisant à aucune des normes existantes, il est nécessaire de poursuivre les demandes d'homologation pour faire avancer la législation et les connaissances des digestats. Dans ce sens, des travaux et une réflexion de fond doivent être entrepris pour les indicateurs entérocoques et *Clostridium perfringens* pour lesquels les méthodes normalisées actuelles fonctionnent mal et posent problème.

Technologiques. Les travaux réalisés et les nombreux retours d'informations collectées pendant DIVA ont montré que la mise en œuvre de chacun des procédés de post-traitement des digestats requiert une optimisation pour obtenir les produits escomptés. La plupart des procédés installés sur site fonctionnent mal, voire pas du tout. Leurs coûts de maintenance sont largement sous-estimés. D'autre part, il est absolument nécessaire de travailler sur la récupération des émissions d'ammoniac au séchage et au compostage pour au minimum réduire les émissions vers l'atmosphère et assurer la sécurité des travailleurs ainsi que sur la récupération de l'azote pour le valoriser.

Agronomiques. Au-delà des nécessaires besoins de données et de modélisation à poursuivre, il apparaît que des essais au champ sont toujours nécessaires pour tester la mise en œuvre de l'épandage réel des digestats (technologies disponibles), confirmer et prédire

leurs valeurs de coefficient équivalent engrais et valider l'innocuité à long terme de leur épandage.

Analyse environnementale. L'analyse du cycle de vie est une méthode d'évaluation des impacts environnementaux d'un service, qui est quantifié au travers d'unités fonctionnelles et dans un périmètre déterminé. Le caractère global de cette méthode a soulevé des interrogations sur l'intérêt du post-traitement des digestats, sans toutefois obtenir de réponse ferme. L'ACV demande encore beaucoup de développement pour l'évaluation localisée d'un impact, ce qui est absolument nécessaire dans le cas du retour au sol des déchets.

5. Production scientifique et brevets depuis le début du projet

Les travaux réalisés dans DIVA ont été diffusés dans 24 conférences internationales, 16 conférences de vulgarisation et ont fait l'objet de 4 publications scientifiques. Cependant, l'impact de DIVA a été plus visible au niveau national par la présentation des résultats chaque année à un comité de suivi composé d'acteurs de la filière, des associations, des collectivités et des donneurs d'ordre ; la participation aux comités de pilotage du projet CASDAR Valdipro pour l'homologation des digestats agricoles et par la présentation des travaux au BN Ferti et aux colloques nationaux.

6. Illustration

Une illustration avec un schéma, graphique ou photo et une brève légende. L'illustration doit être clairement lisible à une taille d'environ 6cm de large et 5cm de hauteur. Prévoir une résolution suffisante pour l'impression. Envoyer seulement des illustrations dont vous détenez les droits.

7. Informations factuelles

Le projet DIVA est un projet de recherche Industrielle coordonné par Irstea Rennes et la PME Solagro. Il associe aussi l'INRA Grignon, l'Institut Européen des Membranes Montpellier, ARMINES des Mines Albi et les entreprises Géotexia et Suez Environnement. Le projet a débuté en décembre 2010 et a duré 48 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 1 226 387 € pour un coût global de l'ordre de 3 817 104 €.

C.2 ENJEUX ET PROBLEMATIQUE, ETAT DE L'ART

Le projet DIVA a été proposé à l'ANR bioénergie en 2009 puis 2010 sous la coordination d'Irstea et Solagro suite au constat d'un manque de connaissance des bénéfices/risques et techniques disponibles pour valoriser les digestats de méthanisation en agriculture.

En effet, sous l'impulsion de nombreuses incitations politiques, économiques et environnementales³, et avec l'exemple de pays voisins comme l'Allemagne⁴, des installations de méthanisation étaient en construction ou en projet dans des filières aussi diverses que la méthanisation à la ferme, la méthanisation territoriale⁵, la méthanisation de biodéchets⁶ ou la

³ Directive 1999/31/EC sur la réduction de mise en décharge des déchets municipaux biodégradables. Rééquilibrage de la production énergétique française vers des systèmes décentralisés (COMOP 10 du Grenelle de l'Environnement).

Réduction des émissions de GES à partir des déchets (EEA 2008, ADEME, 2007; Mata-Alvarez et al., 2000

⁴ Moletta and Cansell, 2003 ; ASTEE, 2006 ; Banks et al., 2007 ; De Baere and Mattheeuws, 2008

⁵ Mélange d'effluents d'élevage et de déchets d'un territoire

méthanisation des ordures ménagères résiduelles. Pour nombre de ces projets, la méthanisation ne présentait que des atouts : production d'une énergie renouvelable, captage des émissions de gaz à effet de serre (GES) des déchets (boues urbaines, déjections animales, biodéchets municipaux et déchets et effluents d'industries agroalimentaires), valorisation biologique de la matière organique, voire même réduction du volume de déchets... Face à toutes ces assertions, la question de la gestion des digestats nous paraissait fortement sous-estimé, que ce soit en termes de volume et qualité des digestats, de moyens de gestion et/ou post-traitement des digestats, d'émissions gazeuses à l'épandage (ammoniac et GES) ou, pour finir, en termes de réglementation. En effet, le digestat ayant un statut de déchet, il ne pouvait être géré qu'au travers d'un plan d'épandage ou par compostage caractérisé⁷, alors qu'il semblait a priori être potentiellement utilisable comme engrais ou amendement organique.

De nombreuses solutions techniques apparaissaient sur le marché pour gérer les digestats proposant généralement une séparation de phase puis le séchage ou compostage des phases solides et divers modes de gestion des phases liquides (traitement biologique, filtration membranaire, ...) sans qu'une réelle évaluation technique, économique et environnementale de ces post-traitements n'ait été réalisée. De nombreuses questions se posaient sur la composition des digestats bruts et post-traités, la variabilité de cette composition en fonction des intrants, des filières, de la saison..., et aussi sur le réel intérêt agronomique de leur valorisation en agriculture. Ces questions devenaient de plus en plus prégnantes avec le développement de filières jusqu'alors peu étudiées en France comme la méthanisation à la ferme ou la méthanisation des ordures ménagères résiduelles, et avec la publication de résultats contradictoires sur la qualité des digestats et leur intérêt agronomique⁸. L'ensemble de ces questions était posé par la puissance publique aux scientifiques et aux acteurs de la profession afin de faire évoluer la réglementation nationale et internationale. Nous nous devons de les aborder dans un programme de recherche industrielle pluridisciplinaire intégrant des partenaires publics et privés.

C'est pourquoi nous avons construit le projet DIVA qui avait pour objectif principal de faire évoluer les connaissances sur la composition des digestats de méthanisation et sur leurs filières de post-traitement dans un but final de valorisation agronomique et de durabilité des filières.

C.3 APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

L'approche de DIVA a consisté en (Figure 1) :

1. Réaliser un état des lieux des connaissances sur les digestats et les procédés de post-traitement majoritairement utilisés en France (Tâche 2, L2.1-3). Une recherche bibliographique a été réalisée afin de rassembler les données de la littérature grise et scientifique sur la composition des digestats de méthanisation. Cette étape a permis de confirmer le manque de connaissances sur les filières de méthanisation autres que celles des boues d'épuration et d'effluents d'Industries Agro-Alimentaires et d'identifier les filières de méthanisation en développement : méthanisation à la ferme, méthanisation territoriale,

⁶ Déchets non dangereux biodégradables de jardin et de parc, alimentaires ou de cuisine, issus des ménages, des restaurants, des traiteurs et des magasins de vente au détail (GMS), ainsi que tout déchet comparable provenant des établissements de production ou de transformation de denrées alimentaires (Code de l'environnement, R541-8)

⁷ Norme NFU 44-051 (AFNOR, 2006 ; ADEME, 2006)

⁸ Salminen et al., 2001 ; Solagro 2004 ; Kupper et Fuchs, 2007 ; Schmidt et Meissl, 2007 ; Favoino, 2008 ; Flotats et al., 2009

méthanisation-compostage de biodéchets ou de la fraction fermentescible des ordures ménagères. Elle a aussi montré l'utilisation quasi-systématique de procédés de séparation de phase solide/liquide dans les filières.

2. Analyser la composition des digestats bruts et séparés des filières sélectionnées pour évaluer l'intérêt de leur valorisation en agriculture à l'état brut ou après une simple séparation de phase solide/liquide et déterminer leur adéquation aux normes existantes (amendement ou engrais) (Tâches 3, L3.1-3). Une campagne de caractérisation des digestats a été réalisée pour 5 filières de méthanisation représentatives de la diversité des filières françaises en développement : 2 installations à la ferme, une installation territoriale, une usine de méthanisation-compostage de biodéchets et une usine de méthanisation-compostage de la fraction fermentescible des ordures ménagères. Pour chaque site étudié, 5 visites ont été effectuées sur une période de 1 an environ, avec collecte des digestats bruts, séparés (phases solides et liquides) et lorsque c'était possible post-traités (composts de digestats, digestats séchés, condensats de filtration membranaire). En l'absence de cadre réglementaire, la caractérisation physique et chimique des digestats bruts, séparés et post-traités s'est basée sur les normes engrais et amendement existantes (NFU44-051, NFU44-095 et NFU42-001) ainsi que sur des tests de rhéologie, de déshydratabilité et d'activité biologique (respirométrie, potentiel méthanogène). La valeur agronomique de l'ensemble de ces digestats a été déterminée par des essais au laboratoire et au champ tel que décrit plus loin (Tâche 5). Ces données ont servi à l'évaluation des filières réalisée en Tâche 6.

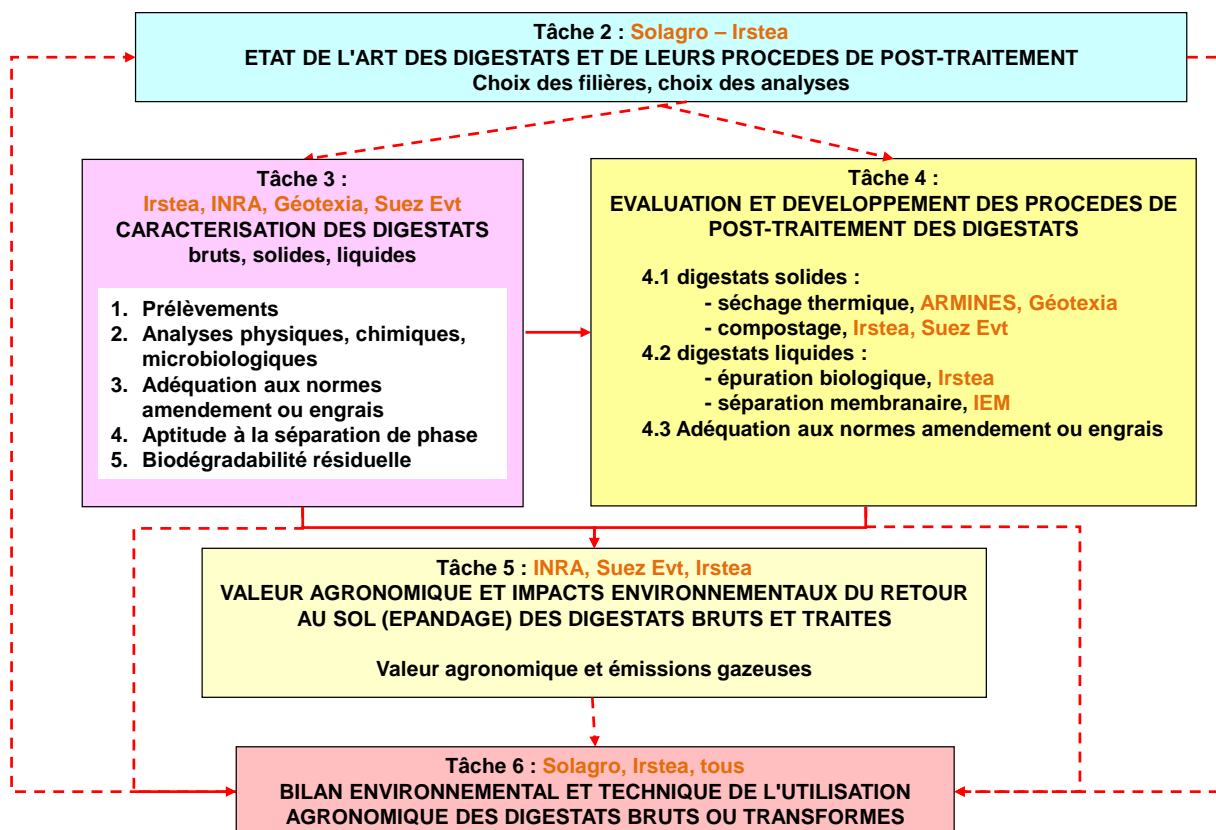


Figure 1. Organisation du projet DIVA. Les flèches pleines représentent des transferts de digestats et produits, les flèches pointillées des transferts d'information. La Tâche 1 était la coordination.

3. Evaluer la capacité des digestats à être transformés via des post-traitements pour atteindre le statut de produit (Tâches 4, L4.1.x-4.2.x-4.3.x). Le comportement des digestats bruts et séparés (phases liquide et solide) des cinq filières suivies en Tâche 3 a été étudié lors de différents post-traitements : séchage et compostage pour les digestats bruts et phases solides, oxydation biologique et séparation membranaire pour les phases liquides. Les travaux ont été réalisés en pilotes de laboratoire. Chaque fois que c'était possible, les performances en termes d'hygiénisation, de séchage, d'émissions gazeuses lors du traitement, de consommation énergétique, de composition et de qualité agronomique du produit obtenu ont été déterminées. Ces données ont servi à l'évaluation des filières réalisées en Tâche 6.

4. Déterminer la valeur agronomique des digestats bruts, séparés et post-traités, et les bénéfiques/risques associés à leur retour au sol (Tâche 5, L5.1-4). L'intérêt du retour au sol des digestats a été abordé par des essais au laboratoire, des essais au champ et de la modélisation qui permettent de déterminer : la valeur fertilisante azotée et les risques de volatilisation d'ammoniac et d'émission de N₂O à court terme après l'apport au sol, la dynamique de minéralisation du carbone (C) et de l'azote (N) à moyen terme et la capacité des apports de digestats à entretenir les stocks de matière organique dans les sols. Les risques de phytotoxicité ont aussi été testés et une simulation du devenir au champ du C et N a été effectuée. Ces données ont servi à l'évaluation des filières réalisées en Tâche 6.

5. Effectuer un bilan technico-économique et environnemental (ACV) des filières de gestion des digestats (post-traitement et épandage) en comparaison avec l'épandage direct (Tâche 6, L6.1-2). Ces travaux se sont basés sur les données obtenues par les partenaires du projet en Tâches 2 à 5 (caractérisation matière, émissions gazeuses CO₂, N₂O, CH₄ et NH₃ des pilotes de compostage et séchage ainsi que consécutivement à l'épandage), les données des sites réels (coûts de fonctionnement et données énergétiques et matière) et des données bibliographiques. Ces différents types de données ont été utilisés à la fois pour l'évaluation environnementale (via l'Analyse du Cycle de Vie, ACV) et l'évaluation économique. Les deux types d'évaluation ont considéré les mêmes frontières pour les filières étudiées : la gestion du digestat brut jusqu'à son épandage direct ou l'épandage des produits issus de son post-traitement.

C.4 RESULTATS OBTENUS

Positionner les résultats par rapports aux livrables du projet et aux publications, brevets etc. Revisiter l'état de l'art et les enjeux à la fin du projet.

Le projet s'est concentré sur 2 filières agricoles (AGRI1 avec une forte composante de fumier bovin et AGRI2 avec une base de lisier porcin), une installation territoriale (TERR, avec base de lisier porcin), une usine de méthanisation-compostage de biodéchets (BIOD, méthanisation thermophile) et une usine de méthanisation-compostage de la fraction fermentescible des ordures ménagères (OMR, méthanisation dite « sèche ») (Tableau 1).

Tableau 1. Caractéristiques de base des filières étudiées.

| Filière | Substrats | Type | Temp. (°C) | TS (J) |
|--------------|---|--------|-------------|------------------------------|
| AGRI1 | Fumiers bovins, Issues céréales | humide | mésophile | 60 |
| AGRI2 | Fumiers bovins, Lisiers bovins, Lisiers porcins, Déchets tiers, Déchets IAA | humide | mésophile | 30-40 + post digesteur |
| TERR | Lisiers de porcs, Déchets d'IAA | humide | mésophile | 60 + 15 |
| BIOD | Biodéchets, Déchets tiers, Graisses | humide | thermophile | 21 |
| OMR | OMR, Biodéchets | sèche | thermophile | 21 |

C.4.1 CARACTERISATION DES DIGESTATS, COMPARAISON AUX NORMES ACTUELLES ET CAPACITE DES DIGESTATS BRUTS A ETRE EPANDUS OU DESHYDRATES (TACHE 3, L3.1-3)

1. Les caractéristiques physico-chimiques des digestats bruts dépendent logiquement de la nature des substrats majoritaires traités en méthanisation, de leurs propriétés physiques et du type de méthanisation (liquide ou solide) appliqué. La présence de lisiers porcins ou de déchets de sous-produits animaux augmente la teneur en azote dans le digestat et le rapport entre l'azote ammoniacal et l'azote total. Les propriétés physiques des intrants et les spécificités de mise en œuvre des procédés de méthanisation influencent la teneur en MS⁹ des digestats et permettent de distinguer trois groupes : 1/les digestats bruts issus de sites qui traitent essentiellement des effluents liquides peu chargés en matière sèche (moins de 10%) (ex. de AGRI2 et TERR) ; 2/ les digestats bruts issus de sites qui traitent en voie « dite liquide » des effluents et déchets majoritairement solides (10-20% de MS) (ex. de AGRI1 et BIOD) ; et 3/ le digestat brut issu de procédés traitant en voie « dite sèche » des déchets majoritairement solides (> 20% de MS) (ex. OMR).

Une fois séparés, **les caractéristiques des digestats solides et liquides** dépendent toujours en partie de la qualité du digestat brut, mais sont fortement influencées par l'efficacité de la séparation de phase, elle-même influencée par la teneur en MS des digestats bruts. Ainsi, les digestats présentant une forte teneur en MS présentent un meilleur taux de séparation. A l'issue de la séparation, la presque totalité de l'azote ammoniacal et du potassium se retrouve dans la phase liquide, alors que le phosphore et les éléments traces métalliques se concentrent dans la phase solide. Enfin, le résultat le plus important de cette tâche est peut-être la faible variabilité observée pour la composition des digestats d'une même filière au cours du temps (variabilité généralement inférieure à 10% et toujours < 20% pour l'ensemble des paramètres analysés) malgré une variation importante des substrats entrant dans le méthaniseur.

En termes d'innocuité, il faut noter que les teneurs en **métaux lourds** des digestats sont principalement influencées par l'origine des substrats traités sur les sites de méthanisation. Les digestats agricoles peuvent contenir de fortes teneurs en cuivre et zinc, alors que les digestats issus d'ordures ménagères résiduelles présentent potentiellement des teneurs en chrome, mercure et plomb plus importantes en raison de la présence de ces éléments dans les

⁹ MS, Matière sèche

déchets d'origine. L'arsenic peut être retrouvé en plus grande quantité dans les digestats issus de sites de méthanisation traitant des déchets verts, en raison de la capacité de ces derniers à retenir l'arsenic présent dans le sol. Concernant les **polluants organiques**, les teneurs en PCB sur les digestats analysés ont toujours été inférieures aux limites de quantification et des teneurs en HAP supérieures aux limites de quantification sont seulement détectables sur les digestats issus de déchets ménagers. Enfin, la question des **inertes** est spécifique aux digestats issus de déchets ménagers qu'ils soient issus d'une collecte résiduelle ou d'une collecte séparée. Du point de vue sanitaire, aucune **bactérie** pathogène n'a été mise en évidence dans les digestats analysés. Les teneurs en germes de contamination fécale varient quant à elles largement avec la nature du substrat traité en méthanisation.

2. Comparaison aux normes. En l'absence de dénomination des digestats dans les normes, leur composition a été comparée aux normes amendements organiques et engrais. Il apparaît que **les digestats étudiés (bruts, solides ou liquides) ne correspondent pas aux spécifications de ces normes.** Les digestats étudiés sont généralement trop humides et présentent trop d'azote ammoniacal pour pouvoir être considérés comme amendement. Dans le même temps, les teneurs en azote, phosphore et potassium sont trop faibles pour que ces digestats remplissent les spécifications des normes engrais. Des limites existent quant aux teneurs en métaux lourds et à la présence d'inertes dans le cas des digestats issus de déchets ménagers. Pour atteindre les spécifications des normes, des post-traitements par déshydratation et tri des indésirables sont a minima nécessaires. Dans le cadre des propositions européennes pour la sortie du statut de déchets, les digestats agricoles remplissent les spécifications demandées, si des exceptions sont accordées concernant le cuivre et le zinc. Cependant les digestats de biodéchets étudiés ne remplissent pas les spécifications sur les inertes sans post-traitement. Pour aller plus loin, dans les cas où un post-traitement biologique serait envisagé, il faut retenir que les digestats possèdent une **biodégradabilité résiduelle**, qui représente 10 à 40 % du potentiel méthanogène initial et qui semble dépendre notamment de la nature des substrats et de la gestion du procédé (complétude de la digestion anaérobie selon le triptyque : type de substrat/charge appliquée/temps de séjour dans le digesteur). Enfin, concernant les aspects sanitaires, les teneurs en germes ne posent généralement pas de problème sauf pour les entérocoques et les *Clostridium perfringens*. La détection des entérocoques est très souvent surestimée par la méthode de dénombrement demandée dans les normes et il faudrait utiliser d'autres méthodes (Milieu Slanetz puis BEA par exemple).

3. La capacité des digestats bruts à être épandus ou déshydratés a été approchée par l'étude de leurs propriétés physiques : (i) analyse rhéologique des digestats se focalisant sur leurs propriétés de structure et d'écoulement ainsi que sur leurs points communs et spécificités, (ii) analyse à dire d'experts de leur aptitude à l'épandage et (iii) étude de leur déshydratabilité (aptitude à la séparation de phase) via des mesures de cinétique de déshydratation en cellule de filtration compression et de siccité limite¹⁰, tout en portant une attention particulière à l'étape de floculation.

¹⁰ Siccité : pourcentage massique de matière sèche d'un produit.

Siccité limite : la siccité limite d'une boue à une pression donnée est la siccité atteinte par le gâteau de filtration résultant d'un essai de filtration compression au bout d'une durée théoriquement infinie. Il s'agit d'un indicateur de l'aptitude à la séparation de phase d'une suspension (AFNOR prFD T97-001-1)

Du point de vue **rhéologique**, les digestats bruts étudiés peuvent tous être définis comme des fluides non-Newtoniens, certains avec un seuil d'écoulement (c'est-à-dire qu'ils présentent des caractéristiques solides aux faibles contraintes et des caractéristiques liquides aux contraintes les plus élevées), d'autres sans seuil (ils ne présentent que des caractéristiques liquides, quelle que soit la contrainte appliquée). L'existence ou non du seuil d'écoulement est liée à la fois à la concentration en MS et à la proportion de matière organique dans la matière sèche. Ainsi, sur la base des échantillons testés, deux digestats de même concentration en MS et de même ratio MO¹¹/MS ont le même comportement rhéologique.

En termes d'**épanchabilité**, les digestats les plus fluides (sans seuil de contrainte) peuvent, à dire d'experts, être épanchés avec une tonne à lisier équipée de pendillards. Les autres digestats, à l'état brut, seront plus difficiles à épancher et une séparation de phase est préconisée.

Concernant la **déshydratation mécanique** en système de filtration sur toile, une étape de floculation s'est avérée nécessaire en amont de la séparation de phase pour que des essais de laboratoire soient faisables (teneurs en matières colloïdales élevées des digestats). Les performances de déshydratation des digestats sont très variables selon la filière et les substrats digérés. Un lien a pu être établi entre la siccité limite des digestats et le ratio MO/MS des digestats considérés : plus le ratio MO/MS est faible, plus la siccité limite obtenue est élevée. Cependant, cette relation ne permet d'expliquer que 68% de la variabilité des siccités limites obtenues.

C.4.2 ETUDE DES PROCÉDES DE POST-TRAITEMENT DES DIGESTATS (TACHE 4, L4.X.X)

Suite à l'état de l'art réalisé en début de projet, les travaux se sont focalisés sur le post-traitement des digestats bruts et de leurs phases solides et liquides puisque la majorité des sites de méthanisation mettent en œuvre une étape de séparation de phase. Les post-traitements considérés ont été le séchage et le compostage des solides, et le traitement biologique et la filtration membranaire des liquides.

1. Le comportement au séchage des digestats solides (L4.1.1.x) a été étudié par la méthode de la « courbe caractéristique de séchage », qui relie à chaque instant la vitesse de séchage à la teneur en eau du produit et aux conditions de fonctionnement d'une installation donnée. Deux méthodes de séchage ont été testées : le séchage convectif et le séchage par contact. Les expériences de **séchage convectif sous air chaud** ont été réalisées dans une boucle de séchage, qui permet de contrôler les caractéristiques de l'air (température, hygrométrie et débit). Les modes de séchage (en lit traversé ou par léchage) ont été choisis en fonction de la structure initiale du digestat et de la présence d'inerte. Parmi les cinq digestats étudiés, quatre ont été séchés dans la cellule à flux traversant. Seul un de ces digestats (TERR solide), très pâteux, a été préalablement mis en forme par extrusion. Le digestat d'OMR, trop liquide, a été séché dans la cellule de léchage. L'influence de la température de l'air de séchage sur la teneur en carbone total, en azote et en micro-organismes pathogènes des digestats séchés a ensuite été analysée. Le digestat pâteux, dont la structure initiale ressemblait fortement à celle des boues résiduaires urbaines (TERR solide), a également été séché dans une maquette batch de **séchage par contact** avec agitation et dans un sécheur à palettes continu.

¹¹ MO, Matière organique

Les caractéristiques de séchage obtenues diffèrent en fonction de la nature des digestats. La structure a évidemment une influence sur le comportement au séchage, et notamment sur la vitesse maximale de séchage. A conditions identiques, AGRI1 solide et AGRI2 solide ont des vitesses maximales de séchage identiques et cette vitesse est le double de celle des digestats TERR solide et BIOD solide. Au cours du séchage à une température de 70°C, plus de 75% de **l'azote ammoniacal**, qui représente entre 32 et 55% de l'azote total selon les digestats solides humides, est volatilisé. A 90°C et au-delà, 100% de l'azote ammoniacal a disparu du produit. On observe également une diminution de la concentration en carbone total, de l'ordre de 13% à 70°C. Enfin, nous avons montré que le séchage sous air chaud ne permet pas d'inactiver les spores de *Clostridium perfringens*. Le séchage par contact avec agitation, avec des temps de séjour plus long et des températures de produit plus élevées, permet au contraire une hygiénisation du digestat mais le produit final est très pulvérulent, ce qui a entraîné un colmatage des filtres du circuit de traitement de l'air et pourrait poser des problèmes au stockage, lors de la manutention ou enfin à l'épandage. Comme pour le séchage sous air chaud, tout l'azote ammoniacal a été volatilisé. Les différentes technologies de séchage doivent donc être équipées d'un système de collecte et de traitement des buées pour éviter les émissions dans l'atmosphère et assurer la sécurité des travailleurs sur site.

2. Le comportement en compostage des digestats (L4.1.2.x) et l'impact de ce post-traitement sur la qualité de leur matière organique ont été étudiés en procédés pilotes (300 L). Ces essais ont de plus comparé le comportement en compostage des digestats (solides ou bruts) à celui des déchets organiques non digérés dont ils étaient issus : Fumier de bovin et AGRI1 solide ; Biodéchets et BIOD solide ; OMR et OMR brut. Des essais ont également été réalisés pour optimiser les conditions de compostage des digestats brut d'OMR dans le but de réduire les émissions gazeuses.

Les résultats des essais de compostage ont montré une moindre **biodégradabilité** effective des digestats par rapport aux déchets ou résidus organiques non digérés. Le taux de matière organique abattue est compris entre 40 et 70% de la MO initiale pour les déchets non-digérés et se situe entre 5 et 45% pour les digestats. Cet abattement de matière organique contribue cependant relativement peu à la perte de masse totale en compostage qui est due à 60 à 75% de perte d'eau. Le compostage s'avère donc une technique de séchage intéressante pour les digestats. Compte tenu de la moindre biodégradabilité effective, la **production de chaleur** au cours du compostage des digestats est inférieure à celle du compostage de déchets non digérés, ce qui se traduit par une atteinte, en pilote, de températures plus basses. Ainsi, on perçoit que des digestats très stabilisés au cours de la méthanisation ne trouveront un traitement hygiénisant dans le compostage que via l'adjonction d'un co-substrat plus biodégradable. Le compostage des digestats permet d'obtenir des produits avec des teneurs en **matière sèche** comprises entre 30 et 55% de la masse brute, selon le substrat considéré, pour des teneurs moyennes en matière organique de l'ordre de 20 à 25% de la matière brute. Les **ratios C/N** mesurés sont compris entre 10 et 35, là encore en fonction du substrat considéré. Ces valeurs permettent donc au digestat d'atteindre les spécifications des normes amendements organiques.

Les potentiels **impacts environnementaux** liés au compostage des digestats ont été évalués en quantifiant les émissions d'ammoniac et de gaz à effet de serre (CH₄ et N₂O) au cours du traitement. Les **émissions de méthane** mesurées se sont toujours révélées inférieures aux facteurs d'émission retenus par l'IPCC et utilisés dans les évaluations environnementales. Les **émissions d'ammoniac** relevées sont dans la gamme des émissions décrites dans la

littérature qui sont cependant très variables, allant de 0,01 g N/kg MS à plus de 1 g N/kg MS¹², car très dépendantes des conditions de milieu (pH, température, etc.). Les quantités émises n'ont pas démontré être statistiquement liées à la quantité initiale d'azote ammoniacal dans le substrat.

Enfin, **les émissions de N₂O** mesurées lors de ces essais de compostage n'ont pas excédé la gamme des valeurs relevées dans la littérature (0,004 g N/kg MS à 4 g N/kg MS¹³). Elles ont néanmoins été plus importantes pour le compostage des digestats que pour celui des déchets non digérés. Ceci est probablement dû à une plus grande disponibilité de l'azote ammoniacal, alors même que des températures de process plus faibles et une moindre consommation d'oxygène pour la dégradation de la matière organique permettent la nitrification aérobie. Ainsi, il apparaît à travers ces résultats que l'un des enjeux environnementaux du traitement par compostage des digestats est de maîtriser les émissions azotées. Cependant, ces émissions sont très dépendantes de la qualité du substrat traité par compostage qui elle-même dépend de l'origine du substrat et, pour les digestats, de la performance de la digestion anaérobie et d'éventuelles étapes de préparation du substrat comme la séparation solide/liquide.

Ce sujet a été abordé dans le cas du **compostage de digestat brut d'OMR** pour lequel nous avons examiné l'influence, sur la performance du compostage, de paramètres opérationnels tels que le ratio de mélange (structurant/digestat), la granulométrie du structurant, le taux d'aération, l'humidité, le recyclage du structurant ou le recyclage de compost mature. Les indicateurs de stabilisation de la MO, d'émissions azotées et de désinfection (élévation de la température) ont été étudiés. Les résultats suggèrent d'augmenter le ratio de mélange pour réduire les émissions azotées et accroître le potentiel de désinfection. Jusqu'à un ratio structurant/digestat de 4, jugé optimal, un effet positif a été observé sur l'ensemble des critères de qualité étudiés. Au-delà, un ratio supérieur entraîne une diminution des élévations en température, limitant la désinfection du compost produit. De manière similaire, le taux d'aération semble avoir un optimum à une valeur moyenne (15 L·h⁻¹·par kg MO). Une aération trop faible ralentit le processus de dégradation et donc la stabilisation et l'hygiénisation du compost. A l'inverse, une aération trop forte augmente les émissions gazeuses et limite l'échauffement en compostage. La réutilisation directe d'un structurant usagé accroît les émissions de N₂O respectivement de 3 et 1,5 fois comparé à un structurant neuf et à un structurant usagé et stocké 2 mois avant le recyclage. Ceci indique que les structurants usagés doivent être stockés pendant plusieurs mois afin d'être séchés avant leur recyclage. Comme attendu, le recyclage de compost mature réduit les émissions de NH₃, mais il augmente aussi les émissions de N₂O. Finalement, la granulométrie du structurant a peu d'incidence sur les critères investigués.

3. Le traitement biologique des digestats liquides (L4.2.2.x)

Les procédés de post-traitement des digestats liquides ont pour objectifs la réduction des impacts environnementaux et/ou la concentration des nutriments. Dans cette tâche, l'objectif était d'évaluer la **faisabilité technique et économique d'une étape de nitrification** des digestats liquides pour transformer leur azote ammoniacal en nitrates (NO₃) afin de limiter la volatilisation de l'ammoniac au stockage et éventuellement faciliter une étape de filtration membranaire par la suite.

¹² Mallard, P., et al., 2005.

¹³ Mallard, P., et al., 2005.

Dans un premier temps, la **faisabilité théorique** du traitement des digestats liquides (AGRI1, AGRI2, TERR et BIOD) a été déterminée sur la base des caractéristiques des digestats (DCO¹⁴ biodégradable, ammonium (NH₄⁺), NTK¹⁵, Alcalinité). Seul le digestat AGRI1 présentait des valeurs en MS et DCO trop élevées pour envisager un traitement. Les autres digestats présentaient des besoins en O₂ de l'ordre de 15 à 25 kgO₂/m³ principalement liés à la nitrification (77%) et une alcalinité sensiblement inférieure aux besoins pour un traitement biologique de nitrification (64 à 85%).

Dans un second temps, des **essais en réacteur de laboratoire** ont été réalisés sur les digestats liquides TERR et AGRI2 afin de valider les données théoriques. Pour AGRI2, 90% de l'azote ammoniacal du digestat a pu être transformé et récupéré sous forme de nitrate. Ceci avec des besoins modérés en oxygène et régulation de pH. En revanche, les résultats obtenus avec le digestat TERR ont montré une difficulté à réaliser la nitrification jusqu'au stade nitrate (azote obtenu principalement sous la forme de nitrite). L'oxydation incomplète de l'azote ammoniacal de ce digestat est probablement la conséquence d'une montée en charge trop rapide du réacteur.

Enfin, la **stabilité des formes de l'azote** des digestats traités a été évaluée. Après une séparation de phase complémentaire, ces digestats peuvent être stockés pendant plusieurs jours (>10 J) sans qu'aucune transformation significative des formes azotées ne soit observée. La stabilité de l'azote du produit obtenu n'est donc pas un frein à l'intégration de ce procédé dans une filière plus globale. Elle permet ainsi d'envisager des intérêts environnementaux en termes de consommation de réactifs dans une filière d'évapoconcentration et/ou de pertes d'azote vers l'atmosphère dans le cas de l'épandage. Des études complémentaires devront être conduites à la suite de DIVA pour valider l'intérêt agronomique des produits obtenus et estimer le potentiel lessivage des nitrates suite à l'épandage.

Enfin, les produits obtenus ont été transmis au partenaire travaillant sur la filtration membranaire (Univ. Montpellier 2) pour des études complémentaires sur l'intérêt de cette étape de nitrification vis-à-vis de la filtration membranaire. Les résultats obtenus n'ont pas montré d'impact significatif du traitement biologique sur la filtration membranaire.

4. La réduction des volumes de digestat liquide par filtration membranaire : Energie et sélectivité (L4.2.1.x)

Deux opérations conduites en série ont été choisies, la première est une opération de **clarification sur membranes d'ultra-filtration** (UF) (1, 8, 50 et 300 kDa), la seconde est une opération d'extraction – concentration des fractions minérales solubles par **nano-filtration** (NF) (200 Da) et/ou **osmose inverse basse pression** OIBP (rétention 50% NaCl) et **haute pression** OIHP (rétention 95% NaCl). Pour chacune de ces opérations, l'étude a porté sur l'évaluation des capacités de rétention des fractions organiques et des fractions minérales solubles ainsi que sur l'évolution des perméabilités membranaires en cours d'opération. Les essais ont été conduits sur des unités pilotes de laboratoire en filtration frontal et/ou tangentiel. L'origine des digestats (AGRI1, AGRI2, TERR, BIOD), le rôle d'un conditionnement chimique, le seuil de coupure des membranes, les conditions de pression et de température et le facteur de concentration volumique (FCV)¹⁶ ont été testés.

¹⁴ DCO, la Demande Chimique en Oxygène est une méthode de mesure de la teneur en éléments oxydables d'un produit (matière organique et minérale)

¹⁵ NTK, mesure de l'azote Kjeldahl (correspond aux formes réduites de l'azote = Azote total – NO₂⁻ + NO₃⁻)

¹⁶ FCV : facteur de concentration volumique, correspond à la réduction de volume obtenue par le traitement

Les résultats obtenus montrent que la mise en œuvre d'une séparation sur membranes nécessite des traitements intermédiaires poussés après digestion. **La séparation de phase** comme elle est effectuée aujourd'hui sur site n'est pas satisfaisante en termes de composés particuliers encore présents dans la phase liquide (présence de composés grossiers). Comme la viscosité des digestats augmente avec leur concentration, elle est ainsi apparue comme un paramètre dominant la faisabilité et le choix du mode opératoire pour l'opération de clarification.

L'étude de l'étape de clarification par ultrafiltration a montré une rétention totale de la fraction particulaire (qui peut donc engendrer une désinfection significative du perméat¹⁷) et une rétention importante de la fraction organique (80 et 95%). Comme attendu, la rétention des fractions minérales solubles est restée négligeable. Le colmatage membranaire est apparu principalement lié à un phénomène externe d'accumulation de composés au voisinage de la surface membranaire (dépôt et couche de polarisation) et la perméabilité membranaire est apparue comme une fonction inverse de la concentration en DCO dans le rétentat¹⁸. Cette perméabilité est donc directement dépendante des caractéristiques initiales du digestat, notamment sa teneur en DCO, et du facteur de concentration volumique FCV (réduction de volumes) à atteindre. Enfin, le coût énergétique pour le fonctionnement de l'opération apparaît très lié à la circulation tangentielle du rétentat au voisinage de la membrane, le rapport Q_R/Q_P ¹⁹ est ainsi le critère essentiel du bilan énergétique.

L'étude des opérations de NF et OI a été réalisée sur les digestats clarifiés par ultrafiltration 300 kDa. Il a été montré que ces opérations (NF, OIBP, OIHP) permettaient d'éliminer la fraction organique résiduelle (rétention supérieure à 93%) avec une élimination quasi totale de la couleur. La rétention de la matière organique est du même ordre de grandeur pour les trois membranes, entre 93 et 98%. Cette rétention dépasse 99,7% pour les acides humiques et les polysaccharides, elle est proche de 98% pour le COT²⁰ mais elle apparaît significativement plus faible pour les protéines, aux environs de 85%. Pour l'élimination des composés ioniques minéraux, les performances de la membrane d'osmose inverse haute pression (OIHP) sont significatives (avec plus de 95% d'abattement de la conductivité électrique) avec une rétention en ions peu dépendante de la nature de l'ion considéré et donc de l'origine du digestat. A l'inverse, pour les membranes de nanofiltration et d'osmose inverse basse pression (OIBP), une bonne rétention des ions bi et trivalents est observée (70%). Cette rétention est moyenne sur les sels monovalents (30-40%) et faible pour les chlorures (10-20%). Quelle que soit la membrane testée, sa perméabilité est apparue dépendante de la conductivité des solutions à traiter. Le FCV imposé a ainsi un rôle direct sur la perméabilité de la membrane considérée, son augmentation provoque une augmentation de la pression osmotique de la solution à traiter et l'accumulation de composés ioniques au voisinage de la membrane est plus intense avec une possibilité de précipitation des sels. La valeur de la conductivité de la solution à traiter, dépendante de l'origine du digestat et du FCV imposé, va donc imposer la valeur de perméabilité de la membrane et donc le dimensionnement de l'unité. Des estimations de besoins en énergie de ces opérations montrent des valeurs dépendant directement des pressions transmembranaires exercées mais ces valeurs peuvent

¹⁷ Perméat, phase liquide qui passe à travers les membranes

¹⁸ Rétentat, phase retenue par les membranes

¹⁹ Q_R/Q_P , Rapport entre le débit mis en circulation pour générer de la turbulence (Erosion du dépôt) et le débit d'eau produite

²⁰ COT, carbone organique total

être plus ou moins significativement augmentées par les conditions de recyclage nécessaires à un mode tangentiel de séparation.

Quelles que soient les opérations membranaires ciblées, la composition initiale du digestat et son comportement rhéologique sont des éléments importants à prendre en compte pour envisager la mise en œuvre sereine de ces opérations.

C.4.3 RETOUR AU SOL DES DIGESTATS, VALEUR AGRONOMIQUE ET EMISSIONS A L'ÉPANDAGE (TACHE 5, L5.1-4)

Les mesures de valeur fertilisante azotée à court terme, d'émission potentielle de GES (N_2O et CO_2) et de volatilisation de NH_3 lors du retour au sol des digestats ont été réalisées en conditions contrôlées de laboratoire qui permettent de comparer les différents digestats et de limiter l'influence des conditions pédoclimatiques.

La valeur fertilisante azotée à court terme est très largement expliquée par la teneur en azote ammoniacal dans les digestats (Figure 2). Pour les digestats issus d'une méthanisation par voie liquide, la séparation de phase s'accompagne d'un passage de l'azote ammoniacal dans la phase liquide. On a donc en général une disponibilité d'azote supérieure dans les digestats liquides et bruts par rapport à la fraction solide. Le séchage diminue la valeur fertilisante en raison d'une perte importante de l'ammoniac au séchage. De même le compostage diminue aussi la valeur fertilisante par stabilisation au sein de la matière organique ou par volatilisation de la fraction ammoniacale en début de compostage.

La volatilisation de l'ammoniac après épandage des digestats peut diminuer très fortement leur valeur fertilisante à court terme et donc leur valeur fertilisante totale. Des mesures maximisantes en conditions contrôlées montrent que 30 à 84% du N ammoniacal peut être volatilisé rapidement après apport. Aucun lien n'apparaît entre ces proportions variables et le type ou l'état du digestat étudié (liquide, brut, solide). Toutefois les flux de volatilisation sont plus faibles pour les composts en raison de leur plus faible teneur en ammonium, une partie de l'azote des digestats ayant été stabilisée ou volatilisée pendant le compostage.

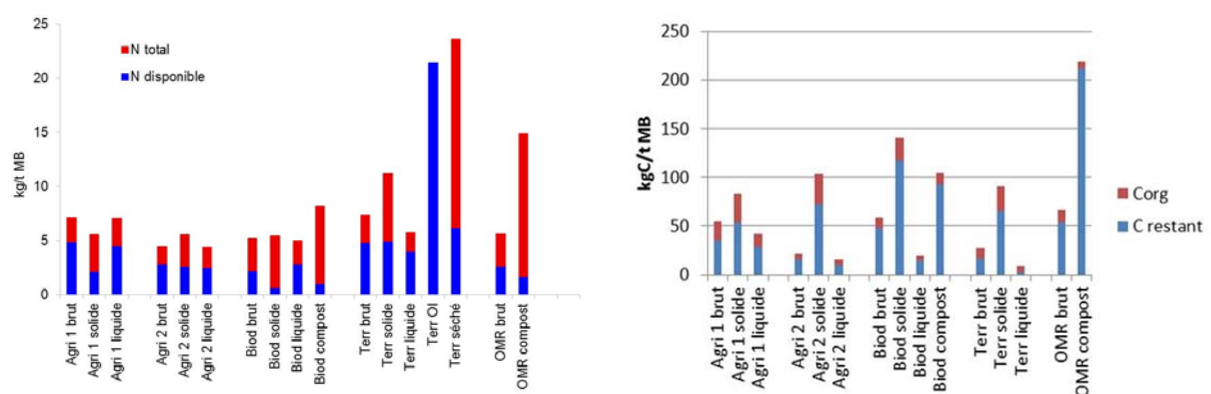


Figure 2. Estimation de la valeur fertilisante potentielle à court terme (à gauche) et de la valeur amendante organique potentielle (à droite). Les résultats sont exprimés respectivement en kg N ou kg de C par tonne de matière brute. TerrOI, rétentat d'osmose inverse.

Les émissions de N_2O et de CO_2 après épandage ont été mesurées en conditions optimales d'émission sur cylindre de sol auquel on a apporté des digestats (Tableau 2). Les mesures ont

été réalisées en semi-continu par spectrométrie Infra Rouge dédiés à la mesure de N₂O (Mini-QCL Aerodyne Research) ou de CO₂ (Licor 820).

Tableau 2. Apports équivalents de carbone et d'azote par kg de sol sec et flux cumulés diminués du témoin sol en N-N₂O et C-CO₂ obtenus après 90 jours d'incubation exprimés également par kg de sol sec. Voir texte ci-dessous pour les légendes.

| | C (mgC/kg sol) | Ntotal (mgN/kg sol) | Norg (mgN/kg sol) | NH ₄ (mgN/kg sol) | C/Norg | Flux N ₂ O (µgN/kg sol) | Flux CO ₂ (mgC/kg sol) |
|---------|-------------------|------------------------|----------------------|---------------------------------|--------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| AGRI1-B | 3326 | 434 | 170 | 264 | 20 | 8572 | 1433 |
| AGRI1-S | 3947 | 265 | 170 | 95 | 23 | 1238 | 2058 |
| AGRI1-L | 996 | 166 | 71 | 96 | 14 | 309 | 370 |
| AGRI2-B | 934 | 190 | 57 | 133 | 16 | 1740 | 330 |
| AGRI2-S | 5971 | 322 | 170 | 152 | 35 | 372 | 3470 |
| AGRI2-L | 685 | 191 | 54 | 137 | 13 | 445 | 126 |
| TERR-B | 641 | 173 | 50 | 123 | 13 | 1220 | 280 |
| TERR-S | 2451 | 302 | 170 | 132 | 14 | 1369 | 1127 |
| TERR-L | 276 | 176 | 25 | 150 | 11 | 471 | 117 |
| TERR-OI | 70 | 165 | 0 | 165 | 205 | 743 | 102 |
| TERR-D | 2028 | 121 | 121 | 0 | 17 | 2547 | 483 |
| BIOD-S | 3492 | 189 | 145 | 44 | 24 | 2617 | 965 |
| BIOD-CS | 2692 | 212 | 170 | 41 | 16 | 1884 | 363 |

Le suivi des dégagements de N₂O et CO₂ montre de fortes différences entre les digestats en fonction de leur filière d'origine et des post-traitements réalisés (Tableau 2). Les flux de N₂O émis par les mélanges sol-digestats sont cependant tous supérieurs à ceux de la solution azotée de référence UAN. Dans le programme DIVA, les émissions de N₂O après apport de digestats n'ont pas été comparées à celles mesurées après apport direct des effluents non digérés. Cependant, dans la bibliographie, les résultats divergent sur cette question et peuvent montrer une diminution, une augmentation ou aucun effet sur les émissions de N₂O (Cayuela et al., 2010²¹ ; Petersen et Sorensen, 2011²²).

La séparation de phase, en dissociant le NH₃ dans la phase liquide et le C dans la phase solide, conduit à une diminution des flux de N₂O, la diminution est plus marquée pour les liquides.

Le post traitement « osmose inverse » (TERR-OI) sur le TERR-Liquide ne modifie pas les flux de N₂O, par contre le digestat TERR-Solide séché (TERR-D) montre une augmentation forte des dégagements de N₂O.

Le compost du digestat BIOD-Solide (BIO-CS) présente à l'inverse des flux de N₂O (et CO₂) réduits lors du retour au sol.

Les facteurs d'émission (rapport entre flux de N-N₂O et quantité de N_{total} apportée) varient entre 0,12% pour AGRI2-S et 2,1% pour TERR-D. Pour l'UAN, il est de 0,16%. On observe une forte corrélation entre les cinétiques d'émission de N₂O et la minéralisation de l'azote et du carbone : principalement entre la stabilité des formes organiques présentes et leur

²¹ Cayuela et al., 2010

²² Petersen et Sorensen, 2011

équilibre entre le carbone et l'azote (rapport C/Norg). Pour les conditions expérimentales du laboratoire, il semblerait que les émissions de N₂O proviennent principalement du processus hétérotrophe de dénitrification et que celui-ci soit limité par le facteur qui vient à manquer en premier, carbone ou NO₃. Le manque de carbone expliquerait pourquoi la production de N₂O stoppe au bout d'une dizaine de jours pour le traitement UAN ou pour les digestats liquides. Bien que peu concentrés en carbone, la forte proportion en carbone soluble des digestats liquides explique leur tendance à générer des flux de N₂O plus importants en tout début de cinétique par rapport à l'UAN. L'apport d'un produit riche en MO permet au contraire « d'alimenter de façon plus continue » le sol à la fois en carbone et azote minéral. De façon générale, on observera des émissions continues et durables pour des produits un peu moins dégradables avec de faibles C/Norg comme c'est le cas plutôt pour les digestats bruts, le digestat territorial solide séché (TERR-D) et le digestat solide de Biodéchets (BIOD-S).

La biodégradabilité du C résiduel après digestion a également été étudiée en conditions contrôlées de laboratoire en faisant l'hypothèse que la fraction organique restante en fin de digestion pourrait jouer un rôle d'amendement organique et contribuer ainsi à alimenter les fractions organiques du sol. Les résultats ont servi à évaluer la quantité de C organique des digestats restant potentiellement dans le sol 1 an après apport d'une tonne de matière brute épandue (Figure 2). Ces quantités dépendent des teneurs en C organique des digestats (plus faibles dans les digestats à faible teneur en matière sèche). La séparation de phase permet d'isoler la fraction solide plus riche en C amendant apportant 50 à 100 kg de C par tonne de MB. Le compostage augmente la stabilité du C organique. Cependant la dégradation complémentaire de la matière organique au cours du compostage fait que le flux de C amendant est plus faible après compostage du digestat de Biodéchets. Cela n'est pas observé pour le digestat d'ordures ménagères. **L'indicateur ISMO** a été normalisé (XPU 44-162) pour caractériser la valeur amendante des amendements organique. Cet indicateur représente la proportion de la MO des amendements susceptible de contribuer à l'alimentation de la MO des sols. Son calcul pour les digestats donne des valeurs cohérentes avec les mesures expérimentales de C résiduel et varie entre 30 et 85% du C organique total des digestats.

La dynamique du C et du N dans les sols après apport des digestats a été simulée à l'aide du modèle CANTIS (Garnier et al., 2003). Un jeu de paramètres a permis de simuler correctement les dynamiques de minéralisation de tous les digestats à l'exception d'un paramètre de contact qui ralentit la décomposition pour les digestats dont la teneur en matière sèche est supérieure à 15%. Les résultats de modélisation montrent que l'absence de minéralisation nette apparente du N organique est en fait le bilan de flux de minéralisation et d'organisation brute qui peuvent être très importants quand la biodégradabilité du C organique et le rapport C/N organique des digestats sont élevés. Par ailleurs, le modèle a confirmé la dualité de la nature biochimique de la fraction la plus facilement extractible au cours de la digestion. Cette fraction soluble est en fait composée à la fois de matière organique facilement biodégradable et de matière stabilisée (donc lentement biodégradable).

Deux essais au champ ont été réalisés pour évaluer la valeur fertilisante azotée à court terme des digestats. Ces essais ont été menés en Ile de France (maïs/blé) et en Languedoc (Blé dur). En Ile de France, on met en évidence des pertes apparentes importantes du N minéral après apport, sans doute par volatilisation. Des coefficients équivalent engrais (Keq) de 40 à 50% sont mesurés pour AGR12 Brut, AGR12 Solide et BIOD Solide. Ce Keq est inférieur à 10% pour le digestat composté (BIOD composté). L'essai en Languedoc a comparé les digestats

compostés (BIOD et OMR) à un compost d'OMR et à une fertilisation minérale. Les rendements tendent à être plus faibles en cas d'apport de compost par rapport à la fertilisation minérale sans différence significative entre les traitements, confirmant que la disponibilité de l'azote dans les composts est faible. On ne constate pas de dégradation de la qualité des récoltes par rapport à leur concentration en éléments traces.

C.4.4 EVALUATION ENVIRONNEMENTALE ET ECONOMIQUE DES FILIERES DE POST-TRAITEMENT (TACHE 6, L6.1-2)

Quatre filières de post-traitement ont été évaluées pour les digestats agricoles, territoriaux et de biodéchets :

- épandage du digestat brut,
- séparation de phases et épandage des phases solide et liquide,
- séchage et épandage de la phase sèche associé à la filtration membranaire de la phase liquide et épandage des produits de la filtration membranaire,
- compostage de la phase solide.

Les évaluations ont été réalisées en priorité à partir des données techniques et économiques recueillies sur les sites en fonctionnement et sur les pilotes mis en œuvres par les partenaires du programme. En l'absence de données ponctuelles pour l'évaluation environnementale (par exemple la toxicité), les valeurs ont été obtenues dans la littérature ou les bases de données.

Analyse environnementale

La méthodologie d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) a été déployée pour évaluer les performances environnementales de ces filières de post-traitement des digestats. Les filières ont été comparées pour un même digestat, pour une même performance de post-traitement. L'identification du service rendu par le post-traitement s'est avérée être une étape délicate, qui n'a pas trouvé de consensus satisfaisant. Cette performance a été définie comme la valorisation agronomique des digestats basée sur l'azote disponible et le carbone résiduel apportés au sol, à partir d'une quantité annuelle de digestat brut produit par chaque installation étudiée. Pour satisfaire l'unité fonctionnelle, la règle d'extension des frontières par addition a été utilisée, c'est-à-dire que, lorsque c'était nécessaire pour la comparaison, la valeur fertilisante a été complétée par addition de fertilisant minéral et la valeur amendante par l'addition de tourbe. La modélisation a été effectuée via le logiciel commercial ACV GaBi6 et les impacts évalués grâce à la méthode CML-IA (version avril 2013) et la méthode CML (2002) pour la catégorie d'impact « déplétion des ressources ».

Ainsi il a été mis en évidence qu'une filière de post-traitement simple (séparation de phases seulement) présente des impacts environnementaux semblables à une filière se limitant à l'épandage du digestat brut (filière de référence). En revanche, une filière comprenant un post-traitement poussé (compostage, séchage et filtration membranaire) a tendance à être plus impactante pour les catégories déplétion des ressources, smog, écotoxicité et toxicité. Cependant, elle apparaît compétitive avec la filière de référence concernant les catégories changement climatique, acidification et eutrophisation. Ces différences non significatives d'impacts entre la filière de référence et la filière de post-traitement poussé sont dues au lissage des émissions sur l'ensemble des étapes du post-traitement et de l'épandage.

Analyse économique

La question posée est celle de l'intérêt économique d'un post-traitement (séparation de phase, séchage, compostage, filtration membranaire) par rapport à l'épandage d'un digestat brut, sans post-traitement. **L'épandage du digestat brut en l'état** est la solution la moins onéreuse dans toutes les situations en absence de contrainte particulière : de l'ordre de 9 €/t quel que soit le type et la taille de l'unité de méthanisation, incluant les coûts du stockage, de la réalisation du plan d'épandage, et de l'épandage proprement dit en comptant une distance moyenne de 4 km du lieu de stockage. **Le post-traitement du digestat brut peut se justifier** dès lors qu'il devient nécessaire d'exporter les nutriments contenus dans celui-ci, dans un contexte d'excédent en azote ou en phosphore qui imposerait l'exportation du digestat, ou de contraintes techniques sur l'épandage (pentes, habitations, cours d'eau, etc.) qui augmenteraient les besoins en surface d'épandage. Ces différentes contraintes ont été traduites par une augmentation des distances de transport permettant de disposer des surfaces d'épandage adéquates.

Deux approches sont alors possibles : La première consiste à **calculer la distance** à partir de laquelle la solution « transport et épandage du digestat brut », devient plus onéreuse que la solution « post-traitement et épandage des digestats traités ». En cas d'excédent sur l'élément phosphore, c'est la fraction solide ou le digestat sec qu'il est nécessaire d'exporter. La distance minimale de transport qui justifie une séparation de phase est de 10 à 30 km. Celle qui justifie le séchage thermique de la fraction solide varie de 150 km (AGRI1, AGRI2 et BIOD) à 350 km (TERR solide). L'apport d'énergie provenant exclusivement du biogaz, seule une partie du digestat solide est séchée (environ 80%, sauf pour BIOD 60%), et la fraction non séchée restante est exportée en l'état. Dans nos résultats pour le séchage, les recettes liées à la valorisation de la chaleur pour le séchage des digestats sont prises en compte. En cas d'excédent sur l'élément azote, les solutions membranaires (ultrafiltration + osmose inverse) envisagées pour TERR sont justifiées pour des distances supérieures à 80 km.

La seconde approche consiste à entrer dans une **logique de valorisation** des digestats sur un marché des fertilisants d'origine organique. La valeur marchande de ces digestats est basée sur :

- la valeur fertilisante des principaux nutriments (NPK) aux prix du marché²³, en ne tenant compte que de la disponibilité immédiate (hors arrière effet)
- la valeur amendante basée sur la teneur en matière organique résiduelle stable (indice ISMO)²⁴

| €/tonne | Brut | Liquide | Solide | Sec | Compost | Rétentat UF | Concentré OI |
|--------------|------|---------|--------|-----|---------|----------------|-----------------|
| AGRI1 | 16 | 15 | 17 | 52 | 16 | | |
| AGRI2 | 6 | 5 | 12 | 39 | | | |
| TERR | 8 | 5 | 19 | 65 | | 6 | 24 |
| BIOD | 8 | 5 | 13 | 20 | 15 | | |

Sur ces bases, la valeur marchande des digestats varie de 8 à 16 €/t pour les digestats bruts, de 5 à 15 €/t pour la phase liquide, de 12 à 19 €/t pour la phase solide, de 20 à 65 €/t pour le

²³ Prix des nutriments retenu : 800 €/t Ntot, 560 €/t P₂O₅, 612 €/t K₂O

²⁴ Prix C-résiduel : 60 €/t Carbone résiduel

digestat sec, de 15 à 16 €/t pour le compost, et est égale à 6 €/t pour le rétentat d'ultra-filtration et à 23 €/t pour le concentrat d'osmose inverse.

Les coûts de post-traitement des digestats évalués dans le programme sont de l'ordre de la dizaine d'euros par tonne de digestat brut pour la séparation de phase, s'y ajoutent entre 40 à 270 €/t de digestat sec pour le séchage (soit 12 à 50 €/t digestat solide), de 20 à 80 €/t de compost pour le compostage (soit 20 à 40 €/t de digestat solide) selon les procédés mis en œuvre et de 52 €/t de produits concentrés issus de la filtration membranaire (soit 18 €/t de digestat liquide). Les écarts entre les solutions de base et les post-traitements plus poussés sont essentiellement liés aux charges d'exploitation plus qu'à l'investissement.

On constate donc que **la valeur marchande des produits ne couvre pas toujours les coûts de post-traitement** pour la séparation de phase et le séchage, et généralement pas pour le compostage. En effet, pour compostage, les coûts liés au traitement de l'air sont élevés en termes d'investissement et d'exploitation. De plus, le compostage ne concentre pas autant les nutriments que les autres procédés. Toutefois, d'autres paramètres que techniques et économiques peuvent entrer dans la décision de post-traiter les digestats. Dans nos travaux, les coûts environnementaux (diminution des externalités négatives : émissions de gaz à effet de serre, eutrophisation) et certains coûts liés au contexte des projets (par exemple : l'intérêt de la gestion d'une phase liquide et d'une phase solide séparée pour la logistique, pour l'épandage - pendillard sur phase liquide uniquement -, pour le procédé de méthanisation - recirculation de la phase liquide etc) n'ont pas été pris en compte.

C.5 EXPLOITATION DES RESULTATS

Les résultats expérimentaux de DIVA ont été exploités à trois niveaux :

Faire avancer les connaissances : Les données ont été présentées annuellement tout au long du projet à un comité de suivi composé de représentants des administrations, agences, chambres d'agriculture, associations, instituts techniques, chercheurs... Ces données ont aussi été beaucoup présentées dans des conférences scientifiques internationales (22 présentations + 2 soumises pour 2015) et des conférences plus techniques en France (19 présentations) comme les Journées de la Recherche Industrie et les Rencontres Nationales Biogaz. Enfin, une visite de l'essai au champ a été organisée en Languedoc Roussillon.

Faire avancer la réglementation et les politiques publiques : Les données de composition des digestats ont été diffusées en cours de projet auprès des ministères, de l'ADEME, du BN Ferti et des membres du projet Valdipro dans l'objectif de faire avancer les connaissances en vue de l'homologation des digestats. Les personnes impliquées dans DIVA ont participé au comité de pilotage de Valdipro et à l'expertise collective MAFOR sur la valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usages agricole ou forestier. Les problèmes méthodologiques de dénombrement des entérocoques et la méthode proposée par Irstea (Slanetz puis BEA) ont été présentés aux représentants des instances d'homologation (ANSES et BN Ferti). L'ensemble de ces actions a contribué de prêt ou de loin à faire évoluer la vision actuelle des parties prenantes dans la réglementation et la gestion des digestats.

Faire avancer la recherche : Les données concernant le compostage et le retour au sol ont été directement utilisées dans le projet ETYC (Evaluation intégrée des phases de Traitement et de recYclage agricole des matières organiques pour des systèmes d'élevage moteurs dans

l'atténuation du changement Climatique ; AAP REACTIF ADEME 2012-2015). D'autre part, des projets ont été construits par des partenaires de DIVA dans le prolongement de celui-ci : Projet Valodim (VALEur Optimale des Digestats Issus de la Méthanisation), Projets de recherche et développement structurants des pôles de compétitivité (PSPC de BPI France). Janvier 2013.

Projet MAMBO (Maîtrise des émissions d'Ammoniac en usine de Méthanisation-compostage de déchets, Biodéchets et effluents Organiques). Projet déposé à l'appel PNR EST 2015 Santé Environnement, Santé Travail. En cours d'évaluation.

Enfin, un des points négatifs du projet DIVA est le faible nombre de publications scientifiques internationales réalisées au cours du projet. Seulement 4 publications dans des revues à comité de lecture, dont 3 mono-partenaires. Au final, au moins 6 autres publications peuvent être espérées sur le post-traitement des digestats et le retour au sol. Ce faible nombre de publications s'explique en partie par les aspects très appliqués du projet et son aspect plus « démonstrateur/évaluateur » que recherche qui ont conduit à une valorisation essentiellement sous la forme de conférences, mais aussi par le fait que beaucoup de résultats sont arrivés en fin de projet et restent donc à exploiter.

C.6 DISCUSSION

Discussion sur le degré de réalisation des objectifs initiaux, les verrous restant à franchir, les ruptures, les élargissements possibles, les perspectives ouvertes par le projet, l'impact scientifique, industriel ou sociétal des résultats.

Le projet DIVA a bénéficié d'une très bonne dynamique de groupe et de nombreuses collaborations et échanges entre l'ensemble des partenaires. L'organisation et la mise en œuvre des prélèvements, puis leur répartition entre les tâches et les partenaires, ont été particulièrement bien gérées ce qui a contribué au succès du projet. La majorité des travaux académiques envisagés dans DIVA ont ainsi pu être réalisés. En revanche, les deux aspects du projet qui envisageaient un retour sur site réel des travaux de DIVA n'ont pas pu être mis en œuvre. Il s'agit de :

- l'évaluation du séchage des digestats sur le site de Géotexia (livrables 4.1.1.2 à 4.1.1.4). L'usine étant en démarrage, le sécheur n'a été opérationnel qu'en fin de projet et dans des conditions qui ne permettaient pas un audit du procédé. Certains aspects du retour au sol du digestat séché n'ont pas pu être étudiés par manque de quantités de digestats solides produits uniquement par les pilotes de Armines.

- la mise en œuvre des paramètres optimisés de compostage des digestats d'OMR sur le site d'Ametyst (livrable 4.1.2.4). L'usine a subi un incendie en début de projet qui a conduit à un arrêt de la filière pendant plusieurs mois et à un régime non stabilisé.

Dans les deux cas, les financements prévus sur cette partie du projet ont été reportés sur une étude plus large du séchage des digestats en pilotes pour Armines et l'évaluation technico économique pour Géotexia ; et sur la réalisation des essais aux champs en Languedoc Roussillon pour Suez Environnement.

Pour le reste du projet, les résultats produits dans DIVA ont complété ceux d'études bibliographiques telles que l'expertise collective MAFOR²⁵ pour faire le point sur la qualité des digestats des filières étudiées. Les données obtenues ont ainsi participé à la réflexion sur le statut à donner aux digestats et sur leur homologation/ normalisation. Les objectifs à

²⁵ <http://institut.inra.fr/Missions/Eclairer-les-decisions/Expertises/Toutes-les-actualites/Expertise-Mafor-effluents-boues-et-dechets-organiques>

atteindre sur cet aspect du projet ont été réalisés au mieux possible pour un projet de R&D. Les digestats ne satisfaisant à aucune des normes existantes, il est nécessaire de poursuivre les demandes d'homologation pour faire avancer la législation et les connaissances des digestats. Dans ce sens, des travaux et une réflexion de fond doivent être entrepris pour les indicateurs entérocoques et *Clostridium perfringens* pour lesquels les méthodes normalisées actuelles fonctionnent mal et posent problème.

La caractérisation physico-chimique des digestats a de plus mis en lumière certains déterminants de cette qualité qui restent à mieux élucider. En particulier, les travaux entrepris jusqu'alors n'ont que peu porté sur l'influence des conditions de méthanisation (temps de séjour, charge, etc.) sur cette qualité. D'autre part, parmi les déterminants de la qualité des digestats solide et liquide, il est apparu que la structure physique du digestat (composition et organisation de la matière sèche) et l'efficacité de la séparation de phase pouvaient avoir une forte influence. Bien qu'étant peu étudiées, les propriétés physiques des digestats constituent un large champ d'investigation. Nous nous sommes focalisés sur 3 aspects, le comportement rhéologique, l'épandabilité et la déshydratation. Les résultats des analyses rhéologiques orientent plutôt la suite des travaux vers les questions d'homogénéisation et de transport en conduites des digestats, ainsi que vers une approche étroitement couplée avec les performances de la digestion. Les dires d'expert concernant l'épandabilité devront être validés par des essais machine. Enfin, les tests de déshydratation ont souligné à la fois la faisabilité des procédés industriels de séparation de phase par filtration (tels que les filtres- presses ou filtres à bandes qui sont plus sobres en consommation énergétique que les centrifugeuses) et la nécessité d'utilisation de polymère de conditionnement. S'ils ouvrent de nombreuses perspectives de recherche, ces résultats sont directement liés à la question de la gestion et du devenir des digestats.

Ces observations restent à approfondir et constituent de nouvelles pistes de recherche pour pouvoir, à terme, optimiser conjointement la digestion anaérobie et la qualité du digestat en fonction des déchets méthanisés et des post-traitements appliqués.

En effet, concernant les post-traitements, les essais réalisés en pilotes de laboratoire ont donné des premiers résultats de faisabilité et d'évaluation économique et environnementale. Les verrous qui restent à travailler sont multiples. Les retours d'informations collectés sur de nombreux sites visités pendant et hors projet DIVA montrent que la mise en œuvre de chacun des procédés de post-traitement des digestats requiert une optimisation pour obtenir les produits escomptés. La plupart des procédés installés sur site présentent des problèmes de mise en régime nominal et parfois de fonctionnement. Leurs coûts de maintenance sont souvent sous-estimés ce qui pourrait poser des problèmes à terme si les opérateurs n'ont pas les moyens de faire face aux dépenses de renouvellement. D'autre part, il est absolument nécessaire de travailler sur la récupération des émissions d'ammoniac au séchage et au compostage pour au minimum réduire les émissions vers l'atmosphère et assurer la sécurité des travailleurs en usines de méthanisation-compostage et, si possible, récupérer l'azote pour le valoriser. Sur ce point particulier, il est intéressant de souligner l'intérêt de la séparation de phase qui à moindre coût permet d'exporter les phases solides des territoires en limites d'épandage et surtout (résultat apporté dans DIVA) permet une réduction globale des émissions de GES lors de l'épandage des phases séparées.

Sur le plan agronomique, la valeur fertilisante à court terme des digestats est directement liée à leur teneur en N ammoniacal. Il est donc crucial de maîtriser les pertes par volatilisation au

moment de l'épandage. On montre également qu'en fonction de l'efficacité de la digestion anaérobie et donc de la quantité de matière organique biodégradable non valorisée en biogaz au cours de la digestion, les digestats auront un intérêt en tant qu'amendement organique ou non. Cette valeur amendante est bien sûr augmentée par le post-traitement par compostage. Les essais au champ mis en place dans le cadre de ce programme donnent des valeurs de coefficients équivalent engrais entre 40 et 50% pour des digestats non compostés et de 10% pour un digestat composté. Il serait intéressant de mettre en place des suivis de plus longue durée pour évaluer les effets à long terme d'apports répétés de digestats, en particulier sur les dynamiques des éléments majeurs et sur l'innocuité des digestats.

Enfin, concernant l'analyse environnementale, l'utilisation de l'analyse du cycle de vie pour le post-traitement de digestats pourrait être affinée avec une meilleure identification de l'intérêt du post-traitement. Cette méthode demande encore beaucoup de développement pour l'évaluation localisée d'un impact, ce qui est absolument nécessaire dans le cas du retour au sol des déchets. Pour répondre aux besoins du projet et des outils d'évaluation utilisés, il a fallu orchestrer plusieurs paramètres ensemble : mettre en exergue la fonction du post-traitement, évaluer les filières d'un point de vue général, utiliser des données terrain, étudier la valorisation agronomique dans l'absolu alors que cette notion est corrélée à des conditions particulières (type de cultures, saisonnalité, réglementation). Si les ACV n'ont pas permis de trancher de manière catégorique pour une filière de post-traitement plutôt qu'une autre, elles ont contribué à identifier plusieurs recommandations sur leurs conditions de déploiement. Les définitions de la valeur fertilisante et de la valeur amendante ont été ici seulement approchées et mériteraient une réflexion plus poussée pour une définition plus fine de la valeur agronomique. Pour approcher au plus juste l'intérêt environnemental du post-traitement de digestats, il conviendrait de réaliser des ACV représentatives des conditions particulières de leur épandage (type de cultures, saisonnalité, réglementation).

C.7 CONCLUSIONS

Les résultats acquis lors de ce projet ont fait progresser les connaissances de la composition des digestats, de leurs filières de post-traitement et de leur valorisation agronomique. Ces connaissances ont été utilisées pour préciser les potentiels et les limites de chacune des filières et au moins en partie faire évoluer la réglementation. Les séminaires organisés pendant le projet ont permis de diffuser les connaissances acquises auprès des acteurs sociaux et industriels concernés et de créer une dynamique nationale autour de ce thème.

C.8 REFERENCES

- ADEME (2006). "Gestion des déchets organiques en France - Le point sur les filières de gestion biologique avec retour au sol."
- ADEME (2007). "Les déchets en chiffres."
- AFNOR, (2006). NF U44-051 Amendements organiques - Dénominations, spécifications et marquage.
- ASTEE (2006). Vade-Mecum du porteur de projet de méthanisation des déchets des collectivités. TSM, 4: 16-75.
- Banks, C. J., A. M. Salter, et al. (2007). "Potential of anaerobic digestion for mitigation of greenhouse gas emissions and production of renewable energy from agriculture: barriers and incentives to widespread adoption in Europe." *Water Science and Technology* 55(10): 165-173.
- Cayuela M.L., Oenema O., Kuikman P.J., Bakker R.R., Van Groenigen J.W., 2010. Bioenergy by-products as soil amendments. Implications for carbon sequestration and greenhouse gas emissions. *Global change biology* 2, 201-213.
- De Baere, L. and B. Mattheeuws (2008). "State-of-the-art 2008 - Anaerobic digestion of solid waste." *Waste management world*.
- EEA, E. E. A. (2008). "Better management of municipal waste will reduce greenhouse gas emissions." Support document to EEA Briefing 2008/01.
- Favoino, E. (2008). "Strategies for the management of biowaste in the EU - optimising the C-cycle." Communication at the ECN/Orbit Workshop 2008 The future for Anaerobic Digestion of Organic Waste in Europe.
- Flotats Xavier, August Bonmatí, Belén Fernández, Albert Magrí (2009) Manure treatment technologies: On-farm versus centralized strategies. NE Spain as case study *Bioresource Technology*, In Press, Corrected Proof, Available online 23 February.
- Garnier P., Neel C., Aita C., Recous S., Lafolie F., Mary B., 2003. Modelling carbon and nitrogen dynamics in a bare soil with and without straw incorporation. *European journal of soil science* 54, 555-568.
- Kupper, T. and J. Fuchs (2007). "Compost et digestat en Suisse."
- Mallard, P., et al., Impacts environnementaux de la gestion biologique des déchets. Bilan des connaissances, 2005, ADEME / Cemagref - INRA - Ecobilan - ENSIACET - CRReD - Anjou Recherche - Orval. p. 692.
- Mata-Alvarez, J., S. Mace, et al. (2000). "Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives." *Bioresource Technology* 74(1): 3-16.
- Moletta, R. and F. Cansell (2003). "Méthanisation des déchets organiques. Etude bibliographique, n°01-0408/1A." RECORD.
- Petersen S.O., Sorensen S.G. (2011) Ammonia and nitrous oxide interactions: Roles of manure organic matter management. *Animal Feed Science and Technology* 166– 167 (2011) 503– 513.
- Salminen E., J. Rintala, J. Härkönen, M. Kuitunen, H. Högmander, A. Oikari (2001) Anaerobically digested poultry slaughterhouse wastes as fertiliser in agriculture *Bioresource Technology*, Volume 78, Issue 1, May 2001, Pages 81-88.
- Schmidt Ena, Katharina Meissl (2007) The applicability of Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy in waste management *Waste Management*, Volume 27, Issue 2, 2007, Pages 268-276.
- SOLAGRO (2004). "La qualité agronomique des digestats - Synthèse."

D LISTE DES LIVRABLES

Quand le projet en comporte, reproduire ici le tableau des livrables fourni au début du projet. Mentionner l'ensemble des livrables, y compris les éventuels livrables abandonnés, et ceux non prévus dans la liste initiale.

| Date de livraison | N° | Titre | Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...)* | Partenaires (souligner le responsable) | Commentaires |
|-------------------|-----------|---|--|--|---|
| | 1. | 1. GESTION ET COORDINATION DU PROJET | | | |
| 16 Déc. 2010 | J1 | réunion de lancement | Jalon/CR de réunion | Tous Irstea/Cemagref | - |
| 22 Mars 2011 | CS1 | 1 ^{ère} Réunion du comité de suivi | Jalon/CR de réunion | Tous Irstea/Cemagref | - |
| Mai 2011 | L1.1 | Rapport intermédiaire | Rapport à 6 mois | Tous Irstea/Cemagref | - |
| 22 Mai 2012 | CS2 | 2 ^{ème} Réunion du comité de suivi | Jalon/CR de réunion | Tous Irstea/Cemagref | - |
| Sept. 2012 | L1.2 | Rapport intermédiaire | Rapport à 18 mois | Tous Irstea/Cemagref | - |
| 16 avril 2013 | CS3 | 3 ^{ème} Réunion du comité de suivi | Jalon/CR de réunion | Tous Irstea/Cemagref | - |
| Sept. 2013 | L1.3 | Rapport intermédiaire | Rapport à 30 mois | Tous Irstea/Cemagref | - |
| 2014 | CS4 | 4 ^{ème} Réunion du comité de suivi | Jalon/CR de réunion | Tous Irstea/Cemagref | - |
| Juillet 2015 | L1.4 | Rapport final | Rapport mois 48 | Tous Irstea/Cemagref | - |
| | 2. | 2. ETAT DE L'ART DES DIGESTATS ET DE LEURS PROCEDES DE POST-TRAITEMENT | | | |
| 23 Mars 2011 | J2 | Première analyse des résultats et choix des digestats pour tâches 3 et 4 | Jalon/CR de réunion | Tous Solagro | - |
| 23 Janv. 2012 | J3 | Réunion bilan état de l'art | Jalon/CR de réunion | Tous Solagro | - |
| Juin 2014 | L2.1 | Synthèse sur la composition des digestats en fonction des substrats méthanisés et des procédés de digestion anaérobie | Rapport | Solagro Irstea Rennes | Synthèse reprise en cours de projet pour y apporter des informations complémentaires suite à l'EsCo MAFOR |
| Juin 2014 | L2.2 | Synthèse sur les procédés de post-traitement des digestats et confirmation des verrous technologiques à lever | Rapport | Solagro Irstea Rennes | |
| Juin 2011 | L2.3 | Identification des objectifs à atteindre et liste des analyses nécessaires pour caractériser les digestats en vue de leur valorisation agronomique (composition, qualité, normes à venir) | Rapport | Solagro | - |
| | 3. | 3. CARACTERISATION SYSTEMATIQUE DES DIGESTATS BRUTS | | | |
| 23 Mars 2011 | J4 | Mise en place de la campagne de prélèvements | Jalon/CR de réunion | Tous Irstea/Cemagref | - |
| Nov. 2013 | L3.1 | Actualisation de la synthèse sur la caractérisation physico-chimique des digestats et de leur valeur agronomique en fonction des substrats méthanisés et évaluation | Rapport | Irstea/Cemagref | Les données ont été incluses dans le L2.1 |

| Date de livraison | N° | Titre | Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...)* | Partenaires (souligner le responsable) | Commentaires |
|-------------------|----------|--|--|--|--|
| | | de la variabilité de la qualité des digestats | | | |
| Sept. 2013 | L3.2 | Synthèse sur la caractérisation physique et rhéologique des digestats intégrant les relations entre leurs propriétés mécaniques, leur composition et leurs propriétés d'usage | Rapport | <u>Irstea/Cemagref</u> | Cette partie du travail a conduit à deux livrables : L3.2a, sur la caractérisation physico-chimique et biologique des digestats L3.2b sur la caractérisation rhéologique des digestats |
| Juin 2014 | L3.3 | Document récapitulatif des résultats de biodégradabilité résiduelle des digestats étudiés au regard de leur origine et identification des points critiques à surveiller ou travailler dans la filière, que ce soit en amont (substrats du méthaniseur) ou en aval (optimisation des procédés de transformation ou de manutention des digestats) des filières | Rapport | <u>Irstea/Cemagref</u> | Le livrable L3.3 a été fusionné avec le livrable L3.2a |
| | 4. | 4. EVALUATION TECHNIQUE ET DEVELOPPEMENT DES PROCEDES DE POST-TRAITEMENT DES DIGESTATS | | | |
| | 4.1. | 4.1. Post-traitement des digestats solides | | | |
| | 4.1.1. | 4.1.1. Evaluation technique et environnementale du séchage des digestats | | | |
| Nov. 2013 | L4.1.1.1 | Synthèse des caractéristiques de comportement des digestats en séchage (bilan matière et énergie, caractéristiques physiques et comportement adhésif, temps de séjour en vue de la stabilisation du déchet, temps de séjour et température requise en vue de l'hygiénisation du déchet, potentiels d'émissions en CO ₂ , CH ₄ , NH ₃ , N ₂ O, H ₂ S...) | Rapport | <u>Armines/Rapsod ee</u> | Ce livrable a été fusionné avec le livrable L4.1.1.5 |
| | L4.1.1.2 | Evaluation des impacts environnementaux d'un procédé de séchage industriel de digestats | Rapport | <u>Armines/Rapsod ee</u> | Abandonné par manque d'installation (voir discussion) |
| Août 2015 | L4.1.1.3 | Intégration énergétique d'une installation industrielle de séchage des digestats | Rapport | <u>Armines/Rapsod ee / Solagro</u> | Par manque d'installation, étude sur la base d'un système simplifié |
| Nov. 2013 | L4.1.1.4 | Identification des paramètres permettant une réduction des émissions de NH ₃ et H ₂ S lors du séchage | Rapport | <u>Armines/Rapsod ee</u> | Les données de ce livrable sont incluses dans le livrable L4.1.1.1 |
| Nov. 2013 | L4.1.1.5 | Synthèse des données de caractérisation des digestats secs | Rapport | <u>Armines/Rapsod ee</u> | Ce livrable a été fusionné avec le livrable L4.1.1.1 |
| | 4.1.2. | 4.1.2. Evaluation technique et environnementale du | | | |

| Date de livraison | N° | Titre | Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...)* | Partenaires (souligner le responsable) | Commentaires |
|-------------------|--------------|---|--|--|--|
| | | compostage des digestats | | | |
| Nov. 2013 | L4.1.2.1 | Synthèse des caractéristiques de comportement des digestats en compostage (caractéristiques physiques et aériorité, bilan matière, contenu en matière biodégradable, durée d'aérioriose requise en vue de la stabilisation du déchet, capacité d'auto-échauffement, potentiel à s'auto-hygiéniser en compostage, potentiels d'émissions en CO ₂ , CH ₄ , NH ₃ , N ₂ O, H ₂ S, RSH) | Rapport | <u>Irstea/Cemagref</u> | - |
| Dec. 2013 | L4.1.2.2 | Identification des paramètres de compostage permettant une réduction des émissions de NH ₃ et N ₂ O lors du compostage des digestats via une optimisation de la nitrification/dénitrification biologique | Rapport | <u>Irstea/Cemagref</u> | - |
| Dec. 2013 | L4.1.2.3 | Evaluation des moyens de contrôle du compostage et de la qualité des composts de digestats via l'aération (investigation des modes de pilotage du compostage sur la seule base de l'asservissement de l'aération et des retournements à l'évolution de la température matière et/ou des concentrations en oxygène des gaz sortants) | Rapport | <u>Irstea/Cemagref</u> | - Voir aussi article Yang Zeng et al. |
| | L4.1.2.4 | Evaluation des impacts environnementaux d'un procédé de compostage industriel de digestats | Rapport | <u>Irstea/Cemagref</u> | Abandonné suite à incidents techniques sur l'usine (voir discussion) |
| Dec. 2013 | L4.1.2.5 | Synthèse des données de caractérisation des composts issus des digestats | Rapport | <u>Irstea/Cemagref</u> | Données incluses dans le livrable L2.1 |
| | 4.2. | 4.2. Post-traitement des digestats liquides | | | |
| | 4.2.1 | 4.2.1 Evaluation technique et environnementale des procédés de filtration membranaire | | | |
| Juil. 2013 | L4.2.1.1 | Caractérisation de la suspension biologique et de son évolution chimique (notamment au regard des teneurs en ions polyvalents mais aussi des ions ammonium) pendant l'étape de séparation sur membrane nano poreuse | Rapport | <u>Polytech Montpellier</u> | Voir aussi thèse de doctorat de Séverine Carretier |
| Aout 2015 | L4.2.1.2 | Bilan des tâches des séparations par nanofiltration : maîtrise de la perméabilité (hydrodynamique et configuration du module membranaire) et de la | Rapport | <u>Polytech Montpellier</u> | Voir aussi thèse de doctorat de Séverine Carretier |

| Date de livraison | N° | Titre | Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...)* | Partenaires (souligner le responsable) | Commentaires |
|-------------------|--------------|---|--|--|--|
| | | sélectivité des membranes de nanofiltration en cours d'opération | | | |
| Aout 2015 | L4.2.1.3 | Analyse des caractéristiques et de l'intérêt agronomique des sels de phosphate récupérés | Rapport | <u>Polytech Montpellier</u> | Voir aussi thèse de doctorat de Séverine Carretier |
| Aout 2015 | L4.2.1.4 | Suivi des caractéristiques de la suspension concentrée et des précipités obtenus au regard de leur utilité agronomique | Rapport | <u>Polytech Montpellier</u> | Abandonné suite à des problèmes techniques et du manque de temps en fin de projet. Remplacé par le livrable : Approche industrielle des procédés membranaires |
| Aout 2015 | L4.2.1.5 | Bilan des tâches des séparations par distillation membranaire : rôle des caractéristiques de la suspension (matière en suspension, matière organique, matière volatile...) ; maîtrise du transfert et de la fonctionnalité de la membrane (caractère hydrophobe) en cours d'opération (notamment liés à la présence possible de biofilm en surface membranaire) | Rapport | <u>Polytech Montpellier</u> | Abandonné suite à des problèmes de rhéologie et de concentration Cette opération est très loin d'être rentable économiquement |
| | 4.2.2 | 4.2.2 Evaluation technique et environnementale des procédés de traitement biologique | | | |
| Sept. 2013 | L4.2.2.1 | Actualisation de la caractérisation des fractions liquides de digestats concernant les paramètres nécessaires au processus de nitrification | Rapport | <u>Irstea/Cemagref</u> | Ces livrables ont été fusionnés en un seul, le L4.2.2.1-3 Données obtenues dans le stage Ingénieur de Camille Renaud |
| Sept. 2013 | L4.2.2.2 | Bilan des travaux de modélisation numérique sur la nitrification biologique des digestats liquides | Rapport | <u>Irstea/Cemagref</u> | |
| Sept. 2013 | L4.2.2.3 | Synthèse des conditions de gestion des procédés de traitement biologique des digestats liquides | Rapport | <u>Irstea/Cemagref</u> | |
| | 4.3. | 4.3. Caractérisation des digestats transformés | | | |
| | L4.3.1 | Actualisation de la synthèse sur la caractérisation physico-chimique des digestats et de leur valeur agronomique en fonction des substrats méthanisés et évaluation de la variabilité de la qualité des digestats | Rapport | <u>Irstea/Cemagref</u> | Les informations concernant cet aspect ont été intégrées au fur et à mesure des résultats dans les livrables correspondant aux post-traitements appliqués et dans le livrable L2.1 |
| | 5. | 5. EVALUATION DE LA VALEUR AGRONOMIQUE ET QUANTIFICATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES DIGESTATS BRUTS ET TRANSFORMES EPANDUS EN AGRICULTURE | | | |
| Aout 2015 | L5.1 | un référentiel sur la valeur | Rapport | INRA | Voir aussi thèse de |

| Date de livraison | N° | Titre | Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...)* | Partenaires (souligner le responsable) | Commentaires |
|-------------------|-----------|---|--|--|--|
| | | agronomique et les facteurs d'émission (N2O et NH3) à l'épandage des produits organiques digérés avec ou sans post-traitement | | | doctorat de Amira Askri |
| Aout 2015 | L5.2. | une évaluation des risques de phytotoxicité liés aux épandages de digestats et de l'efficacité des post-traitements à réduire cette phytotoxicité éventuelle | Rapport | <u>INRA</u> | Voir aussi thèse de doctorat de Amira Askri |
| Aout 2015 | L5.3 | Un modèle permettant de simuler le devenir de l'azote dans un agrosystème après apport de digestats | Rapport | <u>INRA</u> | Voir aussi thèse de doctorat de Amira Askri |
| Aout 2015 | L5.4. | Un bilan environnemental de l'épandage sur sol cultivé de digestats post-traités ou non basé sur la simulation des cycles biogéochimiques du C et N au champ | Rapport | <u>INRA</u> | Voir aussi thèse de doctorat de Amira Askri |
| | 6. | 6. BILAN TECHNIQUE-ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTAL DES FILIERES DE POST-TRAITEMENT DES DIGESTATS | | | |
| Avr. 2015 | L6.1 | Synthèse des données du projet dans une évaluation énergétique, technico-économique et environnementale des filières de gestion des digestats | Rapport | <u>Solagro/Irstea/Cemagref</u> | Ces livrables ont été fusionnés en un seul, le L6.1 et 6.2 |
| Avr. 2015 | L6.2 | Guide de recommandations aux acteurs professionnels et publics pour le choix des filières de méthanisation les plus durables par rapport à leur type de déchet et pour la définition de la réglementation de l'utilisation des digestats en valorisation agricole | Rapport | <u>Solagro/Irstea/Cemagref</u> | |

E IMPACT DU PROJET

E.1 INDICATEURS D'IMPACT

Nombre de publications et de communications (à détailler en E.2)

| | | Publications multipartenaires | Publications monopartenaies |
|----------------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| International | Revue à comité de lecture | 1 soumis | 3 |
| | Ouvrages ou chapitres d'ouvrage | 0 | 0 |
| | Communications (conférence) | 9 + 1 soumis | 14 |
| France | Revue à comité de lecture | 0 | 0 |
| | Ouvrages ou chapitres d'ouvrage | 0 | 0 |
| | Communications (conférence) | 0 | 2 |
| Actions de diffusion | Articles vulgarisation | 0 | 0 |
| | Conférences vulgarisation | 5 | 11 |
| | Autres | 2 | 5 |

Autres valorisations scientifiques (à détailler en E.3)

Ce tableau dénombre et liste les brevets nationaux et internationaux, licences, et autres éléments de propriété intellectuelle consécutifs au projet, du savoir faire, des retombées diverses en précisant les partenariats éventuels. Voir en particulier celles annoncées dans l'annexe technique).

| | Nombre, années et commentaires (valorisations avérées ou probables) |
|---|---|
| Brevets internationaux obtenus | 0 |
| Brevet internationaux en cours d'obtention | 0 |
| Brevets nationaux obtenus | 0 |
| Brevet nationaux en cours d'obtention | 0 |
| Licences d'exploitation (obtention / cession) | 0 |
| Créations d'entreprises ou essaimage | 0 |
| Nouveaux projets collaboratifs | 2 |
| Colloques scientifiques | 2 journées à thème |
| Autres (préciser) | 2 |

E.2 LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

1. Liste des publications internationales multipartenaires

a. Revues à comité de lecture

Askri A., Laville P., Tremier A., Houot S. 2015 Origin and post-treatment influence nitrous oxide emissions after anaerobic digestate application on soil. *Soumis à Waste and Biomass Valorization*.

b. Ouvrages ou chapitres d'ouvrage

c. Communications (conférence)

Tremier A., Buffet J., Daumoin M., Saint Cast P., Picard S., Le Roux S., Berger S. and P. Dabert (2015) Temporal stability in agricultural and urban full-scale anaerobic digesters. *14th World congress on anaerobic digestion* November 15-18, Vina del Mar, Chile – soumis pour Communication orale

Tremier A., Houot S., Guiziou F., Laville P., Askri A., Tran N.D, Arlabosse P. (2014) Fate of N-nutrients and organic matter along digestate post-processing: impact on agronomic value and environmental assessment. *5th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation*, August 24-28, Rio de Janeiro, Brazil - Communication orale

Tran N.D, Dabert P., Arlabosse P. (2014) Influence of drying conditions on the survival of pathogens in dried digestates. *5th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation*, August 24-28, Rio de Janeiro, Brazil – Poster

Askri A., Laville P., Guiziou F., Beline F., Houot S. (2014) Digestates origin and post-treatment influence their biological stability, potential nitrogen availability for plants and reactive nitrogen gas emissions *Conference ORBIT 2014 Gödöllő*, Hungary, 26-28, June, 2014 (oral, abstract)

Tremier A., Houot S., Guiziou F., Laville P., Askri A. Tran N.D., Arlabosse P. (2014). Fate of nitrogen along digestate post-processing: impact on agronomic value and environmental assessment. *5th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation* - Aug. 24-28, 2014 - Rio de Janeiro, Brazil-Poster

Askri A., Laville P., Houot S., Tremier A., Dabert P. (2014) Valorization of biogas digestates in agriculture, effects on N₂O soil emissions: laboratory characterizations. Workshop on "Experimental databases and model of N₂O emissions by croplands: do we have what is needed to explore mitigation options?" *Workshop GRA*, 17-19 Mars 2014 Paris

Tremier A., Buffet J., Berger S., Dabert P. (2013) Characterization of digestates: agronomic value and residual biodegradability. *13th World congress on anaerobic digestion: Recovering (Bio) resources for the world*. June 25-28, Santiago de Compostela, Spain - Communication orale

Mbaye S., Dieudé-Fauvel E., Trémier A., Dabert P., Girault R. (2013) Dewatering properties of digestates: variability and process efficiency. *13th World congress on anaerobic digestion: Recovering (Bio) resources for the world*. June 25-28, Santiago de Compostela, Spain – Poster

Dabert P., Berger S., Couturier C., Beline F., Tremier A. (2013) State of the art of digestates production in France and of their agronomic value. *13th World congress on anaerobic digestion: Recovering (Bio) resources for the world*. June 25-28, Santiago de Compostela, Spain – Poster

Tremier A., Buffet J., Daumoin M., Saint Cast P., Picard S., Berger S. (2013) Characterization of digestates: do they fit with soil improvers or fertilisers standards? 15th RAMIRAN International Conference. Recycling of organic residues for agriculture: from waste management to ecosystem services 03/06/2013-05/06/2013, Versailles, France - Poster

2. Liste des publications françaises multipartenaires

a. Revues à comité de lecture

b. Ouvrages ou chapitres d'ouvrage

c. Communications (conférence)

3. Actions de diffusion multipartenaires

a. Articles de vulgarisation

b. Conférences de vulgarisation

Askri A., Laville P., Guiziou F., Trémier A., Houot S. (2015) Valorisation des digestats de méthanisation : effet sur les cycles du carbone et de l'azote dans le sol et conséquences environnementales. *Journées recherche et industrie. Biogaz Méthanisation*. 3-5 Février 2015 Rennes. Communication orale

Houot S., Askri A., Laville P., Trémier A., Guiziou F. (2014) Qualité agronomique des digestats : impact de leur retour au sol. Bilan du programme DIVA : 2010-2014. Rencontre Nationale sur le biogaz. 19-21 Novembre, Toulouse - Communication orale

Dabert P. (2014) Composition des digestats de méthanisation. Bilan du programme DIVA : 2010-2014. Rencontre Nationale sur le biogaz. 19-21 Novembre, Toulouse - Communication orale

Trémier A., Houot S. (2013) Origine et post-traitement des digestats : impacts sur la dynamique de l'azote au cours du post-traitement et valeur fertilisante azotée et amendante des produits finaux. *Journées Recherche et Industrie, Biogaz - Méthanisation*, Narbonne, 16-18 octobre. Communication orale

Dabert P. (2012) DIVA – Caractérisation des digestats et de leurs filières de valorisation agronomique. *Colloque ANR Bioénergies*. 9 et 10 octobre. Paris - Communication orale

c. Autres

Sylvaine Berger et Patrick Dabert (2012-2015) Participation au comité de pilotage du projet VALDIPRO (AILE et TRAME) afin de coordonner les travaux réalisés dans Valdipro et DIVA. Valdipro a pour objectif de faciliter l'homologation d'un ensemble de produits issus des digestats de plusieurs unités de méthanisation agricoles. Paris

Anne Victor et P. Dabert (2013) Participation au groupe de travail Digestats du Club biogaz. 28 mai 2013, Paris.

4. Liste des publications internationales monopartenaires

a. Revues à comité de lecture

Girault R., Bridoux G., Nauleau F., Mégnien J.C., Béline, F., Dieudé-Fauvel E. Effect of digested sludge properties on mechanical dewatering efficiency: an experimental approach. *Accepted to Drying Technology*.

Carretier S., Lesage G., Grasmick A., Heran M. (2015). Water and nutrients recovering from livestock manure by membrane processes. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 93(2), pp 225-233.

Mbaye S., Dieudé-Fauvel E., Girault R., Baudez J.C. (2014) Comparative Analysis Of Anaerobically Digested Wastes Flow Properties. *Waste Management*, 34, pp. 2057-2062

b. Ouvrages ou chapitres d'ouvrage

c. Communications (conférence)

Déchaux C., Tremier A., Aissani L. (2015) Environmental assessment of the agronomical recovery of digestate post-treatment, *16th RAMIRAN International Conference*. 08-10 September 2015, Hamburg, Germany - Poster

Zeng Y., De Guardia A., Tremier A., Dabert P. (2014) Optimizing composting parameters as a post-treatment of digestate of organic fraction of municipal solid waste. *ORBIT14: 9th International Conference*, June 26-28, Gödöllo, Hungary - Communication orale

Tremier A., Buffet J., Daumoin M., Picard S., Saint-Cast P. (2014). Digestates main characteristics and residual biodegradability: influence of waste origin and management of the digestion plant. *ORBIT14: 9th International Conference*, June 26-28, Gödöllo, Hungary - Communication orale

Girault R., Bridoux G., Nauleau F., Mégnien J.C., Béline, F., Dieudé-Fauvel E. (2014) Effect of digested sludge properties on mechanical dewatering efficiency: an experimental approach. *4th European Conference on Sludge Management-ECSM 2014*, Izmir, Turkey, 26-27 May 2014 - Communication orale

Tran N.D., Blanc M., Arlabosse P. (2013) Influence of drying conditions on manure ammonium-N losses. *Eurodrying'2013*, 2-4 Octobre Paris - Poster

Martel JL., Allain M. (2013) Contribution to the agronomic characterization of the new METHACOMPOST produced in 2012 on amethyst plant. *15th RAMIRAN International Conference. Recycling of organic residues for agriculture: from waste management to ecosystem services*. 3-5 juin, Versailles – Communication orale

Tremier A., Buffet J., Daumoin M., Corrand V. (2013) Composting as digestate post-treatment: composting behaviour and gaseous emissions of three types of digestate compared to non-digested waste. *15th RAMIRAN International Conference. Recycling of organic residues for agriculture: from waste management to ecosystem services*. 3-5 juin, Versailles – Communication orale

Askri A., Laville P., Houot S. (2013) Organic carbon and nitrogen evolution in soil after application of digestates: influence of digestate origin and post-treatment. *15th RAMIRAN International Conference. Recycling of organic residues for agriculture: from waste management to ecosystem services*. 3-5 juin, Versailles - Poster

Carretier S., Lesage G., Grasmick A., Heran M. (2013), Nutrient recovery from biogas plant digestate. Can membrane be useful? *Winery 2013. 6th IWA International Specialized Conference on Sustainable Viticulture, Viticulture and winery wastes : environmental impact and management*. 26-30 May 2013, Narbonne-communication orale

Carretier S., Lesage G., Grasmick A., Heran M., (2013), Water and nutrients recovering from livestock manure by membrane processes. *7th IWA Specialised Membrane Technology Conference and Exhibition for Water and Wastewater Treatment and Reuse*. 25-29 August 2013 Toronto, Canada-communication orale

Carretier S., Lesage G., Grasmick A., Heran M. (2013). Water and molecules of interest recovering from anaerobic digestate by membrane-based technology. *Symposium: "Membranes for liquid separation and water treatment: Environmental applications and future perspectives"*, Torino, Italie, 10-11 Octobre 2013.

d. Communications sur invitation

Héran Marc (2013) Nutrients recovery, reuse with integrated membrane operations. *French-Israeli Scientific Colloquium on "Water Production and Wastewater Treatment"*, Sede Boqer, Israel - communication orale

Héran Marc (2013) An old idea...but also a strong perspective for tomorrow: the anaerobic membrane reactors *Membrane Bioreactors for Water & Wastewater Treatment: Where are we? Quo vamus?* Montpellier - communication orale

Héran Marc (2012) Quality management of digestate from biogas plants. Can membrane be useful? *Sino-French Scientific Week: Water : source of material and energy*, Shanghai - communication orale

5. Liste des publications françaises monoparttenaires

a. Revues à comité de lecture

b. Ouvrages ou chapitres d'ouvrage

c. Communications (conférence)

Déchaux C., Aissani L. (2015) Évaluation environnementale du post-traitement des digestats dans un objectif de valorisation agricole, *Journées Recherche et Industries Biogaz Méthanisation (JRI)*, Rennes, France, 03-05 Février 2015 - Communication orale

Carretier S., Lesage G., Grasmick A., Héran M., (2013). Influence du facteur de concentration en ultrafiltration. *XIVème Congrès de la Société Française de Génie des Procédés (SFGP)*, Lyon, France, 8-10 Octobre 2013

6. Actions de diffusion monoparttenaires

a. Articles de vulgarisation

b. Conférences de vulgarisation

Arlabosse P. (2015) Evaluation technique et environnementale du séchage des digestats. *Journées Recherche et Industrie, Biogaz - Méthanisation*, 3- 5 Février Rennes - Communication orale

Déchaux C., Aissani L. (2015) Évaluation environnementale du posttraitement des digestats dans un objectif de valorisation agricole *Journées recherche et industrie. Biogaz Méthanisation*. 3-5 Février Rennes - Communication orale

Mbaye S., Dieudé-Fauvel E., Baudez J.C. (2015) Analyse du comportement rhéologique des digestats *Journées recherche et industrie. Biogaz Méthanisation*. 3-5 Février Rennes - Communication orale

Trémier A. (2013) DIVA - Caractérisation des Digestats et de leurs filières de Valorisation Agricole. Réunion des directions Régionales de l'Ademe 10 octobre. Visio conf.

Girault R., Doucet C., Dieudé-Fauvel E., Baudez J.C. (2013) Séparation solide/liquide des digestats : Premier retour d'expérience, variabilité des performances et voies d'optimisation. *Journées Recherche et Industrie, Biogaz - Méthanisation*, Narbonne, 16-18 octobre. Communication orale.

Dabert P., Trémier A., Téglia C., Béline F. (2013) Les digestats de méthanisation : quelles sont les connaissances actuelles ? *Colloque AMORCE "Transition énergétique : quelle place pour les déchets?"*, 28-29 mai Rouen

Dabert P. (2013) Programme DIVA : point d'étape sur la caractérisation des digestats des différentes filières de méthanisation et de leur adéquation aux normes actuelles. *Les journées techniques nationales du Biogaz du Forum ExpoBiogaz*, 19-20 février Lyon

Héran M. (2013) Nutrients recovery, reuse with integrated membrane operations. The 1st French-Israeli Scientific Colloquium on "Water Production and Wastewater Treatment, Sede Boqer, Israel.

Sylvaine Berger-Ruiz (2012) Présentation du programme DIVA - *Journée technique – Methaqtion – « Gestion et valorisation du digestat - Lycée agricole de Périgueux – 27 novembre 2012*

Dabert P. (2012) Table ronde sur la méthanisation. *Colloque Biogaz Energie du SPACE2012*, 12 septembre Rennes

Dabert P. (2012) Programme DIVA : présentation du projet. *Journée d'échanges sur le digestat dans le cadre du projet européen "Bio-Methane Regions" AILE*, 5 juin Rennes

c. Autres

Dabert P. (2014) Présentation au BN Ferti des résultats méthodologiques de dénombrement des entérocoques dans les digestats, septembre 2014, Paris.

Béline F. (2014) Présentation à la Fédération nationale des collectivités concédantes et régies (FNCCR) Déchets et substrats organiques pour la méthanisation, Impacts sur le procédé et la valorisation des digestats. Mars 2014, Paris

Martel J.L. (2013) Présentation au groupe de travail Digestats du BN Ferti de l'avancement de DIVA sur la caractérisation des digestats. 15 Octobre 2013, Paris.

Martel J.L. (2013) Organisation d'une visite de l'essai plein champ DIVA "Languedoc Roussillon" le jeudi 13 juin 2013 à Fabrègues.

Askri A., Laville P., Houot S. (2013) Stability of digestate organic matter and evolution of nitrogen in soil after application: Influence of digestate origin and post treatment. Ecole doctorale ABIES, Poster.

E.3 LISTE DES ELEMENTS DE VALORISATION

La liste des éléments de valorisation inventorie les retombées (autres que les publications) décomptées dans le deuxième tableau de la section. On détaillera notamment :

- brevets nationaux et internationaux, licences, et autres éléments de propriété intellectuelle consécutifs au projet.
- logiciels et tout autre prototype
- actions de normalisation
- lancement de produit ou service, nouveau projet, contrat,...
- le développement d'un nouveau partenariat,
- la création d'une plate-forme à la disposition d'une communauté
- création d'entreprise, essaimage, levées de fonds
- autres (ouverture internationale,..)

Elle en précise les partenariats éventuels. Dans le cas où des livrables ont été spécifiés dans l'annexe technique, on présentera ici un bilan de leur fourniture.

| Liste des éléments. Préciser les titres, années et commentaires | |
|---|--|
| Brevets internationaux obtenus | |
| Brevet internationaux en cours d'obtention | |
| Brevets nationaux obtenus | |
| Brevet nationaux en cours d'obtention | |
| Licences d'exploitation (obtention / cession) | |
| Créations d'entreprises ou essaimage | |
| Nouveaux projets collaboratifs | <ol style="list-style-type: none"> 1. Valodim : Valeur optimale des digestats issus de la méthanisation. Programme BPI Investissement d'avenir PSPC 2013. Le consortium regroupe une PME Union des Distilleries de la Méditerranée, quatre ETI (Entreprise de Taille Intermédiaire) ARTERRIS INNOVATION, CAP SEINE, FERTIGAZ, OVALIE Innovation, une GE (Grande Entreprise) VIVESCIA et trois laboratoires l'INSA de Toulouse, l'Université Technologique de Compiègne et IRSTEA Rennes. Il est conduit par ARTERRIS Innovation. L'objectif est de « Structurer une filière nationale de valorisation des digestats par la création et l'organisation d'écosystèmes locaux de production de fertilisants organiques ». 2. ETYC (Evaluation intégrée des phases de Traitement et de recYclage agricole des matières organiques pour des systèmes d'élevage moteurs dans l'atténuation du changement Climatique), AAP REACTIF, ADEME, 2012-2015 : collaboration Irstea, INRA, abordant notamment la modélisation du compostage des digestats et de leur retour au sol. |
| Colloques scientifiques | <ol style="list-style-type: none"> 1. Organisation de la session Digestats des <i>Journées recherche et industrie. Biogaz Méthanisation</i>. 3-5 Février 2015 Rennes. 4 présentations orales 2. En préparation avec le Club Biogaz, une journée spéciale valorisation des digestats pour fin 2015 |
| Autres (préciser) | <ol style="list-style-type: none"> 1. Tâche 3.3. Les résultats obtenus dans le cadre des essais de siccité limite sur les digestats bruts ont été mis à profit dans le cadre des travaux d'un comité de normalisation à l'échelle nationale (AFNOR, GT1 du P16P) concernant la mesure de siccité limite. 2. Houot S. et Dabert P. ont participé à l'expertise collective MAFOR sur la Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usages agricole ou forestier |
| Autres (préciser) | |

E.4 POLES DE COMPETITIVITE (PROJET LABELLISES)

Pour les projets labellisés par un ou plusieurs pôles de compétitivité,

Collaboration du projet avec le(s) pôle(s) ayant labellisé

Quelles collaborations y a-t-il eu entre votre projet et le(s) pôle(s) de compétitivité l'ayant labellisé ?

| |
|---|
| <p>- Ingénierie de projets de recherche Montage de projets impliquant des partenaires du pôle</p> <p>- Réflexion stratégique Accueil et présentation des activités au Directeur Projet du pôle, Formation relais départementaux du pôle, Participation à la réalisation de la feuille de route stratégique 2013-2020 du pôle, Participation à des conférences de dissémination scientifique pour les industriels organisés par le pôle</p> <p>- Actions collaboratives (colloques...) Organisation du colloque IWBTE (10-11 mai 2012) sur la torréfaction de la biomasse avec diffusion/invitation des partenaires membres du pôle</p> |
|---|

Activités financées par le complément de pôle (laboratoires publics uniquement)

Détailler les activités réalisées par les laboratoires publics avec le complément de financement accordé au titre de la labellisation. Préciser notamment les partenaires impliqués et la collaboration menée avec le ou les pôles.

| | |
|--|---------------------------------|
| Montant du complément accordé par l'ANR (pour chaque labo public) | - Partenaire ARMINES : 12 000 € |
|--|---------------------------------|

| Type d'action menée | Détails (exemples non limitatifs) | Dépenses complément de pôle* |
|--|---|------------------------------|
| Actions contribuant à la réflexion stratégique et à la programmation scientifique du pôle | Accueil du Directeur Projet du pôle, Formation des relais départementaux du pôle, Participation à la réalisation de la feuille de route stratégique 2013-2020 du pôle Participation à des conférences de dissémination scientifique pour les industriels organisés par le pôle | ARMINES : 3080 € |
| Actions de communication scientifique et publique bénéficiant à la notoriété du pôle | Organisation d'un colloque international sur la torréfaction de la biomasse | ARMINES : 1540 € |
| Développement de la recherche partenariale (recherche de partenaires, frais de gestion du partenariat, ingénierie de projets,...) | Dépenses relatives au montage des projets impliquant des partenaires du pôle | ARMINES : 7380 € |
| Valorisation de la recherche et transfert vers le monde industriel | | |

* Estimation des dépenses imputées sur le complément de financement accordé au titre de la labellisation par un pôle de compétitivité, partenaires publics seulement.

E.5 IMPACT AU NIVEAU DES PARTENAIRES INDUSTRIELS (LE CAS ECHEANT)

Entreprise Solagro

Maximum 10 à 20 lignes par entreprise. Pour chaque entreprise du consortium, décrire les activités dans le projet, en se concentrant sur les apports, collaborations et perspectives liés au projet. Préciser notamment les perspectives d'application industrielle ou technologique, de potentiel économique et commercial, d'intégration dans l'activité industrielle, etc.

| | |
|---|---|
| Entreprise | Solagro |
| Rédacteur (nom + adresse mél) | Sylvaine Berger (sylvaine.berger@solagro.asso.fr) |
| <p>Solagro a participé au projet dans le cadre de la mise en place du comité de suivi, de l'étude sur l'optimisation énergétique de Geotexia et de l'évaluation économique des filières de post-traitements. Dans le cadre de ces différentes tâches, en plus de la participation aux comités de pilotage et de suivis, Solagro a collaboré avec l'ensemble des partenaires pour collecter les informations nécessaires aux évaluations, que ce soient des données techniques et économiques pour les partenaires industriels ou des données issues des pilotes des équipes de recherche. Le programme a permis à Solagro de jouer pleinement ce rôle d'interface entre les laboratoires de recherche, les industriels et les agriculteurs. Les connaissances acquises dans le programme ainsi que la méthode de travail pour la comparaison des différentes solutions de traitement du digestat permettront à Solagro d'affiner les préconisations apportées aux porteurs de projets que Solagro accompagne dans le cadre de son activité.</p> | |

Entreprise Géotexia

Maximum 10 à 20 lignes par entreprise. Pour chaque entreprise du consortium, décrire les activités dans le projet, en se concentrant sur les apports, collaborations et perspectives liés au projet. Préciser notamment les perspectives d'application industrielle ou technologique, de potentiel économique et commercial, d'intégration dans l'activité industrielle, etc.

| | |
|---|---------------------------------------|
| Entreprise | Géotexia |
| Rédacteur (nom + adresse mél) | Caroline Zemb (caroline.zemb@idex.fr) |
| <p>Géotexia a participé au projet DIVA en fournissant les échantillons de digestats et en échangeant avec les autres partenaires sur son retour d'expérience, par l'intermédiaire d'Idex, l'exploitant du site de méthanisation.</p> <p>Ainsi Idex a participé chaque année aux réunions techniques et au comité de pilotage et a transmis aux acteurs qui le demandaient les données techniques et économiques nécessaires aux évaluations globales des filières de post-traitement, Géotexia ayant la particularité de combiner de nombreux types de post-traitements du digestat.</p> <p>Ces échanges ont permis à Géotexia/ Idex de mieux structurer ses connaissances du digestat, mais aussi de qualifier les caractéristiques des différents digestats produits en toute objectivité. Une partie des résultats expérimentaux de DIVA a été intégrée au dossier d'homologation de digestat de Géotexia, débuté en septembre 2012. Cette démarche, la première lancée en France sur des digestats s'est achevée en février 2014 avec l'obtention des lettres de décision du ministère de l'Agriculture. Quantifier l'influence de DIVA sur cette décision du Ministère est complexe, mais il est certain que les données externes et objectives résultant de ce programme de recherche a facilité l'expertise de ce dossier.</p> | |

Entreprise Suez Environnement

Maximum 10 à 20 lignes par entreprise. Pour chaque entreprise du consortium, décrire les activités dans le projet, en se concentrant sur les apports, collaborations et perspectives liés au projet. Préciser notamment les perspectives

d'application industrielle ou technologique, de potentiel économique et commercial, d'intégration dans l'activité industrielle, etc.

| | |
|---|--|
| Entreprise | Suez Environnement |
| Rédacteur (nom + adresse mél) | Jean-Luc Martel (Jean-Luc.MARTEL@suez-env.com) |
| <p>Suez Environnement a participé à la tâche 3 (caractérisation des digestats bruts) via la fourniture d'échantillons et d'informations sur le site industriel qu'il exploite et surtout à la tâche 5 (valorisation agronomique des digestats) du projet DIVA. Pour cette tâche, il a réalisé différents tests de laboratoire (phyto-toxicité) et essais sous serre (Chaminade) ou de plein champ (sur blé dur) en bonne coordination avec l'INRA qui pilotait cette tâche.</p> <p>Suez Environnement a échangé avec les autres partenaires sur son retour d'expérience en méthanisation, Il a participé chaque année aux réunions techniques et comité de pilotage et a transmis aux partenaires les données techniques de ses installations.</p> <p>Les travaux de DIVA ont permis à Suez Environnement d'améliorer ses connaissances sur le post-traitement du digestat et sa valorisation agronomique, poste-clé d'un projet de méthanisation industrielle et du business plan associé. Les progrès les plus significatifs ont été accomplis à 2 niveaux :</p> <p>1/ dans la mise en évidence de l'effet significatif de la phase de méthanisation sur la stabilisation biochimique de la fraction organique extraite des ordures ménagères et qui permet de raccourcir/faciliter la phase de compostage ou maturation aérobie intervenant en aval de celle-ci. En effet, en l'absence de méthanisation, les composts d'ordures ménagères présentent des niveaux de maturité plus faibles (rottegrad 1 ou 2 contre rottegrad 5 pour le méthacompost)</p> <p>2/ dans les différentes possibilités d'intégration du digestat produit dans la fertilisation d'une culture de blé dur via soit :</p> <p>2.1/ un apport de digestat brut en cultures et en sortie d'hiver et pouvant se substituer à une partie significative voire à la totalité de la fertilisation minérale azotée à apporter à cette période</p> <p>2.2/ un apport de digestat composté seulement quelques jours avant le semis et sans conduire à un quelconque effet dépressif sur la culture à venir par rapport au témoin non fertilisé.</p> | |

E.6 BILAN ET SUIVI DES PERSONNELS RECRUTES EN CDD (HORS STAGIAIRES)

Ce tableau dresse le bilan du projet en termes de recrutement de personnels non permanents sur CDD ou assimilé. Renseigner une ligne par personne embauchée sur le projet quand l'embauche a été financée partiellement ou en totalité par l'aide de l'ANR et quand la contribution au projet a été d'une durée au moins égale à 3 mois, tous contrats confondus, l'aide de l'ANR pouvant ne représenter qu'une partie de la rémunération de la personne sur la durée de sa participation au projet.

Les stagiaires bénéficiant d'une convention de stage avec un établissement d'enseignement ne doivent pas être mentionnés.

Les données recueillies pourront faire l'objet d'une demande de mise à jour par l'ANR jusqu'à 5 ans après la fin du projet.

| Identification | | | | Avant le recrutement sur le projet | | | Recrutement sur le projet | | | | Après le projet | | | | |
|----------------|----------|----------------------------|------------------------------|---|-------------------------------------|--|---------------------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------------------|---|----------------------|-------------------|--|-----------------------------|
| Nom et prénom | Sexe H/F | Adresse email (1) | Date des dernières nouvelles | Dernier diplôme obtenu au moment du recrutement | Lieu d'études (France, UE, hors UE) | Expérience prof. Antérieure, y compris post-docs (ans) | Partenaire ayant embauché la personne | Poste dans le projet (2) | Durée missions (mois) (3) | Date de fin de mission sur le projet | Devenir professionnel (4) | Type d'employeur (5) | Type d'emploi (6) | Lien au projet ANR (7) | Valorisation expérience (8) |
| MBAYE Serigne | H | serignembay@yahoo.fr | novembre 2014 | Doctorat | INP Grenoble (France) | Poste d'ATER (7mois) | Irstea Montoldre | Post-doc | 15mois | Juin 2012 | ATER puis Prof. Maths Qualifié MdC 2015 | Université / Lycée | CDD | | |
| BLANC Marion | F | Marion.Blanc@mines-albi.fr | | Licence Pro | INP Toulouse (France) | Ingénieur d'études CNRS | Armines/Rapsodee | Ingénieur Recherche | 17 mois | Aout 2013 | Technicien supérieur | Eurosérum | Interim | Valorisation du lactosérum par séchage par atomisation | |
| BUFFET Julie | F | julie.buffet@irstea.fr | Encore en poste à Irstea | DUT Chimie | Rennes | 2 ans | Irstea Rennes | AI | 15 mois | Novembre 2012 | | | | | |
| TRAN Dung | F | ntran@mines-albi.fr | Fin 2014 | Doctorat | Univ. Claude Bernard, Lyon 1 | Ingénieur d'études | Armines/Rapsodee | Ingénieur Recherche | 15 mois | Mai 2014 | recherche d'emploi | | | | |
| ZENG Yang | H | yang.zeng@irstea.fr | Encore en poste à Irstea | Doctorat | Université Rennes I (France) | Ingénieur Veolia (Chine) | Irstea Rennes | Post-doc | 18 mois | Décembre 2013 | | | | | |
| ASKRI Amira | F | aaskri@grignon.inra.fr | Encore en poste à INRA | Master 2 STVE | AgroParisTech | sans | INRA Grignon EGC | Doctorante | 36 mois | Avril 2015 | recherche d'emploi | | | | |
| CARRETI | F | severine.c | Début 3 | Master 2 | Université | Ingénieur | Université | Doctorant | 36 mois | Octobre | Post-doc | Université de | R&D | Colmata | |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|---|-----------------------------|------------------------|----------|---------------|---------|------------------|-------------|--------|---------------|--|--------|--|----|--|
| ER Séverine | | arretier@univ-montp2.fr | ème année de thèse | | Montpellier 2 | d'étude | Montpellier 2 | | | 2014 | | Taiwan | | ge | |
| VOGEL Laure | F | Laure.vogel@grignon.inra.fr | Encore en poste à INRA | Doctorat | AgroParisTech | sans | INRA Grignon EGC | Ingenieur e | 1 mois | Novembre 2014 | | | | | |

Aide pour le remplissage

- (1) **Adresse email** : indiquer une adresse email la plus pérenne possible
- (2) **Poste dans le projet** : post-doc, doctorant, ingénieur ou niveau ingénieur, technicien, vacataire, autre (préciser)
- (3) **Durée missions** : indiquer en mois la durée totale des missions (y compris celles non financées par l'ANR) effectuées sur le projet
- (4) **Devenir professionnel** : CDI, CDD, chef d'entreprise, encore sur le projet, post-doc France, post-doc étranger, étudiant, recherche d'emploi, sans nouvelles
- (5) **Type d'employeur** : enseignement et recherche publique, EPIC de recherche, grande entreprise, PME/TPE, création d'entreprise, autre public, autre privé, libéral, autre (préciser)
- (6) **Type d'emploi** : ingénieur, chercheur, enseignant-chercheur, cadre, technicien, autre (préciser)
- (7) **Lien au projet ANR** : préciser si l'employeur est ou non un partenaire du projet
- (8) **Valorisation expérience** : préciser si le poste occupé valorise l'expérience acquise pendant le projet.

Les informations personnelles recueillies feront l'objet d'un traitement de données informatisées pour les seuls besoins de l'étude anonymisée sur le devenir professionnel des personnes recrutées sur les projets ANR. Elles ne feront l'objet d'aucune cession et seront conservées par l'ANR pendant une durée maximale de 5 ans après la fin du projet concerné. Conformément à la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 modifiée, relative à l'Informatique, aux Fichiers et aux Libertés, les personnes concernées disposent d'un droit d'accès, de rectification et de suppression des données personnelles les concernant. Les personnes concernées seront informées directement de ce droit lorsque leurs coordonnées sont renseignées. Elles peuvent exercer ce droit en s'adressant l'ANR (<http://www.agence-nationale-recherche.fr/Contact>).