

GUIDE MÉTHODOLOGIQUE POUR LE SUIVI ET L'ÉTABLISSEMENT DES BILANS DE PERFORMANCES D'UNE INSTALLATION DE MÉTHANISATION

Juin 2014

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par l'APESA et Biomasse Normandie
Contrat n°1006C0035

Coordination technique : Guillaume BASTIDE – Service Prévention et Gestion des Déchets –
Direction Consommation Durable et Déchets – ADEME Angers



RAPPORT FINAL

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

SOMMAIRE

1.	Introduction.....	5
2.	Objectifs du suivi.....	6
2.1	Objectifs recherchés.....	6
2.2	Avantages et inconvénients.....	7
2.3	Différents niveaux de suivi.....	8
2.3.1	Suivi simplifié	8
2.3.2	Suivi complet.....	8
2.3.3	Suivi expérimental.....	9
2.3.4	Choix du type de suivi	9
3.	Méthodologie de suivi	11
3.1	Éléments de suivi par Unité Fonctionnelle.....	12
3.1.1	UF1 - Réception et transformation des matières premières.....	12
3.1.2	UF2 : Digesteur.....	14
3.1.3	UF3 - Valorisation énergétique.....	18
3.1.4	UF4 - Valorisation du digestat	20
3.1.5	UF5 - Fonctionnement général.....	22
3.2	Organisation du suivi.....	28
3.2.1	Rédaction d'un protocole.....	28
3.2.2	Moyens de mesure.....	29
3.2.3	Enregistrement du fonctionnement.....	32
3.2.4	Analyse des données	34
3.3	Spécificités de chaque installation.....	35
3.3.1	Connaissances élémentaires	35
3.3.2	Principales spécificités technologiques.....	35
3.3.3	Autres spécificités	36
3.4	Spécificités selon le niveau de suivi	36
4.	Bilans de suivi.....	39
4.1	Bilan technique.....	39
4.1.1	Indicateurs biologiques.....	39
4.1.2	Indicateurs techniques	44
4.2	Bilan énergétique	45
4.2.1	Indicateurs énergétiques	46
4.2.2	Indicateurs à suivre selon le mode de valorisation du biogaz	48
4.3	Bilan environnemental.....	49
4.3.1	Indicateurs d'efficacité technique.....	49
4.3.2	Evaluation des risques de nuisance	50

4.4	Bilan socio-économique	51
4.4.1	Etat de situation sur la création d'emplois	51
4.4.2	Bilan économique.....	52
5.	Fiches pratiques	58
5.1	Echantillonnage.....	58
5.1.1	Principe	58
5.1.2	Matériels	58
5.1.3	Méthodologie.....	58
5.2	Mesure de densité.....	62
5.2.1	Principe	62
5.2.2	Matériels	62
5.2.3	Méthode	62
5.2.4	Calcul de la densité :.....	62
5.3	Analyses de composition.....	63
5.4	Instrumentation	63
5.5	Fiches de suivi	66
5.5.1	Procédé alimentation continue	62
5.5.2	Procédé alimentation discontinue.....	64
5.6	Tableur de calcul d'indicateurs	66
5.6.1	Indicateurs de fonctionnement	66
5.6.2	Autres indicateurs	68
6.	Glossaire	71

RÉSUMÉ

La France s'est fixée des objectifs ambitieux de développement des énergies renouvelables et de limitation des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2020 au travers, notamment, de la loi de programmation pluriannuelle des investissements (PPI électricité, chaleur et gaz) et du Plan National d'Action en faveur des énergies renouvelables. La méthanisation doit concourir à l'atteinte de ces objectifs et des dispositifs de soutien ont été mis en œuvre à l'échelle nationale et locale pour permettre le développement de cette filière (tarifs de rachat de l'énergie, aides aux études préalables, aides à l'investissement etc.).

Si les objectifs environnementaux de ce développement ont été fixés (555 ktep de chaleur et 625 MW de puissance électrique installée), il convient cependant d'inscrire cette filière dans une démarche de développement sûre et pérenne avec une bonne visibilité des bilans de performances techniques mais aussi environnementaux et socio-économiques. Dès lors, l'accès à la connaissance des performances de ces unités de méthanisation est un élément fondamental pour l'évaluation de cette filière et la l'évolution des mesures d'accompagnement pour sa pérennisation.

La mise en place d'une méthodologie de suivi commune basée sur des indicateurs pertinents de performance doit permettre :

- De prévoir les équipements nécessaires au suivi dès la construction des installations.
- De préparer l'exploitant au suivi et au pilotage de son installation.
- D'établir les bilans de fonctionnement et d'interprétation des performances.
- D'apporter des solutions et/ou des pistes d'amélioration.
- D'aider l'exploitant dans la conduite de l'exploitation et dans l'amélioration des performances de production énergétique.

La multiplication de sites mettant en place le protocole suivi global proposé permettra d'alimenter un observatoire national de données au service de l'évolution et de la pérennisation de la filière.

Ce guide méthodologique apporte les éléments indispensables à la bonne mise en place d'un suivi d'exploitation d'une installation de méthanisation.

Il s'agit d'une version actualisée qui apporte des aspects complémentaires sur le suivi d'une installation notamment au niveau d'indicateurs liés à l'établissement des bilans environnemental et socio-économique.

Avertissement : chaque installation de méthanisation dispose d'un fonctionnement propre lié aux substrats utilisés et au process mis en place par l'opérateur industriel et/ou le constructeur. Ce guide s'attache à décrire de la manière la plus large possible les paramètres de suivi et les moyens de mesure à mettre en œuvre. Il propose en outre une méthode pour la mise en place d'un suivi rationnel et adapté à chaque situation. Il faut cependant souligner que chaque situation de terrain peut avoir ses propres spécificités qui demandent la mise en place d'équipements et/ou de protocoles adaptés. Même si ce guide se veut couvrir les situations les plus larges possibles, il ne peut prétendre répondre de manière exhaustive à toutes les situations pouvant se rencontrer sur le terrain. Certaines adaptations/modifications pourront alors se révéler nécessaires.

1. Introduction

Le présent guide vise à fournir, aux porteurs de projets et autres organismes pouvant être impliqués (Association Technique, Chambre d'Agriculture, Bureau d'études, ADEME etc.), une méthodologie commune de suivi des unités de méthanisation.

La systématisation et l'homogénéisation du suivi des unités de méthanisation sont importantes pour permettre le recueil des performances réelles de fonctionnement. Ces données permettront de dresser le bilan annuel de fonctionnement d'une installation de méthanisation, qu'elle soit individuelle ou collective. Cette méthode devra également pouvoir être utilisée pour établir des bilans de fonctionnement sur des périodes plus longues allant éventuellement jusqu'à la durée de vie de l'installation.

Le suivi s'applique à toutes les phases du process (de la réception à la valorisation des sous-produits) et concerne les éléments techniques et économiques. Plusieurs éléments sont à considérer dans ce suivi. Pour chacun d'eux, des données sont recueillies et constituent la base de calcul des bilans. Quatre catégories de bilan seront ainsi établies :

- Bilan technique.
- Bilan énergétique.
- Bilan environnemental.
- Bilan socio-économique.

Ces bilans serviront à l'élaboration d'une "base de données" qui permettra de comparer les installations entre elles et de faire des bilans à une échelle nationale. Ce guide répond à un objectif de création d'un « observatoire de la filière à l'échelle nationale » afin de regrouper un ensemble de références utilisables pour permettre un accompagnement des acteurs et pour évaluer les futures innovations technologiques.

Le guide est ainsi décliné en 5 grandes parties :

- **Objectifs du suivi** : Quelles sont les informations recherchées ? Quels sont les avantages et les inconvénients ? Quel niveau de suivi mettre en place ?
- **Méthodologie de suivi** : Reprise des aspects fondamentaux à connaître avant de se lancer dans un suivi pour l'interprétation des bilans notamment.
- **Bilans de suivi** : Quels sont-ils ? Comment les établir ?
- **Fiches pratiques** : Présentation pratique des techniques en vue d'assister le porteur de projet dans la réalisation du suivi. Plusieurs tableurs sous format Excel accompagnent également ce guide, ils sont présentés dans la partie 5.6.
- **Glossaire** : Explication des principaux termes techniques utilisés.

2. Objectifs du suivi

Cette partie vise à décrire les objectifs d'un suivi et les avantages que peut y trouver un exploitant/opérateur d'une installation de méthanisation à le mettre en place. Les différents niveaux de suivi envisageables sont également précisés en fonction de l'implication de l'exploitant d'une part, et du niveau technique (instrumentation et analyse) possible sur l'unité de traitement/valorisation, d'autre part.

2.1 Objectifs recherchés

La mise en place d'un suivi de fonctionnement d'une installation de méthanisation peut répondre à plusieurs objectifs et/ou obligations¹:

- Contrôler le bon fonctionnement.
- Optimiser la production d'énergie.
- Répondre aux exigences réglementaires (notamment ICPE).
- Calculer le taux de valorisation énergétique.
- Participer à un programme de suivi.

Le suivi d'une installation de méthanisation est indispensable à son bon fonctionnement. Habituellement, chaque opérateur et/ou exploitant assure un minimum de suivi de certains paramètres, notamment dans le cadre du contrôle des équipements.

La mise en place d'un suivi sur la base des recommandations formulées dans ce guide va permettre à l'exploitant :

- De disposer d'un protocole adapté à sa propre situation.
- D'assurer l'enregistrement des paramètres nécessaires à l'élaboration des bilans de fonctionnement.

Le recueil de ces données permet d'établir les bilans de performances sur différents plans : technique, énergétique, socio-environnemental et économique. Ils enrichissent ainsi les références nationales sur la filière et permettent d'accompagner les acteurs économiques et politiques pour permettre son développement.

Pour obtenir les résultats attendus, cette démarche nécessite de rationaliser les différentes étapes de fonctionnement du processus de méthanisation. Ainsi, chaque étape va constituer une **Unité Fonctionnelle** pour laquelle différents paramètres nécessaires au suivi seront identifiés.

Une **unité fonctionnelle** constitue un ensemble de matériels et d'actions relatifs à une étape du fonctionnement de l'installation de méthanisation.

Ainsi, pour une installation de méthanisation, nous distinguerons 5 unités fonctionnelles :

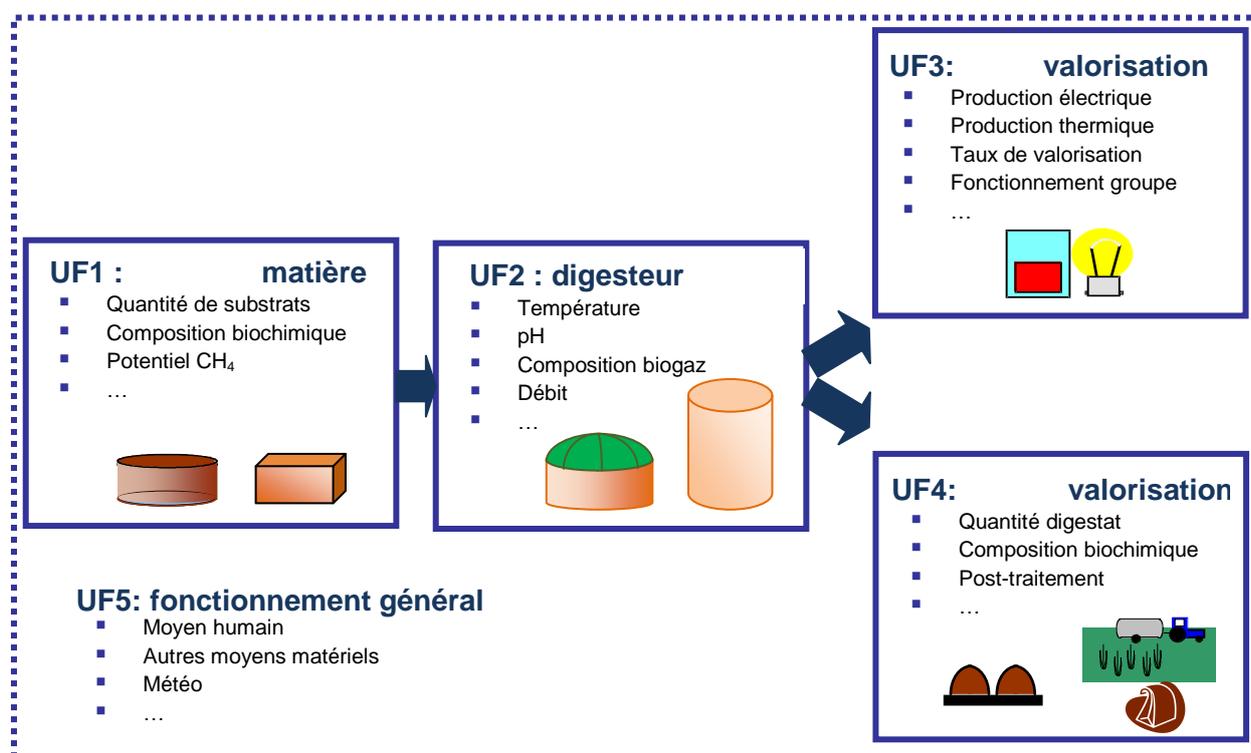
- **Unité fonctionnelle 1** ou « UF1 » : Réception et transformation des matières premières. Cette UF regroupe tous les paramètres relatifs aux matières premières et aux procédés de stockage/transformation mis en place en amont de la digestion.
- **Unité fonctionnelle 2** ou « UF2 » : Digesteur. Cette UF comprend les équipements de digestion et de stockage de biogaz. C'est à ce niveau que sont mesurées les performances de production de biogaz et les rendements de biodégradation anaérobie.

¹La réglementation ICPE impose la mise en place d'enregistrements de données et l'établissement de bilans de fonctionnement des installations de traitement biologique de déchets. La plupart des paramètres sont utiles au suivi de fonctionnement d'une installation.

- Unité fonctionnelle 3 ou « UF3 » : Valorisation énergétique. Cette UF comprend l'ensemble des équipements destinés au traitement du biogaz et à sa valorisation énergétique ; y compris la vente d'énergie à un opérateur.
- Unité fonctionnelle 4 ou « UF4 » : Valorisation du digestat. Cette UF comprend l'ensemble des équipements destinés au stockage, au post-traitement et à la valorisation du digestat.
- Unité fonctionnelle 5 ou « UF5 » : Fonctionnement général, impact environnemental, évaluation des nuisances et impact en termes de création d'emplois. Il s'agit de regrouper à ce niveau toutes les opérations liées au fonctionnement général de l'installation ainsi que les éléments permettant d'apprécier l'impact de l'installation sur l'environnement et sur la création d'emplois. C'est également à ce stade, que seront recueillis les paramètres permettant d'apprécier la "santé" économique de l'unité.

Le schéma suivant indique le principe de la structuration du suivi en unités fonctionnelles.

Figure 1 : Schéma de principe du suivi des différentes unités fonctionnelles



2.2 Avantages et inconvénients

La mise en place d'un suivi ne doit pas être considérée comme une contrainte mais bien comme un moyen permettant de garantir le bon fonctionnement et l'optimisation de l'installation de méthanisation. Il s'agit d'une aide à la conduite d'exploitation.

Sans être exhaustif, le tableau suivant présente les principaux avantages et inconvénients relatifs à la mise en place d'un suivi.

Tableau 1 : Avantages et inconvénients du suivi

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Connaissance et évaluation des performances. • Contrôle du rendement de production. • Optimisation de la valorisation énergétique. • Maîtrise de la vente d'énergie. • Maîtrise des coûts de fonctionnement. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dégager du temps pour assurer le suivi. • Disposer d'un budget pour garantir les besoins d'instrumentation et d'analyses.

Avec l'évolution du nombre de nouvelles installations (notamment au niveau agricole), on peut imaginer que les opérateurs vont mettre en place progressivement un certain niveau de suivi. L'application d'une même méthodologie de suivi permettra le partage d'informations entre les sites de méthanisation. Les retours d'expériences pourront alors être bénéfiques à tous les acteurs de la filière. L'organisation d'un système de recueil des données issues des différents suivis reste à définir et à être mise en place par les structures compétentes.

2.3 Différents niveaux de suivi

On définit **trois niveaux de suivi** en fonction de la précision souhaitée. En effet, le suivi de fonctionnement d'une unité de méthanisation peut être plus ou moins lourd à mettre en œuvre, notamment en termes de moyens humains, et nécessite une instrumentation plus ou moins complexe et coûteuse.

2.3.1 Suivi simplifié

Le suivi simplifié est le premier niveau ; il constitue la base d'un suivi élémentaire. Il est réalisé à partir d'un ensemble minimum de paramètres qui permet d'assurer le suivi avec des données exploitables et comparables avec d'autres sites. Les paramètres relevés se réfèrent essentiellement aux unités fonctionnelles UF1, UF3, UF4 et UF5.

Ce type de suivi exige donc peu de moyens humains et une instrumentation relativement restreinte, les outils métrologiques nécessaires correspondant à ceux imposés par la réglementation : compteur à chaleur et compteur électricité.

Ces paramètres permettront de réaliser un bilan de fonctionnement sommaire de l'installation mais seront insuffisants pour optimiser son fonctionnement.

2.3.2 Suivi complet

Il s'agit du second niveau de suivi. Il complète le suivi simplifié en intégrant de nouveaux relevés. Le suivi complet permet de réaliser un bilan de fonctionnement approfondi de l'installation.

L'instrumentation mise en œuvre est plus lourde et exige des investissements supplémentaires, notamment en matière d'outils métrologiques. Il conviendra d'intégrer l'ensemble des instruments au moment de la construction.

Ce type de suivi sera certainement largement utilisé car il permet une "prise en main" de l'installation et la réalisation d'un bilan précis des performances, sans nécessiter des moyens humains importants.

2.3.3 Suivi expérimental

Le dernier niveau de suivi dit précis ou expérimental nécessite des moyens humains conséquents ainsi qu'une instrumentation spécifique, très poussée, qui peut exiger une certaine expérience.

2.3.4 Choix du type de suivi

Le tableau suivant permet d'apporter une aide quant au choix du suivi de fonctionnement qu'un opérateur pourrait mettre en place.

Technique	Peu ou pas d'instrumentation disponible Fonctionnement de l'installation simplifié	Substrats délicats (type lipides) Obligation d'améliorer les rendements (contrat énergie) Problème technique à résoudre Exigences réglementaires (sous-produits animaux, autorisation ICPE etc.)	Recherche de l'optimum des performances Programme de suivi spécifique à un paramètre (par exemple maîtrise de l'H ₂ S, performances agronomiques du digestat etc.)
Humain	Peu de temps disponible Pas de compétences techniques Pas de structure de soutien	Disponibilité d'un opérateur pour respecter le protocole de suivi (environ 20mn/jour jusqu'à quelques heures lors des opérations plus lourdes de type échantillonnage de produits)	Disponibilité de l'opérateur Accompagnement du suivi par un centre technique, un laboratoire, l'ingénieur, le constructeur
Financier	Moyens limités	Budget disponible pour instrumenter l'installation et pour des analyses externes	Programme d'étude associé au suivi Budget disponible pour instrumenter l'installation et pour des analyses externes
Type de suivi	 Suivi simplifié	 Suivi complet	 Suivi expérimental

Retour d'expérience sur un suivi d'installation de méthanisation agricole : GAEC du Bois Joly - La Verrie (85) – Denis Brosset (agriculteur)

L'installation de méthanisation met en œuvre un procédé à alimentation discontinue sur fumier de bovins et déchets de fruits et légumes. La digestion est réalisée au sein de 4 digesteurs de type silo-couloir fonctionnant en parallèle. Un module de cogénération d'une puissance électrique de 30 kW permet de valoriser le biogaz. Le site dispose également d'un mini réseau chaleur qui dessert une habitation et les bâtiments d'élevage.

Ce site fait l'objet d'un suivi expérimental sur une durée de 2 ans (2008-2010). Le suivi, financé par l'ADEME, est réalisé par deux bureaux d'études (APESA et Biomasse Normandie) avec le concours de l'exploitant.

Le suivi des différents paramètres vous aide-t-il à piloter votre installation ?

L'ensemble des paramètres relevés est effectivement utile à l'exploitation quotidienne et globale de l'installation. La démarche employée m'a également permis de "prendre en main" plus facilement l'installation au cours de la phase de démarrage. En effet, le procédé de méthanisation en discontinu est peu représenté en France et il existe donc peu de références techniques pouvant aider à la prise de décision.

Le suivi mis en place (de type expérimental) représente-t-il une charge importante de travail ?

Le suivi quotidien réalisé dans le cadre de l'étude financé par l'ADEME nécessite un investissement humain d'environ 10 minutes par jour. Ce suivi est décliné en deux étapes :

- un relevé de terrain quotidien réalisé à partir des outils métrologiques mis en place dans le cadre de l'étude ;
- une saisie informatique de l'ensemble des relevés qui a lieu en moyenne une fois par mois.

Le suivi terrain est une étape, certes imposée dans le cadre du programme d'étude, mais indispensable à l'exploitation de l'unité. Ainsi, je ne considère pas que cela constitue une charge de travail supplémentaire. Seule la saisie informatique me semble plus contraignante en raison du manque d'aisance vis-à-vis de l'outil informatique en tant que tel. Enfin, le suivi impose quelques contraintes d'exploitation supplémentaires comme par exemple la mesure unitaire de la production de biogaz par digesteur.

Grâce au suivi avez-vous amélioré le fonctionnement (rendement) de votre installation ?

Certains indicateurs comme la composition du mélange entrant et la production de biogaz associée, m'ont permis d'améliorer l'exploitation de mon installation. Par exemple, au cours des différents chargements, je me suis aperçu que la quantité de fruits de légumes est un facteur limitant de la digestion, et une part trop importante dans le mélange peut nuire à la production de biogaz voire conduire à une inhibition totale de la réaction de méthanisation.

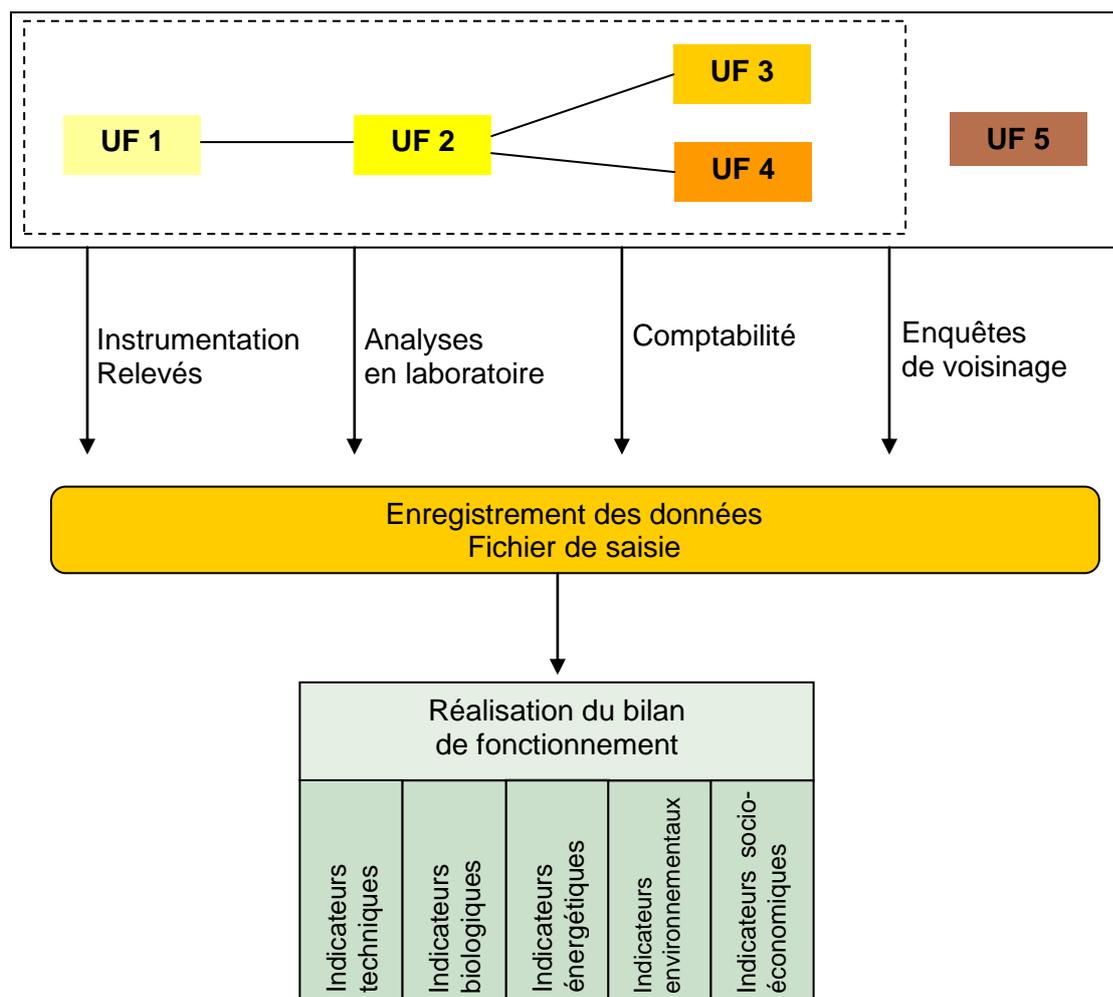
3. Méthodologie de suivi

Les objectifs de suivi d'une installation de méthanisation sont multiples. Afin d'en dégager les aspects fondamentaux, il convient de :

- Définir les éléments de suivi considérés par unité fonctionnelle.
- Rappeler les bases relatives à l'organisation du suivi :
 - . réalisation d'un protocole de suivi ;
 - . moyens de mesure ;
 - . enregistrement des données ;
 - . analyse des données ;
- Présenter les spécificités de chaque installation :
 - . connaissance élémentaire ;
 - . principales spécificités technologiques ;
- Considérer les particularités des différents niveaux de suivi.

Le schéma ci-dessous reprend le principe de la méthodologie générale de suivi. Cette méthodologie sera déclinée pour chaque niveau de suivi.

Figure 2 : Schéma de principe de la mise en place d'un suivi



3.1 Éléments de suivi par Unité Fonctionnelle

Dans ce chapitre, le contenu du suivi est détaillé pour chaque unité fonctionnelle composant une installation de méthanisation.

3.1.1 UF1 - Réception et transformation des matières premières

- ☒ Cette UF concerne toutes les étapes et actions liées à la réception, au stockage et au prétraitement des matières premières qui vont entrer en méthanisation.
- ☒ Les paramètres qui vont constituer le suivi de cette UF comprennent :
 - Les volumes et les tonnages des différentes matières.
 - Les compositions biochimiques des substrats.
 - Les potentiels méthanogènes des substrats.

- **Quantités de substrats traités**

La connaissance précise des quantités des différents substrats traités est indispensable aux calculs des paramètres fonctionnels de l'installation et à l'établissement des bilans de fonctionnement.

On peut identifier différents niveaux d'informations à collecter :

- Les quantités annuelles de substrats traités (en tonne ou en m³ par an) : elles sont généralement bien connues pour les effluents d'élevage (bilan agronomique, dossier de mise aux normes etc.). Pour les substrats exogènes à l'installation, il est nécessaire d'avoir des bordereaux des pesées des différents produits entrant sur l'installation ou de mettre en place une méthode de mesure de ces produits.
- Les quantités quotidiennes traitées par l'installation : il s'agit de connaître de la manière la plus précise possible les quantités des différents substrats ou du mélange traités sur l'installation. Lorsqu'il s'agit de substrats liquides (pompables), on mettra en place un système de mesure des débits (débitmètre, mesure de niveaux dans la fosse d'introduction, autre système étalonné). Pour les substrats solides, on contrôlera les masses introduites (pesons, système étalonné de mesure d'un volume²).

📖 Notons que pour obtenir des données fiables, il sera nécessaire de mesurer la densité des différents produits (voir § 5.2 – Fiches pratiques).

- **Composition des substrats traités**

Le contrôle des matières premières permet de vérifier la composition des substrats ainsi que leur comportement en méthanisation. Ce contrôle permet de connaître la qualité des produits entrants (par voie de conséquence la qualité et l'innocuité du digestat obtenu), d'appréhender la composition permettant ensuite de calculer les paramètres fonctionnels de l'installation (teneur en matière sèche, charge organique etc.) et de vérifier le niveau de production de biogaz.

Sur la base d'un échantillonnage (*voir § 5.1 – Fiches pratiques*) représentatif de chaque substrat, il s'agit de faire réaliser par un laboratoire compétent différentes analyses.

² Il peut s'agir par exemple d'étalonner le godet d'un chargeur télescopique ou encore la benne d'une remorque agricole.

Ce suivi des matières premières a pour but :

- De contrôler la composition biochimique des produits entrants. Il s'agit de connaître les paramètres **suyvants** :
 - . Teneur en matière sèche.
 - . Teneur en matière organique³.
 - . Teneur en azote total⁴.
 - . Teneur en azote ammoniacal⁵.
 - . Teneur en phosphore⁴.

 Eventuellement, d'autres paramètres peuvent être collectés : les laboratoires proposent généralement un « menu analytique » pour déterminer les principaux paramètres de composition biochimique d'un échantillon organique. Tous ne sont pas nécessaires pour le suivi opérationnel de l'installation mais ils permettent d'avoir une bonne connaissance des produits organiques utilisés (voir § 5.3 – Fiches pratiques).

- De vérifier les critères d'innocuité et d'absence de composés indésirables :
 - . Inertes et impuretés : plastique, verre etc.
 - . Éléments traces métalliques (E.T.M.).
 - . Composés traces organiques (C.T.O.).
 - . Critères microbiologiques⁶.
- De **connaître le potentiel méthanogène** de chaque substrat. A partir d'un échantillon représentatif du produit, on détermine la production totale de biogaz et la teneur en méthane de ce dernier. Ce test permet de connaître et de contrôler la production de biogaz du substrat utilisé. C'est une étape incontournable pour permettre une bonne analyse des performances de la méthanisation. En effet la connaissance du potentiel méthanogène permet de valider la production de méthane attendue et donc la production d'énergie qui en découlera. C'est également un test qui permet le contrôle de la qualité des matières entrantes dans le digesteur⁶. (voir § 5.3 – Fiches pratiques).

 Notons que la fréquence d'échantillonnage et d'analyse dépendra de la nature des substrats utilisés. Certains produits sont relativement stables tout au long de l'année (cas de la plupart des effluents d'élevage) ; d'autres au contraire présentent des variations saisonnières importantes (cas des déchets verts, certains déchets agroalimentaires etc.). Pour ces derniers il sera nécessaire d'augmenter la fréquence d'échantillonnage et d'analyse.

³ Pour les produits solides (MS>1%) la matière organique (MO) est habituellement déterminée par une mesure de calcination à 550°C, on parle alors de Matière Sèche Volatile (MSV). Dans le cas de produits organiques non souillés par des plastiques ou des composés organiques de synthèse, il est couramment admis que MSV = MO.

⁴ Azote et phosphore sont des éléments nutritionnels indispensables au bon fonctionnement de la fermentation méthanique ; on retient généralement le ratio suivant : C/N/P = 1/30/150.

⁵ Il est important de connaître la teneur en azote ammoniacal du substrat (NH₄⁺) car une concentration importante en ammoniacque dans le digesteur peut entraîner des baisses de performances de la fermentation.

⁶ La mesure du potentiel méthanogène (ou BMP : biochemical methane potential) se fait en laboratoire, au moyen de réacteurs anaérobies instrumentés et d'un inoculum microbien adapté. Des recommandations de bonnes pratiques existent pour réaliser le test afin d'obtenir des résultats fiables. Il est recommandé de vérifier le protocole utilisé par le laboratoire avant de commander une analyse. A noter qu'une étude interlaboratoires est en cours (2012-2014) pour harmoniser les pratiques des laboratoires et des centres d'essais à l'échelle nationale ; une proposition de norme pourrait en découler.

3.1.2 UF2 : Digesteur

- ✚ Cette UF concerne tous les équipements de digestion et de stockage du biogaz. C'est à ce niveau que sont mesurées les performances de la biodégradation anaérobie.
- ✚ Les paramètres qui vont constituer le suivi de cette UF comprennent :
 - Les volumes, les tonnages et la composition du mélange entrant.
 - Les paramètres de fonctionnement du milieu de fermentation.
 - La production et la composition du biogaz.

- **Mélange entrant dans le digesteur**

- ☞ **Quantité**

A défaut de connaître les quantités quotidiennes de chaque substrat, la quantité de mélange des différents produits entrant dans le digesteur est une donnée indispensable à l'établissement des paramètres de fonctionnement de l'installation.

- ☞ **Composition du mélange**

Pour alléger le suivi et le nombre d'analyses à réaliser, il peut être envisagé d'effectuer les analyses de composition biochimique et d'innocuité sur un échantillon représentatif du mélange entrant dans le digesteur.

Signalons cependant que cette analyse ne permettra pas d'identifier précisément les variations éventuelles de composition de chacun des substrats.

La fréquence d'échantillonnage et d'analyse dépendra de la variation de composition du mélange et de celle éventuelle de certains substrats (comme les déchets verts par exemple). La fréquence d'analyse sera définie dans le protocole de suivi.

- **Milieu de fermentation**

Différents paramètres sont nécessaires pour suivre le fonctionnement d'un digesteur.

La mesure de ces paramètres va permettre :

- de vérifier le bon déroulement de la méthanisation ;
- d'anticiper d'éventuelles dérégulations de la fermentation.

- ☞ **Température**

Un suivi continu de la température au sein du digesteur est nécessaire. Pour cela le digesteur (ou les digesteurs) doit être équipé d'une sonde permettant de connaître la température interne au digesteur.

Cette sonde doit être placée dans le milieu du digesteur, à une distance suffisante des échangeurs de chaleur et loin des parois de la cuve, afin de mesurer une température moyenne de fermentation. Généralement, on utilise une sonde thermocouple (de type « K » ou de type « pt100 ») positionnée dans un gaine (« doigt de gant ») afin d'être accessible de l'extérieur et ainsi pouvoir être étalonnée et/ou changée si elle est défectueuse. Il est également préconisé de mettre deux sondes par digesteur afin de vérifier les dérives éventuelles de l'une ou l'autre et ainsi procéder à un étalonnage si nécessaire.

La précision de la mesure doit être de l'ordre de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$. La fréquence de la mesure n'est pas nécessairement élevée compte tenu du fait que le digesteur est maintenu en température. Ainsi, un relevé quotidien est suffisant si un enregistrement automatique n'est pas prévu sur l'installation.

Signalons que généralement le système de chauffage du digesteur a une régulation grâce à cette mesure de température. Cela peut permettre de récupérer cette donnée assez facilement pour le suivi.

pH

Le pH du milieu de fermentation est un paramètre essentiel et doit être suivi régulièrement. Il conditionne le bon fonctionnement des bactéries et notamment des méthanogènes. Le pH optimum de fonctionnement se situe autour de la neutralité entre 7 et 7,5.

La mesure du pH se fait sur un échantillon représentatif de digestat prélevé en sortie du digesteur (voir § 5.1 – Fiches pratiques). Il existe une large gamme de matériels portatifs pour réaliser cette mesure.

Une sonde pH permettant une mesure en continu peut également être mise en place au sein du digesteur. Un enregistrement continu des données permet d'obtenir un suivi plus précis de l'évolution de ce paramètre au cours des différentes phases de fonctionnement de l'unité.

Dans tous les cas, un étalonnage régulier de la sonde utilisée est nécessaire pour obtenir une valeur fiable.

Acides gras volatils (AGV)

Les AGV sont des produits intermédiaires de la fermentation. Il est important qu'ils soient formés pour permettre la production de biogaz par les méthanogènes mais ils ne doivent pas s'accumuler. Une accumulation traduit un dysfonctionnement.

Le contrôle des AGV est important lorsque le digesteur est susceptible de fonctionner avec des substrats très fermentescibles (résidus de fruits, ensilage de végétaux, déchets lipidiques etc.). Il sera nécessaire d'effectuer régulièrement une analyse. Le raisonnement de la fréquence des analyses est à réfléchir lors de la mise en place du protocole.

Leur mesure doit être effectuée sur un échantillon représentatif de digestat (voir § 5.1 – Fiches pratiques). Certains laboratoires proposent l'analyse des acides gras volatils majoritaires dans un fermenteur (acide acétique, acide propionique et acide butyrique). L'envoi de l'échantillon doit se faire dans les 24 heures après le prélèvement (voir § 5.3 – Fiches pratiques).

Pouvoir tampon ou alcalinité

Le pouvoir tampon d'un digesteur est mesuré à travers l'alcalinité du milieu et cette dernière dépend principalement de la concentration en bicarbonate. Le pouvoir tampon permet de connaître la capacité du milieu de fermentation à maintenir un pH stable autour de la neutralité.

Le suivi régulier de ce paramètre facilite l'exploitation du digesteur en prévenant les risques d'acidification.

La mesure de l'alcalinité doit se faire sur un échantillon représentatif de digestat (voir § 5.1 – Fiches pratiques). Les laboratoires d'analyses pratiquent cette mesure en routine (voir § 5.3 – Fiches pratiques).

Ammoniac

De l'ammoniac est produit au cours des étapes de réduction de la matière organique. Si sa concentration augmente au-delà de quelques g/l, il peut devenir inhibiteur de la méthanogénèse. Ce phénomène peut survenir notamment lorsque l'on utilise certains effluents ou sous-produits riches en azote (certains effluents d'élevage, certains effluents et sous-produits d'IAA etc.).

Dans ce contexte, le contrôle de l'ammoniac dans le milieu de fermentation est utile au pilotage de l'installation et au suivi des performances.

La mesure de la teneur en ammoniac doit se faire sur un échantillon représentatif de digestat (voir § 5.1 – Fiches pratiques). Les laboratoires d'analyses pratiquent cette mesure en routine (voir § 5.3 – Fiches pratiques).

☞ Matière sèche résiduelle

La mesure de la matière sèche résiduelle dans le digestat permet de suivre le fonctionnement du digesteur. En effet, la production de biogaz est la résultante de la dégradation de la matière organique, constituant principal de la matière sèche du produit ou du mélange traité. Dès lors, cette dégradation entraîne une baisse de la matière sèche dans le digestat. Ainsi, le suivi régulier de la teneur en matière sèche permet de contrôler le niveau de biodégradation et donc l'évolution du fonctionnement du digesteur.

La mesure de la matière sèche résiduelle doit se faire sur un échantillon représentatif de digestat (voir § 5.1 – Fiches pratiques). Les laboratoires d'analyse pratiquent cette mesure en routine (voir § 5.3 – Fiches pratiques).

☞ Matière organique résiduelle

La mesure de la matière organique résiduelle dans le digestat permet d'évaluer le niveau de biodégradation anaérobie de la matière organique et de calculer le rendement global de la réaction.

Cette mesure doit se faire sur un échantillon représentatif de digestat (voir § 5.1 – Fiches pratiques). Les laboratoires d'analyse pratiquent cette mesure en routine (voir § 5.3 – Fiches pratiques).

● Production de biogaz

☞ Débit de biogaz

La mesure du débit de biogaz permet de contrôler la production. C'est un paramètre indirect permettant de suivre le fonctionnement du digesteur. En effet, la diminution de la production de biogaz est un facteur d'alerte pouvant indiquer un dysfonctionnement. La mesure d'un débit de gaz est souvent délicate et demande un matériel adapté (débitmètre) et étalonné aux conditions de production.

Pour le choix du débitmètre, il faut tenir compte:

- des caractéristiques du biogaz (composition, masse volumique, température, teneur en eau, vitesse (mini et maxi), corrosif etc.) ;
- de la configuration de l'installation (pertes de charge admissibles, longueur droite de canalisation disponible, diamètre de canalisation etc.).

La pose du débitmètre doit être réalisée selon les consignes d'un spécialiste. L'idéal est que l'organe de mesure de débit soit prévu dès la construction de l'installation afin de disposer des bonnes conditions de mesure.

Le tableau suivant présente une présélection de capteurs de débit pouvant être utilisés pour la mesure de biogaz.

Tableau 2 : Type de capteurs utilisables pour la mesure de débit de biogaz

Type de capteur	Technologie utilisée	Grandeur mesurée
Mécanique	Flotteur	Débit volumique
	Hélice	Vitesse d'écoulement
Statique	Organe déprimogène	Pression différentielle
	Effet vortex	Vitesse d'écoulement
	Fil chaud	Vitesse d'écoulement
	Massique thermique	Débit massique

La majorité des débitmètres disponibles dans le commerce indique le volume écoulé par unité de temps. L'unité utilisée est généralement le Nm^3/h .

Pour cela, il est nécessaire :

- d'étalonner le débitmètre (fabricant ou fournisseur) ;
- de paramétrer correctement l'appareil de mesure (diamètre de la conduite etc.).

Le débitmètre installé doit pouvoir mesurer le débit instantané et le débit cumulé. Il est muni pour cela d'un système de mémorisation de l'information ; le relevé des données devra être adapté à la capacité de mémorisation de l'appareil.

 La mesure de la température et de la pression du biogaz dans la canalisation est indispensable à la détermination du débit normalisé.

Signalons que la mesure du débit de biogaz n'est pas obligatoire dans le cadre du contrat de vente d'électricité à l'acheteur d'énergie excepté au-delà de 5 GWh thermiques produits et valorisés par an. (Voir § 5.4 – Fiches pratiques).

Température du biogaz

La mesure de la température du biogaz permet de calculer le volume normalisé de biogaz produit. Cette mesure est généralement associée à la mesure du débit. Une sonde spécifique de type thermocouple peut être mise en place sur la canalisation de collecte de biogaz.

Pression du biogaz

Dans le cas du biogaz, à température constante, sa masse volumique est proportionnelle à la pression. Il est donc indispensable de mesurer en parallèle la pression du biogaz dans la canalisation. Cette mesure est généralement associée à la mesure du débit.

Teneur en méthane

Le méthane (CH_4) est le constituant majoritaire du biogaz (concentration pouvant aller de 50 à 75% $_{\text{v/v}}$). Lorsque la méthanisation est en régime stabilisé, la teneur en méthane est constante (faibles variations ± 1 à 2% $_{\text{v/v}}$). Dès lors, une baisse de la teneur en méthane dans le biogaz souligne généralement l'apparition d'un dysfonctionnement de l'écosystème, notamment des méthanogènes. La mesure régulière de la teneur en méthane permet de suivre le fonctionnement et indirectement de piloter l'installation.

La mesure du CH_4 doit se faire au moyen d'un analyseur spécifique (la mesure au moyen d'une cellule infrarouge est la plus adaptée à des mesures de terrain).

 La mesure du taux méthane du biogaz n'est pas obligatoire dans le cadre du contrat d'achat d'électricité issu du biogaz excepté au-delà d'une valorisation annuelle supérieure à 5 GWh thermiques issus du biogaz. (Voir § 5.4 – Fiches pratiques). Ce dernier multiplié à la production de biogaz sert à calculer le PCI du biogaz produit, sur la base de 9,96 kWh PCI/ $\text{Nm}^3 \text{CH}_4$.

Teneur en dioxyde de carbone

Le dioxyde de carbone (CO_2) est le deuxième constituant du biogaz (concentration pouvant aller de 25 à 50% $_{\text{v/v}}$).

La mesure du CO_2 peut se faire soit au moyen de tubes colorimétriques spécifiques, soit au moyen d'un analyseur spécifique (la mesure au moyen d'une cellule infrarouge est la plus adaptée à des mesures de terrain).

Il existe des appareils qui permettent d'effectuer les mesures concomitantes du CH₄ et du CO₂ dans la gamme des concentrations rencontrées dans le biogaz (mesures effectuées généralement au moyen de cellules infrarouges).

Notons qu'en première approximation, la mesure du CO₂ peut suffire au suivi de la composition du biogaz en considérant que CH₄+CO₂=100% de la composition ; connaissant la teneur en CO₂, on peut approcher celle en méthane par simple différence. La précision est de l'ordre de ±0.5% dans la mesure où les autres composés du biogaz sont généralement à des concentrations inférieures à 0,1%.

☞ Teneur en hydrogène sulfuré

Le suivi de la teneur en hydrogène sulfuré (H₂S) du biogaz est important pour garantir un bon fonctionnement des matériels de valorisation énergétique (chaudière, groupe électrogène). C'est un des critères d'application des conditions de garantie des constructeurs de matériels.

La mesure de l'H₂S peut se faire soit au moyen de tube colorimétrique spécifique, soit au moyen d'une cellule d'analyse spécifique (analyseur d'hydrogène sulfuré).

Il est possible également d'effectuer un prélèvement de biogaz dans un contenant adapté (ampoule de prélèvement, baudruche ou sac en Tedlar) et envoi à un laboratoire d'analyse spécialisé.

Signalons que certains constructeurs proposent des modules de mesure d'H₂S qui peuvent être couplés avec l'appareil d'analyse du CH₄ et CO₂. Ce type d'appareil permet d'assurer de manière concomitante les trois mesures des composants ; ce qui est très pratique pour des mesures de terrain.

☞ Teneur en autres composés

Il est toujours possible et intéressant dans certaines situations de suivre d'autres composés du biogaz. Ces analyses sont à envisager au cas par cas. Les mesures se feront par prélèvement du biogaz (ampoule de prélèvement, baudruche/sac en Tedlar) et envoi à un laboratoire d'analyse compétent. Ce type de mesure ne sera envisagé que dans le cadre d'un suivi expérimental de l'installation.

3.1.3 UF3 - Valorisation énergétique

☒ Cette UF concerne tous les équipements destinés au traitement du biogaz et à sa valorisation énergétique ; y compris la vente d'énergie à un opérateur et/ou l'autoconsommation.

☒ Les paramètres qui vont constituer le suivi de cette UF comprennent :

- Le suivi du fonctionnement des équipements de valorisation.
- Le comptage de l'énergie valorisée.

● Suivi du fonctionnement de l'équipement de valorisation du biogaz

Le suivi de fonctionnement consiste à relever les principaux paramètres de fonctionnement de l'équipement de valorisation du biogaz et à noter les éléments liés à l'entretien et/ou aux pannes de cet équipement.

☞ Volet fonctionnement

Il s'agit des paramètres suivants :

- Caractéristiques de fonctionnement (il s'agit essentiellement de décrire les caractéristiques techniques de l'installation).
- Nombre d'heures de fonctionnement.

- Nombre d'heures d'arrêt de l'installation (en distinguant les causes : entretien, panne, non disponibilité de biogaz, non disponibilité du réseau etc.).
- Analyse de l'huile de vidange.
- Autres éléments selon installation

☞ **Volet entretien/panne**

Il s'agit des paramètres suivants :

- Fréquence d'entretien (chaudière, vidange moteur).
- Pannes (descriptif, cause etc.).

Signalons que ce suivi peut être élaboré en collaboration avec l'équipementier et/ou l'entreprise de maintenance.

📖 A ce niveau, la tenue d'un registre permettant de noter les différentes interventions sur l'unité sera indispensable. Les données enregistrées serviront à établir le bilan de fonctionnement annuel et à analyser les performances obtenues, notamment en termes de rendement de valorisation d'énergie.

● **Energie produite et utilisation**

La mesure de l'énergie produite sur une installation de méthanisation est essentielle mais elle recouvre généralement plusieurs termes. Ces derniers sont définis ci-dessous et ils seront conservés tout au long du document afin d'être le plus clair possible. Le fiche pratique 5.4 fait le point sur les besoins en instrumentation imposée par la réglementation dans le cadre de contrat d'achat d'électricité.

☞ **Production de biogaz**

Le biogaz produit suit deux voies :

- Combustion en torchères, lors des arrêts techniques ou autres en cas de surproduction.
- Valorisation (combustion, cogénération)⁷.

Ainsi, trois types de paramètres existent pour caractériser la production d'électricité :

- Production de biogaz totale provenant de la fermentation.
- Production de biogaz brûlée en torchère.
- Production de biogaz valorisée.

☞ **Production d'électricité**

L'électricité produite à partir de biogaz est générée grâce à un alternateur. Celle-ci est ensuite utilisée de deux manières :

- Autoconsommée sur site notamment pour les auxiliaires (organes techniques sans lesquels l'installation de production d'électricité et de chaleur à partir de biogaz ne pourrait pas fonctionner).
- Distribuée sur le réseau de distribution et achetée dans le cadre d'un contrat d'achat d'électricité conclut avec un acheteur d'énergie.

Ainsi, trois paramètres existent pour caractériser la production d'électricité :

- Production d'électricité totale, mesurée après l'alternateur.
- Production d'électricité autoconsommée.
- Production d'électricité distribuée sur le réseau.

⁷ Les autres formes de valorisation énergétique du biogaz ne sont pas prises en compte dans cette version du guide (épuration, compression et injection dans le réseau de distribution du gaz naturel, épuration, compression et utilisation comme gaz naturel pour véhicule).

Production de chaleur

La chaleur issue du biogaz peut être utilisée de différentes manières :

- Autoconsommée sur site (chauffage digesteur, prétraitement type pasteurisation, posttraitement du digestat).
- Distribuée et valorisée (plusieurs compteurs peuvent être utiles afin de distinguer les différentes consommations : chauffage bâtiment, réseau chaleur, installation de séchage etc.).
- Perdue au travers d'aérotherme, cette chaleur ne pouvant être ni autoconsommée ni valorisée. Il est alors indispensable d'évacuer cette chaleur afin de ne pas provoquer de surchauffe du moteur.

Ainsi, plusieurs paramètres existent pour caractériser la production d'électricité :

- Production de chaleur totale, mesurée après l'alternateur.
- Production de chaleur valorisée :
 - . Production de chaleur autoconsommée pour le process (digesteur, prétraitement et posttraitement).
 - . Production de chaleur distribuée (ce paramètre peut se décliner en plusieurs sous-paramètres : production de chaleur distribuée à un tiers, production de chaleur distribuée pour le chauffage et la production d'ECS de l'exploitant etc.).
- Production de chaleur perdue.

 Les compteurs de production/utilisation d'énergie sont généralement mis en place lors de la construction de l'installation ; en outre, certains compteurs sont obligatoires dans le cadre du contrat d'achat d'électricité (Voir §Fiche pratique 5.4). Dans le cadre du suivi de l'installation, il s'agit de s'appuyer sur les données fournies par ces éléments et éventuellement de rajouter des compteurs chaleur supplémentaires selon la configuration de l'installation.

3.1.4 UF4 - Valorisation du digestat

-  Cette UF concerne l'ensemble des équipements destinés au stockage, au post-traitement et à la valorisation du digestat.
-  Les paramètres qui vont constituer le suivi de cette UF comprennent :
 - La mesure de la quantité de digestat produit.
 - Le suivi de la composition du digestat.

La valorisation du digestat peut faire l'objet d'un suivi plus ou moins précis selon le mode de post-traitement/valorisation mais aussi selon les objectifs recherchés (effet fertilisant, effets à long terme sur le sol etc.). Les éléments retenus dans ce document concernent le stockage et la valorisation par épandage sur des cultures agricoles. Si un post-traitement est réalisé, il sera nécessaire d'adapter le protocole de suivi (séparation de phase liquide/solide, post-traitement par maturation aérobie, séchage, co-compostage). Des indicateurs spécifiques au mode de post-traitement retenu seront alors à définir (par exemple dans le cas d'une séparation de phase : volume liquide, composition fraction liquide, volume et masse de solide, composition fraction solide etc.).

- **Quantité de digestat produit**

Il est nécessaire de connaître à la fois la masse et le volume de digestat produit.

On appliquera à ce niveau les moyens et les méthodes décrites en UF1.

Composition du digestat

En première approche, la composition du digestat rejoint une analyse de suivi agronomique classique de produit organique (effluents d'élevage, compost etc.) et concerne les principaux indicateurs suivants :

- Matière sèche.
- Matière organique.
- Teneur en azote total.
- Teneur en azote ammoniacal.
- Eléments totaux : phosphore, potassium, calcium, magnésium, soufre.
- pH.
- Rapport C/N.

La fréquence de cette analyse est liée à la période d'utilisation du digestat.

Ainsi, il s'agit d'effectuer une analyse de composition juste avant l'épandage du produit. L'échantillon doit être le plus représentatif possible de l'ensemble du digestat ; il faut pour cela mettre en œuvre les bonnes pratiques d'échantillonnage (voir § 5.1 – Fiche pratique). Signalons que l'arrêté d'exploitation de l'unité de méthanisation précise généralement le niveau des analyses nécessaires ainsi que la fréquence.

 D'autres paramètres peuvent être vérifiés dans le digestat, notamment si des produits exogènes sont utilisés demandant une réglementation spécifique (boue de step par exemple). Il s'agira alors de vérifier les critères d'innocuité et d'absence de composés indésirables comme par exemple :

- Eléments traces métalliques (E.T.M.)
- Composés traces organiques (C.T.O.)
- Critères microbiologiques⁸
- Inertes et impuretés : plastique, verre etc.

• Valorisation du digestat

Selon le niveau d'investigation souhaité, d'autres analyses pourront être réalisées notamment pour évaluer le degré de maturité de la matière organique du digestat : test cresson, test Rottegrad, analyse ISB (indice de stabilité biologique). De même des suivis agronomiques sur culture peuvent être envisagés.

Ces analyses et essais sont à mettre en œuvre au cas pas cas. Précisons que ce type de mesure ne sera envisagé que dans le cadre d'un suivi expérimental de l'installation.

⁸ Pour l'analyse des critères microbiologiques, il convient d'apporter un grand soin à l'échantillonnage ainsi qu'à la conservation des échantillons (contenant stérile, transport réfrigéré, réception laboratoire en moins de 24h). Les laboratoires d'analyses compétents sont à même de donner tous les renseignements utiles pour la conservation et l'envoi des échantillons.

3.1.5 UF5 - Fonctionnement général

- + Cette UF regroupe trois grands thèmes d'analyse relatifs :
 - A l'environnement et aux éventuels nuisances : intégration de l'unité dans l'environnement, acceptation sociale, impact environnemental, identification de risques de nuisances etc.
 - A l'emploi : les paramètres recueillis serviront à établir le temps de travail passé par l'exploitant du site ainsi qu'à évaluer les créations d'emplois.
 - A l'économie : bilan des investissements, bilan du plan de financement, bilan des charges et des recettes.
- + Les paramètres qui vont constituer le suivi de cette UF comprennent :
 - Les moyens humains nécessaires au fonctionnement.
 - Les matériels propres à l'installation.
 - Les données météorologiques.
 - Les équipements externes utilisés.
 - Les données économiques.

Les paramètres à suivre pour calculer ces indicateurs sont soit de type continu (relevé régulier) ou ponctuel. Ainsi pour chaque thème, les paramètres et leur mode de mobilisation sont détaillés.

- **Thème relatif à l'environnement et aux nuisances**

Les éléments recueillis permettront:

- de faire un bilan des émissions de GES intégrant les données de la production de GES générés par l'installation de méthanisation (transport de déchets exogènes et utilisation d'engins de manutention pour le fonctionnement de l'unité) et les émissions de GES évitées (substitution du biogaz à la consommation d'énergie fossile).
- d'appréhender l'intégration de l'unité dans son environnement en évaluant les risques potentiels de nuisance.

Pour établir ces bilans, plusieurs paramètres doivent être recueillis. Ils sont détaillés ci-dessous.

- ☞ **Consommation d'énergie par les matériels propres à l'installation**

Il s'agira de suivre pour chacun des matériels propres à l'installation (pompes, agitateurs, broyeur, séparateur de phase etc.) :

- Le temps d'utilisation : heures de fonctionnement.
- La consommation énergétique : compteur ou calcul approché.

📖 La plupart du temps, il s'agit de matériels fonctionnant avec des moteurs électriques. Un compteur de consommation d'électricité spécifique à l'installation peut être installé afin de comptabiliser l'énergie consommée. Cette donnée interviendra pour effectuer le bilan environnemental global de l'installation.

- ☞ **Consommation d'énergie par les matériels annexes utilisés :**

Il s'agira de suivre pour chacun des matériels annexes à l'exploitation de l'unité (tracteur, télescopique, broyeur, épandeur etc.) :

- Le temps d'utilisation : heures de fonctionnement.
- La consommation énergétique : volume de carburant ou calcul approché.

📖 Ces éléments seront pris en compte pour effectuer le bilan environnemental global de l'installation.

☞ **Acceptation sociétale et risques de nuisance**

Il s'agit de recueillir l'ensemble des éléments qui permettront d'apprécier l'intégration de l'unité de méthanisation dans son environnement, de lister les sources de nuisances potentielles et les démarches entreprises par l'exploitant afin de sensibiliser le grand public à l'intégration d'une telle unité sur un territoire.

Ils pourront être recueillis par le biais d'une enquête. Celle-ci comprendra à minima les volets suivants :

- Environnement immédiat de l'unité : le site est-il clôturé ? Le site peut-il fermer à clef ? Quel est l'environnement immédiat du site (champs, zone industrielle etc.) ? Quelle est la distance entre l'unité et le voisin le plus proche ? De quel type de voisin s'agit-il (habitation, entreprise) ? Quelle est la situation topographique du site (plaine/plateau etc.) ? Quels sont les vents dominants ? Existe-il une CLIS ? Existe-t-il une association locale contre le site ? Si oui, quel est son nom ?
- Odeurs : Avez-vous rencontré des problèmes d'odeur ? Ont-ils fait l'objet de plainte ? A quelle période correspondent-ils (dépotage des déchets etc.) ? Ces nuisances sont-elles ponctuelles ou durables ? Y a t il eu des mesures d'odeur réalisées ?
- Bruit : Avez-vous rencontré des problèmes de bruit ? Ont-ils fait l'objet de plaintes ?
- Envois : Avez-vous rencontré des problèmes d'envol de déchets ? Ont-ils fait l'objet de plaintes ?
- Transport : Avez-vous rencontré des problèmes liés à l'augmentation du trafic routier pour l'apport de déchets exogènes ? Ont-ils fait l'objet de plainte ? Quelle est l'importance de ce trafic (nombre de camions par jour ou par semaine) ? Quel est le type de camion ?
- Mesures et anticipation de l'exploitant : Afin d'anticiper d'éventuels plaintes de riverains, avez-vous pris des mesures (rencontres avec les voisins, réunions publiques, visites de site etc.) ?
- Avez-vous mis en place des visites ? Pour quelles raisons (demandes importantes, ou volonté initiale de faire connaître l'unité etc.) ?

La grille d'enquête à compléter accompagne ce guide. Elle permet en outre d'apprécier directement le risque de nuisance de l'unité (voir § 5.6 – Fiches pratiques).

Une enquête auprès de la mairie d'implantation permettra d'identifier également les éventuelles plaintes ou reproches recensés par les services communaux.

📖 Ces éléments seront pris en compte pour effectuer le bilan d'évaluation des risques de nuisance.

☞ **Données météorologiques**

Un suivi des principales données météorologiques, température et pluviométrie, permet de mieux analyser les bilans de fonctionnement de l'installation. Ces données peuvent être corrélées avec les besoins de chauffage du digesteur afin de vérifier l'isolation etc.

📖 Un équipement propre à l'installation avec un relevé des données peut être mis en place ou bien ces informations peuvent être collectées auprès de Météo France sur la station la plus proche de l'unité de méthanisation.

● **Thème relatif à l'emploi**

L'objectif des indicateurs liés à l'emploi est d'appréhender et de quantifier :

- Le temps de travail in situ lié à l'exploitation de l'unité de méthanisation.
- Le nombre d'emplois créés par la mise en place de l'unité de méthanisation.

Temps de travail in situ

On distinguera :

- Le temps nécessaire au fonctionnement (par exemple apport de matières premières, mise en route pompe d'introduction etc.) et au contrôle de l'installation (par exemple, inspection de routine, contrôle de la qualité du biogaz, contrôle du fonctionnement du groupe etc.).
- Le temps nécessaire à certaines opérations spécifiques à la conduite de l'installation (par exemple, réception/stockage d'une matière première, reprise/épandage du digestat etc.).
- Le temps nécessaire aux opérations de maintenance ou de réparation. A ce niveau, la mise en place d'un cahier de maintenance du matériel permettra de suivre toutes les interventions réalisées par l'exploitant ou par une personne extérieure sur l'installation.

 Ces éléments seront pris en compte pour effectuer le bilan de création d'emplois (voir § 5.6 – Fiches pratiques).

Création d'emplois

Les emplois liés à la création et à l'exploitation de l'unité de méthanisation, sont rattachés à trois étapes clefs du montage d'une unité de méthanisation :

- Conception.
- Construction.
- Exploitation.

Les emplois générés dans les structures d'accompagnement et administratives ne sont pas intégrés dans ce bilan, en raison de la difficulté d'évaluation. Ces emplois indirects doivent être évalués à une échelle plus large que l'unité de traitement puisqu'ils interviennent sur plusieurs sites.

Par ailleurs, à l'instar de l'analyse réalisée par le Club Biogaz dans l'étude "Emplois de la filière biogaz de 2005 à 2010", deux catégories de mission sont distinguées :

- Les missions temporaires : rencontrées essentiellement lors des phases de conception et de construction.
- Les missions permanentes : rencontrées en phase d'exploitation.

Les tableaux ci-dessous listent l'ensemble des postes pouvant faire intervenir des professionnels et les éléments à recueillir afin d'évaluer le nombre d'ETP.

Tableau 3 : Détails des postes pour évaluer les créations d'emplois temporaires

Poste	Sous-poste	Type de mission	Temps passés (j)
Conception	Bureau d'études voire développeur (études de faisabilité)	Temporaire	
	Bureau de conseils (financement, montage juridique etc.)	Temporaire	
	Assistance à maîtrise d'ouvrage	Temporaire	
	Maître d'œuvre	Temporaire	
Construction	Entreprises Terrassement	Temporaire	
	Voiries réseau de distribution	Temporaire	
	Equipementier process méthanisation	Temporaire	
	Equipementier process épuration	Temporaire	
	Motoriste	Temporaire	
	Maçon/construction	Temporaire	
	Coordinateur SPSP	Temporaire	

Tableau 4 : Détails des postes pour évaluer les créations d'emplois permanents

Poste	Sous-poste	Type de mission	Heures/an
Exploitation	Suivi et fonctionnement quotidiens (exploitation, visites etc.)	Permanent	
	Maintenance moteur	Permanent	
	Prétraitement des substrats (déconditionnement etc.) sur sites externes	Permanent	
	Transport des substrats	Permanent	
	Transport du digestat	Permanent	
	Centre de gestion	Permanent	
	Laboratoires d'analyses	Permanent	

 Ces éléments seront pris en compte pour effectuer le bilan de création d'emplois (cf § 5.6.2 - Fiches pratiques).

- **Thème lié à l'analyse économique**

Le volet économique est primordial pour apprécier le bon fonctionnement d'une unité de méthanisation. A ce titre, plusieurs indicateurs mesurant la santé économique et financière de l'installation peuvent être calculés. Leur calcul dépend de différents éléments qu'il conviendra de recueillir auprès de l'exploitant. Une méthodologie est proposée pour établir le bilan économique de l'installation; ceci afin d'utiliser la même démarche sur les différents sites pour obtenir des résultats finaux comparables entre eux.

 **Objectif**

L'objectif recherché consiste à réaliser un bilan économique de l'installation en fonctionnement. Pour cela il est nécessaire dans un premier temps de collecter les différentes informations économiques relatives :

- Au détail des investissements et au plan de financement,
- Au bilan d'exploitation dont :

- . les charges comprenant les charges fixes (annuités d'amortissement, frais financiers, provisions pour renouvellement, taxes, impôts, assurances) et les charges d'exploitation.
- . les recettes liées à l'activité de méthanisation.

☞ **Données à relever**

→ *Les postes liés à l'investissement*

Pour arriver à bien comprendre la décomposition des investissements, il est préférable de regrouper les différents postes en fonction du découpage de l'installation en Unités Fonctionnelles. Le tableau ci-dessous recense les postes 21 principaux postes de dépenses d'une unité de méthanisation.

Tableau 5 : Postes concernés par le bilan des investissements⁹

Principaux postes	Détail des postes
Catégorie A	Site
poste 1	Terrain et aménagements
Catégorie B	Substrat
poste 3	Réception et gestion
poste 4	Incorporation des substrats
poste 5	Traitement des substrats
Catégorie C	Digestion
poste 6	Cuve d'hydrolyse
poste 7	Digesteur
poste 8	Post-digesteur
poste 9	Stockage digestat
Catégorie D	Digestat (hors stockage)
poste 10	Gestion digestat
poste 11	Traitement du digestat
Catégorie E	Biogaz
poste 12	Gestion biogaz
poste 13	Epuración (de base)
Catégorie F	Valorisation
poste 14	Cogénération
poste 15	Chaudière (valorisation thermique seule)
poste 16	Valorisation électricité
poste 17	Valorisation chaleur
poste 18	Automatismes, sécurité et garantie de production
Catégorie G	Ingénierie
poste 19	Etudes
poste 20	Dossiers, Autorisations
poste 21	Investissements immatériels

D'autres postes liés à des investissements spécifiques peuvent être créés au niveau des différentes unités fonctionnelles.

⁹ Tableau élaboré à partir de l'étude ADEME : « Expertise de la rentabilité des projets de méthanisation rurale », Solagro et al., 2010 et de différentes grilles d'analyses de projets de méthanisation (notamment la grille élaborée par AILE et l'ADEME Bretagne).

Chaque poste identifié est constitué d'un ensemble de lots regroupant des investissements de même nature ou bien participant à la réalisation d'un équipement bien identifié. La définition des lots est laissée à l'appréciation de la personne en charge de l'analyse économique du projet. A minima, il convient de dissocier le gros œuvre des investissements matériels, les durées d'amortissement considérées étant différentes (tableau 10).

→ *Les charges*

Les charges sont à considérer au cas par cas sur une durée identifiée de fonctionnement de l'installation (en principe une année calendaire).

On distingue deux grandes familles de charges :

- Les charges d'exploitation ou charges décaissées regroupant les charges proportionnelles à la production de l'installation (charges variables) et les charges fixes d'exploitation,
- Les autres charges fixes non décaissées exceptées les impôts sur le revenu ou sur les sociétés.

Le tableau suivant est une proposition de trame de recueil et d'organisation des données regroupant les charges réelles constatées par grand domaines de fonctionnement et d'exploitation.

Tableau 6 : Détail des postes de charges

Type de charges		Postes de charges détaillés	
Charges d'exploitation	Charges variables d'exploitation	Gestion des substrats	Transport
			Achat de substrats
			Analyses
			Frais de traitement
		Productions/achat de cultures	Cultures intermédiaires
			Cultures dédiées
		Gestion de digestats	Epanchage
			Transport
			Analyses matières "classiques"
			Analyses bactériologiques
	Autres analyses		
	Maintenance	Frais de traitement	
		Unité de valorisation (cogé, chaudière...)	
	Consommables	Process de méthanisation <i>hors moteur</i>	
		Electricité	
Charbon actif			
Fioul <i>pour cogé dual</i>			
Produits pour unité de traitement			
Charges fixes d'exploitation	Autres		
	Main d'œuvre		
	Assurances		
	Autres(frais de gestion etc.)		
Autres charges fixes	Taxes (taxe foncière, contribution économique territoriale, contribution sociale et solidaire des entreprises)		
	Impôts sur le revenu ou sur les sociétés		
	Provision renouvellement, maintenance gros entretien		
	Amortissements		
		Frais financiers ou intérêts d'emprunt	

→ *Les recettes*

Les recettes dépendent de la situation opérationnelle de l'unité de méthanisation. On peut les classer en deux grandes catégories : les recettes liées à l'activité de service (traitement déchets, séchage de produits divers etc.) et les recettes liées à la vente de produits (énergie, engrais, amendement etc.)

De la même manière que pour les dépenses, il s'agira dans un premier temps de recueillir l'ensemble des données auprès du gestionnaire d'exploitation. Pour cela on pourra s'appuyer sur la grille de relevé suivante.

Tableau 7 : Détail des postes de recettes

Principaux postes de recettes	Postes détaillés
Traitement substrats (redevance)	Déchets agricoles y.c. lisier
	Déchets d'industries
	Déchets de collectivités
Vente d'électricité	Tarif de base
	Prime à la valorisation énergétique
	Prime aux effluents d'élevage
Vente de chaleur	
Economies d'énergie	
Economies d'engrais	
Vente de matières	Vente de concentrat
	Vente de digestat sec
Autres produits	

☞ **Moyens de relevé**

Pour obtenir l'ensemble des données, on pourra s'appuyer sur le modèle de grille de relevé des indicateurs économiques (voir Fichier Excel - Tableur économique joint au guide de suivi).

Au niveau de l'enregistrement et du recueil de données, il est important de considérer séparément les deux aspects de l'analyse économique (capex et opex) afin de permettre une analyse pertinente au moment de l'investigation, de la situation économique d'exploitation.

3.2 Organisation du suivi

3.2.1 Rédaction d'un protocole

La mise en place d'un suivi de fonctionnement de l'installation de méthanisation passe par la rédaction d'un protocole qui a pour objectif de détailler le contenu technique de l'opération de suivi. Le protocole est adapté par l'exploitant à son unité de méthanisation en tenant compte d'une part, des spécificités de son installation et d'autre part, des bonnes pratiques décrites dans ce guide méthodologique. Dans le document "protocole", il s'agira notamment de préciser les aspects suivants :

- Le descriptif de l'installation : une fiche technique décrivant le principe de fonctionnement de l'installation, les principaux équipements (notamment ceux liés à la valorisation énergétique etc.), les données économiques (investissement etc.) etc.
- Les moyens mis en œuvre : l'instrumentation en place, les points de mesure, les paramètres mesurés etc.
- La nature et le rythme des relevés des différents paramètres etc..
- Les analyses prévues : nature, fréquence, nombre etc.

Ce document est annexé au classeur de suivi de l'installation.

 Il est indispensable de disposer du protocole pour permettre une analyse des résultats et l'établissement des bilans de fonctionnement de l'installation.

3.2.2 Moyens de mesure

Les moyens à mettre en œuvre pour mesurer les différents paramètres sont variables selon le type d'installation. On distingue cependant les principaux moyens suivants :

- Pour la mesure de quantité¹⁰ :
 - . des pesons, des balances ou autres pour la mesure de substrats solides (fumier, tontes, digestat etc.)
 - . des débitmètres ou autres système pour les substrats liquides.
- Pour la mesure de la température interne au(x) digesteur(s) des sondes de type thermocouple.
- Pour la mesure du pH, un pHmètre.
- Pour la mesure de la quantité de biogaz, un débitmètre.
- Pour le contrôle de la composition du biogaz (CH₄, CO₂, H₂S), un analyseur infrarouge ou des tubes colorimétriques.
- Pour contrôler la production d'énergie : un compteur électrique et un (des) compteur(s) thermique(s).
- Pour le relevé des conditions extérieures : thermomètre, pluviomètre etc.
- Pour le contrôle du temps de travail : montre, chronomètre etc.

¹⁰ Il peut s'agir des substrats mais aussi du digestat.

Tableau 8 : Principales informations sur les paramètres à mesurer par unité fonctionnelle

UF	Paramètre	Unité	Moyen d'obtention de la valeur ¹¹	Fréquence de relevé
UF1 : réception & transformation matière première	Quantité (<i>mesure à effectuer pour chaque substrat</i>)	m ³ & tonne	Pesons, débitmètre, protocole adapté	A chaque nouveau substrat ou changement d'alimentation
	Composition (<i>mesure à effectuer pour chaque substrat</i>)	Selon valeur mesurée	Echantillon et analyse laboratoire	
	Potentiel méthanogène (<i>mesure à effectuer pour chaque substrat</i>)	Nm3CH ₄ /tMO	Echantillon et analyse laboratoire	
UF2 : digesteur	Quantité mélange entrant	m ³ et/ou tonne	Pesons, débitmètre, protocole adapté	2 fois par an ou à chaque changement de mélange
	Structuration du mélange	% de chaque produit	Selon configuration installation	
	Composition biochimique du mélange	Selon valeur mesurée	Echantillon et analyse laboratoire	
	Température	°C	Sonde de type thermocouple	Mini 1x/jour
	pH	Unité pH	pHmètre	1 à 5x/sem
	AGV (optionnel)	g/l eq. ac. acétique	Echantillon et analyse laboratoire	Si problème fonctionnement ou suivi expérimental : 1 à 3x/sem
	Taux d'alcalinité (TAC) (optionnel)	g/l eq. HCO ₃	Echantillon et analyse laboratoire	Si problème fonctionnement ou suivi expérimental : 1 à 3x/sem
	Matière sèche résiduelle	%/MB	Echantillon et analyse laboratoire	2 fois par an ou à chaque changement de mélange
	Matière organique résiduelle	%/MB	Echantillon et analyse laboratoire	
	Débit de biogaz	Nm 3/h	Débitmètre étalonné	En continu
	Teneur en CH ₄ et CO ₂	% (v/v)	Analyseur infrarouge, tubes colorimétriques	Quotidien
Teneur en H ₂ S	ppm	Analyseur dédié, tube colorimétrique	1 à 3x/sem	

¹¹ Est signalé la méthode recommandée à mettre en œuvre.

UF	Paramètre	Unité	Moyen d'obtention de la valeur ¹²	Fréquence de relevé
UF3 : valorisation de l'énergie	Fonctionnement général de l'installation	Selon paramètre	Selon installation	1x/sem
	Energie électrique	kWh	Compteur électrique normalisé (instantané et cumulé)	1 à 7xsem
	Energie thermique	kWh	Compteur thermique normalisé (instantané et cumulé)	1 à 7xsem
	Qualité huile moteur	Selon paramètre	Echantillon et analyse laboratoire	Selon moteur
UF4 : valorisation du digestat	Quantité (<i>mesure à effectuer pour chaque substrat</i>)	m ³ & tonne	Pesons, débitmètre, protocole adapté	Mini 2x/an
	Composition (<i>mesure à effectuer pour chaque substrat</i>)	Selon valeur mesurée	Echantillon et analyse laboratoire	
UF5 : fonctionnement général	Nuisances/Environnement	-	Enquête	Une fois
	Données météorologiques	°C, mm	Thermomètre, pluviomètre	Quotidien
	Création d'emplois (temporaire)	Heures ou jours	Enquêtes/factures	Une fois
	Temps de travail - Permanent in situ/prestation pour chaque opération	Heures	Montre/chronomètre	A chaque opération : suivi, maintenance, fonctionnement
	Autres matériels	Selon travail réalisé	Selon matériel	A chaque opération
	Bilan des investissements	Euros HT	Exploitant ou Financeurs	1 fois
	Plan de financement	Euros HT	Exploitant	1 fois
	Bilan des charges	Euros HT	Bilan comptable	1 fois
	Bilan des recettes et des économies	Euros HT	Bilan comptable	1 fois

¹² Est signalé la méthode recommandée à mettre en œuvre

Certains outils métrologiques nécessitent une vérification annuelle complète et un étalonnage régulier (1 fois tous les 1 à 2 mois) tels que les analyseurs biogaz.

Signalons également que dans le cadre du contrat de vente d'électricité à l'acheteur d'énergie, des points techniques sont à respecter sur les appareils de mesure : inviolabilité des chaînes de mesures, utilisation de matériels normés, vérification des appareils de mesure une fois par an et par un tiers, ce tiers devant être un organisme agréé.

 Les moyens de mesure doivent être réfléchis au moment de la définition du protocole. La description de ces moyens doit être faite dans le document protocole ainsi que les méthodes de mesures, d'étalonnage et de contrôle des appareils.

3.2.3 Enregistrement du fonctionnement

- **Paramètres enregistrés**

Selon le paramètre mesuré, la méthode d'enregistrement va être différente ; on peut ainsi dégager 3 cas de figure :

- Le paramètre nécessite une mesure en continue : c'est le cas du débit de biogaz qui nécessite la mise en place d'un appareil de mesure en continu avec un système de comptage/totalisateur permettant d'afficher le débit cumulé. C'est le cas également de l'énergie produite et distribuée (chaleur et électricité).
- Le paramètre ne présente pas de variation rapide : c'est par exemple le cas de la température du digesteur qui normalement ne varie pas fortement au cours du fonctionnement (sauf incident). La mesure de ce paramètre ne nécessite pas un enregistrement en continu avec une fréquence rapide ; un relevé quotidien est la plupart du temps suffisant.
- Le paramètre varie ponctuellement : c'est par exemple le cas du mélange entrant dans le digesteur qui ne varie pas (ou avec une amplitude faible) dans sa composition tant que les mêmes substrats en quantités identiques sont utilisés. Une mesure de la composition du mélange sera faite avec un pas de temps plus ou moins espacé selon la précision de suivi souhaitée.

Ainsi, on pourra faire appel à différents moyens pour assurer le relevé et l'enregistrement des données de fonctionnement de l'installation :

- Un enregistrement automatique : dans le cas d'une mesure en continu, un système d'enregistrement des données devra être mis en place (de type « data logger »). Il existe différents systèmes plus ou moins élaborés permettant d'enregistrer et de stocker les informations données par un capteur (débitmètre, compteur énergie etc.). Il sera nécessaire cependant de pouvoir récupérer les données enregistrées régulièrement avec un matériel informatique pour libérer la mémoire de stockage des appareils d'enregistrement.
- Un relevé manuel : certains paramètres peuvent être relevés régulièrement par l'exploitant et notés sur une fiche de suivi (cf § 5.5 - Fiches pratiques).

- **Phases de fonctionnement**

Le type de mesure ainsi que la fréquence d'enregistrement vont dépendre également de la phase de fonctionnement du digesteur.

Schématiquement, on peut distinguer deux types de période dans le fonctionnement d'une unité de méthanisation :

- **Une période de fonctionnement stabilisé** : elle correspond à un fonctionnement quotidien régulier et reproductible du digesteur. Il s'agit au cours de cette phase de suivre les différents paramètres avec une fréquence régulière correspondant à la précision du suivi souhaité. Ainsi, la mesure de certains paramètres peut être espacée dans le temps comme : la composition du biogaz, la mesure du pH, la composition du digestat etc. Par contre d'autres paramètres comme le débit de biogaz, la production d'énergie (électricité, chaleur) etc., seront enregistrés en continu. C'est sur cette période que seront calculés les rendements de production d'énergie et établis les bilans de fonctionnement de l'installation.
- **Une période de transition** : au cours de cette période des variations importantes des paramètres de fonctionnement peuvent apparaître pour diverses raisons : un changement de substrat, une montée en charge etc.. Ces périodes correspondent à des adaptations du fonctionnement de l'installation (plusieurs périodes de transitions peuvent être réalisées au cours d'une année de fonctionnement). Au cours de ces périodes, il est intéressant de suivre de manière plus précise certaines valeurs comme : le débit instantané de biogaz, la teneur en méthane dans le biogaz, les variations du pH (si possible des AGV et du TAC qui sont des indicateurs plus précis et précurseurs d'un changement de pH) etc. Ces informations sont utiles pour mieux appréhender le fonctionnement du digesteur ; elles relèvent cependant d'un suivi de type complet ou expérimental. Les performances obtenues au cours de ces périodes ne sont pas à considérer de la même façon que celles obtenues au cours d'une période stabilisée. Elles rentreront dans l'analyse globale annuelle du fonctionnement de l'installation mais pas dans les calculs de rendement de production d'énergie.

 Signalons que nous ne considérons pas à ce niveau la phase de démarrage du digesteur qui nécessite le plus souvent un suivi plus précis du fonctionnement biologique en fonction de la charge organique appliquée pour pouvoir établir un bilan précis de la montée en charge du réacteur. La méthodologie proposée peut néanmoins tout à fait être appliquée et permettra de dégager les indicateurs de fonctionnement et de performances.

Notons également que dans le cas d'un digesteur en fonctionnement discontinu, il faudra distinguer les 4 phases suivantes dans le suivi :

- phase de remplissage du réacteur (il s'agira essentiellement de mesurer les déchets utilisés et le temps de travail),
- phase de démarrage de la production de biogaz (une durée est nécessaire après la fermeture du réacteur pour la mise en place de la fermentation ; les premiers m³ de biogaz ne sont généralement pas valorisés),
- phase stabilisée (la production de biogaz est constante et stable en volume et en composition),
- phase de décroissance de la production (le débit de biogaz diminue progressivement jusqu'à l'arrêt du réacteur par l'exploitant).

3.2.4 Analyse des données

- « Unité de base »

Pour l'analyse des données de fonctionnement, il est nécessaire de définir une « unité de base » qui correspond à une période de fonctionnement de l'installation de méthanisation. Ainsi, nous considérons la semaine comme « unité de base » de fonctionnement pour effectuer une analyse des performances de l'installation de méthanisation¹³. A partir des différents relevés, on cherchera alors à déterminer les performances hebdomadaires. Le fait d'utiliser la semaine comme unité de base pour l'analyse des performances de fonctionnement permet d'obtenir des valeurs moyennes et de lisser les fluctuations quotidiennes liées souvent aux conditions d'exploitation de l'unité.

Donnons deux exemples :

- Exemple 1 : calcul de la productivité ou rendement biologique. L'installation est alimentée 5 jours par semaine. Un débitmètre permet la mesure cumulée du biogaz. La productivité va être calculée de la manière suivante : volume de biogaz cumulé sur la semaine/ somme des tonnages introduits pendant les 5 jours de la semaine.
- Exemple 2 : calcul de la charge organique (CO) introduite sur une période dans le digesteur de 1 500 m³. L'introduction se fait 5 jours par semaine (du lundi au vendredi) à raison de 35 m³/jour d'un mélange de sous-produits à 12,7% de MO. La charge organique hebdomadaire du digesteur est calculée de la manière suivante ((35 000x0,127)x5/7)/1500, soit une CO de 2,12 kgMO/m³.j.

- Période de fonctionnement

Pour l'analyse des données, il sera également nécessaire de considérer une période correspondant à des conditions identiques de fonctionnement de l'installation. Il sera alors possible de calculer les performances moyennes et d'effectuer une analyse du fonctionnement de la période considérée.

Les différents indicateurs des bilans de suivi (voir chapitre suivant) seront ainsi calculés pour chaque période identifiée (moyenne et écart type).

Un bilan annuel de fonctionnement pourra être ensuite établi.

¹³ Signalons que ce formalisme est classiquement utilisé dans les différentes publications relatives aux performances d'installation de méthanisation.

3.3 Spécificités de chaque installation

3.3.1 Connaissances élémentaires

Quel que soit le procédé de méthanisation (continu, piston, discontinu, infiniment mélangé..), la méthodologie de suivi reste identique. Elle restera également identique quels que soient les substrats utilisés et le mode de valorisation de l'énergie. Deux types de caractéristiques seront identifiés :

- Les principaux paramètres de fonctionnement :
 - . Charge massique.
 - . Charge organique.
 - . Temps de séjour.
 - . Température.
 - . pH.
 - . Autres paramètres décrits dans les chapitres précédents etc.
- Les rendements calculés à partir des données issues du suivi :
 - . Production de biogaz.
 - . Potentiel méthanogène.
 - . Rendement de biodégradation.
 - . Rendement volumique.
 - . Teneur en méthane.
 - . Taux de valorisation énergétique.
 - . Autres paramètres décrits dans les chapitres précédents etc.

3.3.2 Principales spécificités technologiques

Selon le type d'installation de méthanisation, différentes spécificités seront à prendre en compte pour la mise en place d'un suivi et la validation du protocole.

Sans pouvoir être exhaustif, nous décrirons les principales spécificités technologiques :

- Le procédé de méthanisation :
 - . Continu/discontinu : la plupart des installations sont pour l'instant construites en système continu et comprennent un ou plusieurs digesteur/fosse. Une description précise du fonctionnement des flux est chaque fois indispensable afin, d'une part, de positionner correctement les différents points de relevé et d'autre part, de considérer les bons paramètres de fonctionnement pour établir les bilans de fonctionnement et de performances (volumes des cuves en jeu, temps de séjour digesteur etc.). Lorsqu'il s'agit d'une installation en discontinu, un protocole adapté au rythme de remplissage/ fermentation/ vidange des digesteurs est nécessaire. Des exemples sont donnés dans le chapitre 5 (point 5.5 - Fiches pratiques) de ce guide.
 - . Infiniment mélangé/piston : il s'agira essentiellement de tenir compte des périodes de fonctionnement pour effectuer les bons prélèvements pour l'analyse des digestats.

- Le prétraitement des matières premières :

Lorsqu'il existe en amont de l'étape de fermentation, il est intéressant d'en mesurer les performances (traitement thermique, traitement enzymatique (ensilage par exemple) etc.) et les éventuelles modifications de la matière première (pertes de matière organique, "déstructuration" des fibres végétales etc.). Ces éléments seront importants à considérer pour l'analyse des performances de l'étape de méthanisation.

- Le post-traitement du digestat :

Les caractéristiques de cette étape, lorsqu'elle est présente, doivent être connues pour établir les bilans de masse et les flux d'éléments fertilisants (si séparation de phase par exemple). L'analyse de la qualité du produit final sera également à raisonner au regard du post-traitement appliqué (maturation aérobie, co-compostage etc.).

3.3.3 Autres spécificités

Selon la configuration de l'unité de méthanisation, le protocole de suivi devra être adapté aux autres spécificités de l'installation. Sans être exhaustive, la liste suivante présente différents aspects à prendre en compte :

- Choix d'organisation : moyen humain disponible pour assurer le suivi.
- Sous-traitance : si de la sous-traitance est envisagée pour assurer l'exploitation, il sera nécessaire de valider le protocole avec les opérateurs de l'installation et de l'adapter si nécessaire.
- Niveau d'instrumentation: il est possible que le constructeur ait déjà prévu certains matériels et relevés, il s'agira de vérifier la pertinence de ces derniers afin d'estimer s'ils correspondent à des paramètres décrits dans ce guide méthodologique.

D'autres aspects peuvent être pris en compte dans le cadre de la mise en place du protocole selon les configurations de chaque site.

3.4 Spécificités selon le niveau de suivi

Comme présenté précédemment, différents niveaux de suivi sont envisageables : suivi simplifié, suivi complet, suivi expérimental. La synthèse présentée dans le tableau suivant a pour objet de lister les paramètres relevés à chaque niveau de suivi ainsi que l'instrumentation mise en jeu.

Tableau 9 : Paramètres relevés selon le niveau de suivi

UF	Paramètre	Moyen d'obtention de la valeur ¹⁴	Fréquence de relevé	Niveau de suivi		
				Simplifié	Complet	Expérimental
UF1	Quantité*	Pesons, débitmètre, protocole adapté	A chaque nouveau substrat ou changement d'alimentation		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Composition*	Echantillon et analyse laboratoire			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Potentiel méthanogène*	Echantillon et analyse laboratoire			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
UF2	Quantité mélange entrant	Pesons, débitmètre, protocole adapté	2 fois par an ou à chaque changement de mélange	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Structuration du mélange	Selon configuration installation				<input checked="" type="checkbox"/>
	Composition biochimique du mélange	Echantillon et analyse laboratoire		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Température	Sonde de type thermocouple	Mini 1fois/sem. à 1fois/jour	<input checked="" type="checkbox"/> 1*/sem.	<input checked="" type="checkbox"/> 1*/jour	<input checked="" type="checkbox"/> 1*/jour
	pH	pHmètre	1 à 5 fois/sem.		<input checked="" type="checkbox"/> 1*/sem.	<input checked="" type="checkbox"/> 5 */sem.
	Acides gras volatils	Echantillon et analyse laboratoire	Si problème de fonctionnement ou suivi expérimental : 1 à 3 fois/sem.			<input checked="" type="checkbox"/>
	Alcalinité	Echantillon et analyse laboratoire	Si problème de fonctionnement ou suivi expérimental : 1 à 3 fois/sem.			<input checked="" type="checkbox"/>
	Matière sèche résiduelle	Echantillon et analyse laboratoire	2 fois par an (analyse digestat) ou à chaque changement de mélange		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> 5 */sem.
	Matière organique résiduelle	Echantillon et analyse laboratoire			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> 5 */sem.
	Débit de biogaz	Débitmètre étalonné	En continu		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Teneur en CH ₄ et CO ₂	Analyseur infrarouge, tubes colorimétriques	Quotidien		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Teneur en H ₂ S	Analyseur dédié, tube colorimétrique	1 à 3 fois/sem.		<input checked="" type="checkbox"/> 1*/sem.	<input checked="" type="checkbox"/> 3*/sem.	

*Mesure effectuée pour chaque substrat

¹⁴ Est signalé la méthode recommandée à mettre en œuvre.

UF	Paramètre	Moyen d'obtention de la valeur ¹⁵	Fréquence de relevé	Niveau de suivi		
				Simplifié	Complet	Expérimental
UF3	Fonctionnement général de l'installation	Selon installation	1fois/sem.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Energie électrique	Compteur électrique normalisé (instantané et cumulé)	1 à 7 fois/sem.	<input checked="" type="checkbox"/> 1*/sem.	<input checked="" type="checkbox"/> 1*/sem.	<input checked="" type="checkbox"/> 7*/sem.
	Energie thermique	Compteur thermique normalisé (instantané et cumulé)	1 à 7fois/sem.	<input checked="" type="checkbox"/> 1*/sem.	<input checked="" type="checkbox"/> 1*/sem.	<input checked="" type="checkbox"/> 7*/sem.
	Qualité huile moteur	Echantillon et analyse laboratoire	Selon moteur		<input checked="" type="checkbox"/> 1fois/an	<input checked="" type="checkbox"/> 300 à 400 h
UF4	Quantité	Pesons, débitmètre, protocole adapté	Minimum moment au de du		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Composition	Echantillon et analyse laboratoire	l'épandage digestat	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
UF5	Nuisances/ Environnement	Enquête	1 fois/suivi	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Données météorologiques	Thermomètre, pluviomètre	Quotidien			<input checked="" type="checkbox"/>
	Création d'emplois (temporaire)	Enquêtes/factures	1 fois/suivi		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Temps de travail - Permanent in situ/prestation pour chaque opération	Montre/chronomètre	A chaque opération : suivi, maintenance, fonctionnement		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Autres matériels	Selon matériel	A chaque opération		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Fonctionnement général de l'installation	Avis de l'opérateur	A chaque observation ou problème	<input checked="" type="checkbox"/> 1*/mois	<input checked="" type="checkbox"/> 1*/sem.	<input checked="" type="checkbox"/> quotidien
	Bilan des investissements	Exploitant ou Financeurs	1 fois/suivi	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Plan de financement	Exploitant	1 fois/suivi	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Bilan des charges	Bilan comptable	1 fois/suivi	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Bilan des recettes et des économies	Bilan comptable	1 fois/suivi	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

¹⁵ Est signalé la méthode recommandée à mettre en œuvre.

4. Bilans de suivi

La mesure des différents paramètres a pour objectif d'établir des bilans de fonctionnement de l'installation à partir d'indicateurs communs à différentes unités.

On distingue quatre types de bilan :

- Un bilan technique s'appuyant sur des indicateurs biologiques, d'une part, techniques, d'autre part.
- Un bilan énergétique visant à évaluer les performances du dispositif de valorisation du biogaz.
- Un bilan environnemental afin de déterminer l'impact de l'unité de méthanisation en termes de réduction des gaz à effet de serre et d'efficacité énergétique.
- Un bilan économique pour déterminer la rentabilité de l'unité.

4.1 Bilan technique

Dans le bilan technique, on intègre deux types d'indicateurs :

- **Les indicateurs biologiques** relatifs aux performances de production de biogaz et de dégradation de la matière en digestion. On retrouve ainsi le rendement matière, le taux de dégradation de la matière organique, le rendement biologique, le bilan physico-chimique et le taux de minéralisation de l'azote.
- **Les indicateurs techniques** relatifs aux temps de travail humain et matériel dédiés au fonctionnement de l'installation, les indicateurs de dimensionnement d'une installation (rendement technologique), les indicateurs relatifs au fonctionnement de l'installation (temps de séjour ou temps de rétention hydraulique, la charge spécifique).

4.1.1 Indicateurs biologiques

Sept indicateurs biologiques permettent une analyse du fonctionnement d'une unité de méthanisation.

Indicateur	Rendement matière (Rm)
Intérêt	Il permet de mesurer la production de digestat à partir d'une quantité connue de substrats traités.
Unité	Le rendement matière (Rm) s'exprime en %
Expression	$Rm = \text{Tonnage sortant digestat} / \text{Tonnage entrant mélange} * 100$
Variables de calcul	Tonnage entrant mélange (tMB) Tonnage sortant du digestat (tMB)
Spécificité liée au procédé	Pour les procédés à alimentation discontinue, les mesures doivent être réalisées sur le même digesteur et le même chargement afin d'obtenir des données exploitables. Pour les procédés à alimentation continue, les mesures sont réalisées sur un pas de temps donné (ex : temps de rétention hydraulique)

Indicateur	Taux de dégradation de la matière organique (Td)
Intérêt	Il permet de mesurer la quantité de matière organique dégradée pendant la digestion. Il est également appelé "taux d'épuration". C'est un indicateur de traitement. Il a une influence sur la production de biogaz.
Unité	Le taux de dégradation (Td) s'exprime en %
Expression	$Td = (\text{Tonnes de matière organique du mélange entrant} - \text{Tonnes de matière organique du digestat}) / \text{Tonnes de matière organique du mélange entrant} \times 100$
Variables de calcul	Teneur en matière organique du mélange (tMO/tMS) Teneur en matière organique du digestat (tMO/tMS)
Spécificité liée au procédé	Pour les procédés à alimentation discontinue, les mesures doivent être réalisées sur le même digesteur et le même chargement afin d'obtenir des données exploitables.
Remarque :	Dans le cas de matières organiques « propres » (i.e. non souillées par des indésirables, exple. Plastiques), on assimilera la MO à la mesure faite par perte au feu (calcination).

Indicateur	Rendement biologique (Rb) ¹⁶
Intérêt	Le rendement biologique permet de mesurer la quantité de biogaz produit au cours de la digestion. Il est également appelé rendement de transformation des déchets ou encore production spécifique. Il peut être exprimé également à partir de la production de méthane.
Unité	Le rendement biologique (Rb) s'exprime en Nm ³ biogaz/t MO ou en Nm ³ CH ₄ /t MO
Expression	$Rb = \text{Production de biogaz (Nm}^3\text{)} / \text{Tonne de MO du mélange}$ ou $Rb = (\text{Prod.de Biogaz} * \text{Teneur en CH}_4) / \text{Tonne de MO du mélange}$
Variables de calcul	Tonne de MO du mélange Production de biogaz (Nm ³) Teneur en CH ₄ (%)
Spécificité liée au procédé	-

Indicateur	Taux d'expression du potentiel méthanogène (Tpm)
Intérêt	Cet indicateur permet de rendre compte de la part du potentiel méthanogène théorique réellement exprimé en conditions réelles d'exploitation.
Unité	Le taux d'expression du potentiel méthanogène (Td) s'exprime en %
Expression	$Tpm = \text{Production de biogaz réelle (Nm}^3\text{)} / \text{Production de biogaz théorique (Nm}^3\text{)} \times 100$
Variables de calcul	Production de biogaz réelle (Nm ³) mesurée par un débitmètre ou à défaut estimée à partir de la production d'énergie utile tenant compte des rendements de transformation Production de biogaz théorique (Nm ³) estimée à partir d'analyse laboratoire (BMP) voire de données bibliographiques
Spécificité liée à	En raison de l'hétérogénéité des coproduits et des précisions des

¹⁶ Ou rendement biogaz ou encore potentiel méthanogène (lorsque la valeur est exprimée en Nm³CH₄/TMO)

l'indicateur	mesures (potentiel méthane et débit/qualité biogaz), l'indicateur Tpm doit se situer dans une fourchette de plus ou moins 20%
--------------	---

Indicateur	Bilan physico-chimique
Intérêt	<p>Le bilan physico-chimique permet de caractériser l'évolution des matières premières au cours de la digestion et notamment des concentrations en :</p> <ul style="list-style-type: none"> - éléments fertilisants ; - éléments traces métallique ; - éléments pathogènes. <p>Il ne constitue pas réellement un indicateur tel que défini précédemment. Toutefois, c'est un outil intéressant notamment pour comparer les caractéristiques du digestat par rapport aux normes en vigueur pour les amendements et fertilisants organiques (NFU 44 051, NFU 42 001). Les éléments nécessaires à la réalisation de ce bilan sont issus d'analyses réalisées sur le mélange entrant en digestion et sur le digestat.</p>
Unité	<p>en g/kg de MS ou MB (composition biochimique) Unités/g MB (micro-organismes et pathogènes)</p>
Expression	<p>Composition biochimique et microbiologique du mélange Composition biochimique et microbiologique du digestat Composition en ETM/CTO/CVO/Inertes du digestat ISB/CBM du digestat</p>
Variables de calcul	-
Spécificité liée au procédé	-

Indicateur	Taux de minéralisation de l'azote (TmN)
Intérêt	<p>La méthanisation permet de minéraliser l'azote et de le rendre ainsi plus facilement disponible pour les plantes. Il est donc intéressant de mesurer le taux de minéralisation de l'azote au cours de la digestion.</p>
Unité	<p>Le taux de minéralisation de l'azote (TmN) s'exprime en %</p>
Expression	<p>$Tm = \frac{\text{Teneur en } NH_4 \text{ digestat} - \text{Teneur en } NH_4 \text{ entrant}}{\text{Teneur en azote organique entrant}} \times 100$</p>
Variables de calcul	<p>Teneur en Azote ammoniacal du mélange entrant (g/kg MS) Teneur en Azote ammoniacal du digestat (g/kg MS) Teneur en N organique entrant (g/kg MS)</p>
Spécificité liée au procédé	<p>Pour les procédés à alimentation discontinue, les mesures doivent être réalisées sur le même digesteur et le même chargement afin d'obtenir des données exploitables.</p>

Indicateur	Rendement technologique (Rt) ou Rendement volumique (Rv)
Intérêt	Il exprime la quantité de biogaz produit par unité de volume de digesteur et par jour. C'est un indicateur d'efficacité biologique du procédé ainsi qu'un indicateur de dimensionnement. Il est également appelé "efficacité volumique". Le temps de séjour (TS) dans le digesteur (ou temps de rétention hydraulique (TRH) pour les liquides) intervient dans le calcul de cet indicateur.
Unité	Le rendement technologique (Rt) s'exprime en Nm ³ de biogaz/m ³ de digesteur/jour
Expression	Rt = Production de biogaz / Volume de digesteur/ TS
Variables de calcul	Production de biogaz (Nm ³) Volume du digesteur (m ³) Temps de séjour (jours)
Spécificité liée au procédé	Le Rt varie dans une fourchette de 0,2 (unité agricole surdimensionnée) à 5 Nm ³ biogaz/m ³ /j pour les digesteurs de type infiniment mélangé. Il est supérieur à 10 pour les réacteurs de type lit fixé ou UASB.

Indicateur	Bilan hydrique
Intérêt	Les unités de méthanisation mettant en œuvre un procédé à alimentation discontinue nécessitent l'immersion du mélange pour deux raisons : - les bactéries anaérobies responsables du processus de dégradation se développent dans un milieu humide ; - l'immersion du mélange permet également d'atteindre les conditions d'anaérobiose. L'immersion est assurée par les jus du mélange et un apport d'eau extérieure. Cette phase liquide est appelée "jus de recirculation". Pour optimiser la gestion du procédé, il est nécessaire de connaître le volume de jus utilisé au cours de la digestion par tonne de matière traitée. Pour cela, on calcule l'indicateur d'apport en jus de recirculation (Aj).
Unité	L'apport de jus (Aj) est exprimé en m ³ /tonne traitée
Expression	Aj= Vj /Tonnage entrant du mélange avec Vj : volume de jus apporté dans le digesteur étant égal à : Vj = Temps de fonctionnement des pompes * débit de la pompe
Variables de calcul	Temps de fonctionnement des pompes de recirculation des jus durant la phase de digestion par digesteur (h) Débit de la pompe (m ³ /h) Tonnage entrant du mélange (tonnes)
Spécificité liée au procédé	Indicateur calculé uniquement pour les procédés à alimentation discontinue

Indicateur	AGV/TAC
Intérêt	Le rapport AGV (Acide gras volatil) sur TAC (Titre Alcalimétrique Complet) permet d'appréhender l'équilibre du milieu en fermentation et d'évaluer les risques de dérive vers une acidose. Globalement : AGV/TAC < 0,3 : Conditions normales de fonctionnement 0,3 < AGV/TAC < 0,6 : Risque de déséquilibre - Equilibre à rétablir AGV/TAC > 0,6 : Risque élevé d'acidose
Unité	Pas d'unité spécifique
Expression	
Variables de calcul	Teneur en AGV (idéalement mesure des C2 à C4 par chromatographie) Titre Alcalimétrique Complet (mesure du pouvoir tampon du milieu en équivalent bicarbonates)
Spécificité liée au procédé	Il existe une méthode de dosage par titrimétrie utilisable en suivi d'exploitation

4.1.2 Indicateurs techniques

Indicateur	Temps de rétention hydraulique (TRH) ou Temps de séjour (TS)
Intérêt	Le temps de rétention hydraulique (TRH) ou temps de séjour (TS) quantifie la durée de séjour de la matière au sein du digesteur. Il permet de caractériser le fonctionnement de l'installation.
Unité	La durée s'exprime en jours
Expression	Pour les procédés à alimentation continue : TRH = (volume utile du digesteur / débit de matière entrant) / 24 Pour les procédés à alimentation discontinue : TS = Date de déchargement - Date de chargement
Variables de calcul	TRH : - Volume utile du digesteur (m ³ utile) - Débit de la pompe d'injection (m ³ /h) TS : - Date de chargement - Date de déchargement
Spécificité liée au procédé	On utilise le terme TRH pour les procédés en voie liquide et TS pour les procédés en voie sèche

Indicateur	Charge Organique (CO)
Intérêt	La charge organique est un indicateur d'intensité du traitement et du dimensionnement de l'installation.
Unité	Elle est exprimée en kg Matière organique/m ³ utile de digesteur/jour.
Expression	CO = Quantité de MO du mélange / Volume du digesteur / TRH ou TS
Variables de calcul	Quantité (kg) de MO du mélange (MSV ou DCO) Volume utile du digesteur (m ³ utile) Temps de rétention hydraulique ou Temps de séjour (jours)
Spécificité liée au procédé	-

Indicateur	Temps d'utilisation du matériel (Tm)
Intérêt	Cet indicateur doit permettre de déterminer globalement et pour chaque opération citée précédemment, le temps d'utilisation des matériels. La liste du matériel considéré est la suivante : - tracteur ; - épandeur ; - télescopique/chargeur ; - trémie d'alimentation (procédé à alimentation continue uniquement).
Unité	Tm est exprimé en h
Expression	Tm général = somme des Tm pour chaque matériel
Variables de calcul	Relevés manuels par type de matériel Tonnage traité sur la période considérée
Spécificité liée au procédé	-

4.2 Bilan énergétique

Le bilan énergétique comprend une série d'indicateurs qui peuvent varier en fonction des différents modes de valorisation de l'énergie produite sur l'installation.

En effet, il existe plusieurs possibilités de production d'énergie sur une installation de méthanisation :

- **La production d'électricité** : celle-ci est réalisée par le biais d'un moteur combiné à une génératrice sans module de récupération de la chaleur.
- **La production de chaleur** seule par le biais d'une chaudière.
- **La production conjointe d'électricité et de chaleur** par l'intermédiaire d'un moteur combiné à une génératrice avec un module de récupération de la chaleur (émise par les gaz d'échappement et le circuit de refroidissement du moteur). Ce dernier cas de figure est le plus fréquent sur les installations agricoles. L'ensemble formé par le moteur -la génératrice - le module de récupération de la chaleur est appelé module de cogénération. Précisons que les dispositifs combinant moteur, turbine vapeur et génératrice ne sont pas pris en compte dans ce guide.
- **L'injection de biométhane** dans les réseaux de transport de gaz naturel fossile. Ce dernier volet, n'est pas abordé dans le présent guide.

Les indicateurs énergétiques présentés ci-après correspondent au cas le plus fréquent et également le plus complet. Un tableau de synthèse permet au terme de cette présentation de déterminer la pertinence de chaque indicateur au regard du mode de production considéré.

Rappelons, que l'ensemble des termes utilisés dans le calcul des indicateurs sont définis dans la partie 3.1.3. et la fiche 5.4 fait le point sur les deux arrêtés tarifaires et leurs prescriptions techniques notamment en termes d'instrumentation.

4.2.1 Indicateurs énergétiques

Indicateur	Production d'énergie primaire (Pp)
Intérêt	La production d'énergie primaire (Pp) correspond à la quantité d'énergie produite théoriquement à partir du biogaz et valorisable. Elle peut se calculer de deux manières selon la présence ou non d'un débitmètre et d'un analyseur biogaz.
Unité	Pp s'exprime en kWh PCI/Nm ³
Expression	Cas 1 : présence d'un débitmètre et analyseur $Pp = \text{Production de biogaz} * \text{Teneur en CH}_4 * \text{PCI CH}_4$ Cas 2 : Absence d'un débitmètre et analyseur (introduction de biais lié au rendement constructeur qui peut être différent du rendement réel) $Pp = \text{Production électricité totale} / \text{rendement électrique du cogénérateur}$
Variables de calcul	Production de biogaz valorisée (Nm ³) Teneur en CH ₄ (%) PCI CH ₄ : 9,96 kWh PCI/Nm ³ CH ₄ Production d'électricité totale cumulée sur une année (mesurée par le compteur placé après le cogénérateur - Fiche 5.4) (kWh élec/an) Rendement électrique (en %) (donnée motoriste)
Spécificité liée au procédé	Dans le cas 2, il est nécessaire de tenir compte d'un nombre d'heures de fonctionnement annuel du cogénérateur et de corriger la production d'énergie primaire en conséquence

Indicateur	Production d'énergie utile (Peu)
Intérêt	La production d'énergie utile correspond à l'énergie réellement produite à la sortie du module de cogénération ou de la chaudière pendant une année de fonctionnement
Unité	La production d'énergie utile s'exprime en kWh utiles
Expression	Production d'électricité total (Pet) qui s'exprime en kWh él Production de chaleur totale (Ptht) qui s'exprime en kWh th utiles
Variables de calcul	-
Spécificité liée au procédé	-

Indicateur	Rendement technique de l'installation ¹⁷ (Rt)
Intérêt	Le biogaz produit est valorisé dans le module de cogénération/chaudière permettant la production d'électricité et/ou de chaleur. Cependant, la totalité du biogaz n'est pas transformée en énergie, le rendement du module n'étant pas de 100 %. Il convient dès lors de mesurer ce rendement : - le rendement électrique (Re); - le rendement thermique (Rth) à partir de la production thermique valorisée ; - le rendement global (Rg).
Unité	Les rendements s'expriment en %
Expression	$Re = \frac{P_{et}}{(Production\ de\ biogaz * Teneur\ en\ CH_4 * PCI\ CH_4)} * 100$ $Rt = \frac{P_{tht}}{(Production\ de\ biogaz * Teneur\ en\ CH_4 * PCI\ CH_4)} * 100$ $Rg = \frac{(P_e + P_{tht})}{(Production\ de\ biogaz * Teneur\ en\ CH_4 * PCI\ CH_4)} * 100$
Variables de calcul	Production de biogaz valorisée (Nm ³) Teneur en CH ₄ (%) Production électricité totale (kWh él) (P _{et}) Production de chaleur totale (kWh th) (P _{tht})
Spécificité liée au procédé	-

Indicateur	Taux de substitution des énergies fossiles/fissiles (Tseff) ¹⁸
Intérêt	Cet indicateur exprime la part de l'énergie renouvelable produite disponible pour une utilisation en substitution à des énergies fossiles ou fissiles pour une activité antérieure ou concomitante à la création de l'unité.
Unité	Le Taux s'exprime en %
Expression	$T_{seff} = \frac{(P_{ed} + (P_{thv} - P_{thc}))}{P_p} * 100$
Variables de calcul	Production de biogaz valorisée (Nm ³) Teneur en CH ₄ (%) Production d'électricité distribuée (kWh él) (P _{ed}) Production de chaleur valorisée (kWh th) (P _{thv}) Production de chaleur autoconsommée (prétraitement, digesteur et postraitement) (kWh th) (P _{thc}) Production d'énergie primaire (kWh PCI) (P _p)
Spécificité liée au procédé	-

¹⁷ Cet indicateur permet d'évaluer le rendement technique du cogénérateur qui pourra être comparé au rendement annoncé par le motoriste. Cet indicateur est différent de celui d'efficacité énergétique (V) calculé dans le cadre de l'arrêté tarifaire.

¹⁸ Cet indicateur est différent du calcul d'efficacité énergétique (V) calculé dans le cadre de l'arrêté tarifaire.

4.2.2 Indicateurs à suivre selon le mode de valorisation du biogaz

Indicateurs énergétiques		Production d'électricité seule	Production de chaleur seule	Production conjointe de chaleur et d'électricité
Production d'énergie primaire		X	X	X
Production d'énergie utile sortie module de cogénération ou chaudière	Pe	X		X
	Ptht		X	X
	Pthv		X	X
Rendement	Re	X		X
	Rt		X	X
	Rg	$Rg = Re$	$Rg = Rt$	$Rg = Re+Rt$

Important : Dans le cas de l'injection du biométhane dans le réseau de transport ou de distribution de gaz naturel fossile il conviendra de tenir compte des rendements d'épuration (pertes liées au système d'épuration, période de non-conformité analytique conduisant à rejet torchère etc.). En fonction de l'installation technique d'épuration et d'injection il conviendra d'adapter les indicateurs énergétiques à enregistrer afin de répondre aux exigences de l'analyse souhaitée.

4.3 Bilan environnemental

4.3.1 Indicateurs d'efficacité technique

Le bilan environnemental comprend plusieurs indicateurs :

- L'efficacité énergétique.
- Le bilan sur les émissions de GES évités.
- **Efficience énergétique**

Indicateur	Efficience énergétique (Efe)
Intérêt	<p>L'efficacité énergétique représente le rapport entre la production d'énergie renouvelable produite par l'installation de méthanisation et la consommation d'énergie non renouvelable nécessaire au fonctionnement de l'installation. Par exemple, la consommation d'une unité d'énergie fossile participe à la production utile de 5 unités d'énergie renouvelable.</p> <p>La production d'énergie renouvelable correspond à l'énergie disponible. La consommation d'énergie non renouvelable (fossile et fissile) comprend :</p> <ul style="list-style-type: none"> - la quantité de carburant consommée par les véhicules amenant les déchets sur l'installation et par les matériels de manutention (chargeur, tracteur etc.) utilisés pour faire fonctionner l'installation; - le fioul ou le gaz consommé pour faire démarrer le module de cogénération ou utilisé en appoint du cogénérateur dans une chaudière - la consommation d'électricité nécessaire au fonctionnement des auxiliaires (pompes...) <p><i>Les opérations d'épandage du digestat ne sont pas intégrées dans le calcul du rendement considérant que les consommations d'énergie liées sont similaires à un épandage classique.</i></p>
Unité	Pas d'unité spécifique
Expression	<p>$Efe = \frac{\text{Quantité d'énergie renouvelable disponible}}{\text{Quantité d'énergie fossile/fissile consommée}}$</p> <p>Avec :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Quantité d'énergie renouvelable disponible (kWh) = Production d'électricité distribuée (kWh) + Production de chaleur valorisée (kWh) - Quantité d'énergie fossile/fissile consommée (kWh) = consommation d'énergie fossile (fioul ou gaz) en kWh + consommation d'électricité (kWh) <p><i>en retenant : 1 litre de fuel = 10 kWh PCI, 1kg de propane : 12,8 kWh PCI, 1 m3 de gaz naturel : 10,3 kWh PCI</i></p>
Variables de calcul	<p>Production d'électricité distribuée (kWh) (Ped)</p> <p>Production de chaleur valorisée (kWh th) (Pthv) hors perte et autoconsommation (prétraitement, digesteur et posttraitement)</p> <p>Consommation d'énergie fossile et fissile en kWh (estimation sur la base des équivalences ci-dessus)</p>

- **Bilan des émissions de gaz à effet de serre**

Le bilan des émissions de gaz à effet de serre est une étape incontournable pour réaliser le bilan environnemental d'une unité de méthanisation. Il existe un calculateur dédié cette étape appelé DIGES réalisé par le CEMAGREF pour le compte de l'ADEME permettant de réaliser ce bilan. Il est disponible à l'adresse suivante : <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=15555>.

Indicateur	Bilan des émissions de Gaz à Effet de Serre (DIGES)
Intérêt	Le logiciel DIGES établit le bilan des GES en considérant les émissions liées au fonctionnement de l'unité et au transport des substrats et du digestat, d'une part, et les émissions évitées par rapport à la situation de référence (traitement de référence, transport, production d'énergie, épandage, engrais), d'autre part.
Unité	Tonnes équivalent CO ₂
Expression	Bilan = Emissions GES unité de méthanisation + Emissions GES dues au transport - GES évitées par la substitution au traitement des déchets - GES évitées par la substitution du transport - GES évitées par la substitution d'énergie - GES évitées par la substitution d'engrais liées à l'utilisation du digestat
Variables de calcul	<p>Les variables de calcul sont nombreuses, mais il faut à minima disposer des éléments suivants :</p> <p>Substrats : type, quantité (tonnes de matière brute par an), distance d'approvisionnement, distance de référence¹⁹.</p> <p>Caractéristiques de l'installation : conditions de pré-stockage des substrats et de post-stockage du digestat (couverture des aires, récupération du biogaz etc.), modes de valorisation énergétique du biogaz (cogénération, injection, chaudière etc.),</p> <p>Digestat : distance de transport entre l'unité de méthanisation et la valorisation finale.</p> <p>Pour les autres paramètres nécessaires à l'élaboration du bilan des GES, le logiciel prend en compte différentes hypothèses, explicitées dans le guide méthodologique d'utilisation.</p>

4.3.2 Evaluation des risques de nuisance

Ce bilan vise à évaluer le niveau de risque de nuisance de l'installation sur son environnement.

Les nuisances prises en considération sont liées aux odeurs, au transport, au bruit et à l'intégration de l'unité dans le paysage.

L'évaluation des risques s'appuie sur plusieurs paramètres adaptés à la catégorie de nuisance. L'évaluation prend également en compte, l'environnement global du site, les actions mises en œuvre par l'exploitant pour sensibiliser le grand public à l'activité du site et les plaintes de riverains à l'encontre du fonctionnement de l'unité.

Pour chaque paramètre, un niveau de risque est associé. Une notation de 1 à 10 a été élaborée, 1 correspondant à un risque très faible et 10 correspondant à un risque élevé. Une pondération pour chaque paramètre entre également en ligne de compte pour les calculs.

¹⁹ Distance parcourue pour acheminer les substrats vers l'unité de traitement dans la situation de référence

Une note globale sur 10 est ainsi établie. Pour l'interprétation de la note, on considère que :

- Une installation ayant une note < 5/10 comporte un risque faible de nuisance.
- Une installation ayant une note comprise entre 5/10 et 8/10 comporte un risque modéré de nuisance.
- Une installation ayant une note > 8/10 comporte un risque fort de nuisance.

Un tableau Excel permet d'établir le niveau de risque (voir § 5.6.2 – Fiches pratiques).

4.4 Bilan socio-économique

4.4.1 Etat de situation sur la création d'emplois

Le bilan intègre l'ensemble des emplois nécessaires lors des phases de conception, construction et exploitation. Ce bilan constitue une première approche peu précise pour les emplois indirects.

Pour chaque catégorie d'emploi, le nombre d'équivalent temps plein (ETP) doit être évalué.

Les hypothèses de calculs sont les suivantes ;

- une journée de travail comprend 7 heures (35 h sur 5 j ouvrés),
- un équivalent temps plein équivaut à 1 820 h/an (35 h pendant 52 semaines),
- pour les emplois temporaires, le nombre d'ETP est égal au temps passé en heures sur la durée d'exploitation (15 ans).

Les emplois créés sont ramenés à la puissance électrique (kW élec.) et à la tonne entrante traitée.

Un tableur Excel reprend l'ensemble des indicateurs par poste (voir § 5.6.2 – Fiches pratiques).

Indicateur	Création d'emplois (Ce)
Intérêt	Cet indicateur doit permettre d'évaluer le nombre d'emplois créés de la conception à l'exploitation de l'unité de méthanisation. Les emplois directs et indirects sont évalués. Il s'agit d'une première approche introduisant de nombreuses imprécisions notamment sur les emplois indirects
Unité	Le nombre d'emplois créés est estimé en Equivalent Temps Plein (ETP).
Expression	CE = somme de l'ensemble ETP des différentes phases de conception, construction et exploitation
Variables de calcul	Fichier excel
Spécificité liée au procédé	-

Un indicateur complémentaire permet d'affiner ce bilan ; il s'agit du temps de travail *in situ*.

Le tableau ci-dessous détaille les composants.

Indicateur	Temps de travail humain in situ(Th)																								
Intérêt	Cet indicateur doit permettre de déterminer le temps de travail humain nécessaire à la conduite de l'installation d'une façon globale et pour chaque opération. Il est donc calculé pour chaque opération, ces dernières étant différentes selon les procédés mis en œuvre : <table border="1" data-bbox="539 383 1428 685"> <thead> <tr> <th data-bbox="539 383 1078 465">Opérations</th> <th data-bbox="1083 383 1249 465">Procédé à alimentation continue</th> <th data-bbox="1254 383 1428 465">Procédé à alimentation discontinue</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="539 465 1078 495">réception/tri/préparation des matières premières</td> <td data-bbox="1083 465 1249 495">X</td> <td data-bbox="1254 465 1428 495">X</td> </tr> <tr> <td data-bbox="539 495 1078 524">chargement</td> <td data-bbox="1083 495 1249 524"></td> <td data-bbox="1254 495 1428 524">X</td> </tr> <tr> <td data-bbox="539 524 1078 553">fermeture du digesteur</td> <td data-bbox="1083 524 1249 553"></td> <td data-bbox="1254 524 1428 553">X</td> </tr> <tr> <td data-bbox="539 553 1078 582">suivi de la digestion</td> <td data-bbox="1083 553 1249 582">X</td> <td data-bbox="1254 553 1428 582">X</td> </tr> <tr> <td data-bbox="539 582 1078 611">maintenance et entretien du moteur</td> <td data-bbox="1083 582 1249 611">X</td> <td data-bbox="1254 582 1428 611">X</td> </tr> <tr> <td data-bbox="539 611 1078 640">maintenance et entretien des digesteurs</td> <td data-bbox="1083 611 1249 640">X</td> <td data-bbox="1254 611 1428 640">X</td> </tr> <tr> <td data-bbox="539 640 1078 685">déchargement</td> <td data-bbox="1083 640 1249 685"></td> <td data-bbox="1254 640 1428 685">X</td> </tr> </tbody> </table>	Opérations	Procédé à alimentation continue	Procédé à alimentation discontinue	réception/tri/préparation des matières premières	X	X	chargement		X	fermeture du digesteur		X	suivi de la digestion	X	X	maintenance et entretien du moteur	X	X	maintenance et entretien des digesteurs	X	X	déchargement		X
Opérations	Procédé à alimentation continue	Procédé à alimentation discontinue																							
réception/tri/préparation des matières premières	X	X																							
chargement		X																							
fermeture du digesteur		X																							
suivi de la digestion	X	X																							
maintenance et entretien du moteur	X	X																							
maintenance et entretien des digesteurs	X	X																							
déchargement		X																							
Unité	L'indicateur (Th) est exprimé en heures/an																								
Expression	Th globale = somme de l'ensemble des Th par opération																								
Variables de calcul	Relevés manuels des heures par opération Tonnage traité sur la période considérée																								
Spécificité liée au procédé	-																								

4.4.2 Bilan économique

L'analyse économique comprend deux étapes :

- La réalisation d'une analyse économique simplifiée du projet ou business plan.
- Le calcul des indicateurs habituels de rentabilité du projet.

Ces indicateurs se calculent sans et avec la prise en compte des subventions.

- **Réaliser l'analyse économique simplifiée du fonctionnement de l'installation de méthanisation**

Il permet de simuler l'évolution économique du projet de méthanisation en prenant en compte les données réelles d'exploitation de l'année N et de simuler les années suivantes de fonctionnement du projet. L'ensemble des postes d'investissement, de charges et de recettes doivent être connus pour calculer les indicateurs présentés ci-après. L'euro constant à l'année n est privilégié pour l'élaboration du prévisionnel des charges et recettes sur la durée du projet.

Par ailleurs il est important de tenir compte pour les investissements des durées d'amortissement selon les postes considérés.

Tableau 10 : Détail des durées d'amortissement selon les postes d'investissement

Postes d'investissement	Durée d'amortissement (années)
Gros œuvre	15
Moteur cogénération	8
Appareil process	5
Autres	15

Important :

La notion d'actualisation est également importante dans la mise en place de l'analyse économique. L'actualisation a pour but de prendre en compte l'évolution de la valeur de l'argent au cours de la période d'analyse d'un projet. Cette méthode permet de ramener à une même base des flux financiers se produisant à des dates différentes.

Le choix du **taux d'actualisation** est une variable clé de l'analyse économique d'un projet et peut changer fortement le résultat. Le taux généralement choisi reflète le coût du capital. Ainsi pour les produits et les charges de fonctionnement on retiendra le taux d'inflation. On propose par défaut de retenir un taux moyen d'actualisation de 2 %. En effet dans les pays membres de l'Union européenne, l'inflation s'est à peu près stabilisée autour de 2 % depuis 1993²⁰. Cependant le chargé de l'étude économique peut tout à fait prendre des indices détaillés en fonction des différents postes de fonctionnement.

On se rapportera au tableau de calcul de l'analyse économique simplifiée (business plan) proposé dans le tableur dédié à l'analyse économique (voir Tableur Excel - Analyse économique).

Les indicateurs économiques suivants²¹ sont à calculer :

- L'Excédent Brut d'Exploitation (EBE)
- Le Résultat d'Exploitation (RE)
- Le Résultat Courant Avant Impôts (RCAI)
- Le Résultat Net (RN)

En outre, il est également pertinent d'utiliser des indicateurs descriptifs pour l'analyse des investissements afin de réaliser des comparaisons entre installations de méthanisation voire avec des installations de filières concurrentes (compostage, incinération...). Les ratios suivant peuvent être utilisés :

- Pour comparer entre elles des installations de méthanisation valorisant le biogaz en cogénération : montant total d'investissement/puissance électrique installée, exprimé en €/HT/kW électrique
- Pour comparer entre elles des installations de méthanisation quelque soit le mode de valorisation du biogaz :
 - . montant total d'investissement/puissance totale de cogénération installée (électrique et thermique), exprimé en €/HT/KW PCI,
 - . montant total d'investissement/volume des digesteurs (principal+postdigestion sans volume stockage), exprimé en € HT/m³ de digesteur
- Pour comparer la méthanisation avec d'autres filières de traitement des déchets organiques : montant total d'investissement/tonnage total annuel réellement traité en méthanisation, exprimé en € HT/tonne traitée.

²⁰ [L'Europe en chiffres, Eurostat](#), p. 162

²¹ Pour plus d'informations relatives aux différents indicateurs retenus consulter le site internet de l'INSEE : <http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=definitions/liste-definitions.htm>

Tableau 11 : Rappel du détail des postes de charges

Type de charges		Postes de charges détaillés	
Charges d'exploitation	Charges variables d'exploitation	Gestion des substrats	Transport
			Achat de substrats
			Analyses
			Frais de traitement
		Productions/achat de cultures et intercultures	Cultures intermédiaires
			Cultures dédiées
		Gestion de digestats	Epandage
			Transport
			Analyses matières "classiques"
			Analyses bactériologiques
			Autres analyses
		Maintenance	Frais de traitement
	Unité de valorisation (cogé, chaudière...)		
	Consommables	Process de méthanisation <i>hors moteur</i>	
		Electricité	
		Charbon actif	
		Fioul pour cogé dual	
Produits pour unité de traitement			
Charges fixes d'exploitation	Autres		
	Main d'œuvre		
	Assurances		
Autres charges fixes	Autres(frais de gestion etc.)		
	Taxes (taxe foncière, contribution économique territoriale, contribution sociale et solidaire des entreprises)		
	Impôts sur le revenu ou sur les sociétés		
	Provision renouvellement, maintenance gros entretien		
		Amortissements	
		Frais financiers ou intérêts d'emprunt	

Indicateur	Excédent Brut d'Exploitation (EBE)
Intérêt	L'EBE est le solde du compte d'exploitation dégagée au cours d'une période par l'activité principale (on retiendra l'année calendaire), après paiement des charges annuelles d'exploitation (variables et fixes) donc avant amortissement . Ce dernier doit être évalué sur les 15 années d'exploitation (durée correspondant à la durée du contrat d'achat).
Unité	€ hors taxe constants
Expression	EBE = Recettes d'exploitation annuelles - Charges d'exploitation annuelles
Variables de calcul	Recettes annuelles Charges d'exploitation annuelles (variables et fixes)
Spécificité liée au procédé	-

Indicateur	Cash Flow (CF)
Intérêt	Les Cash flow correspondent aux recettes permises par l'investissement desquelles il faut déduire les charges annuelles d'exploitation et les impôts sur les bénéfices. Attention, il ne faut pas déduire les amortissements, les frais financiers et les provisions pour risque. Ils servent au calcul des indicateurs de rentabilité.
Unité	€ hors taxe constants
Expression	CF= EBE - Impôts sur les bénéfices (impôts sur les sociétés)
Variables de calcul	EBE Impôts sur les bénéfices/sociétés
Spécificité liée au procédé	-

Indicateur	Résultat d'Exploitation (RE)
Intérêt	Cet indicateur permet d'apprécier la performance économique intrinsèque du projet puisqu'il n'est influencé ni par les modalités de financement (charge et produits financiers etc.), ni par les événements exceptionnels (restructuration, vente d'actifs etc.). Il se calcule en retranchant les dotations aux amortissements de l'EBE.
Unité	€ hors taxe constants
Expression	RE= EBE - dotations aux amortissements
Variables de calcul	EBE Dotation aux amortissements (cumul des amortissements sur la durée)
Spécificité liée au procédé	-

Indicateur	Résultat Courant Avant Impôts (RCAI)
Intérêt	Ce dernier est égal au résultat d'exploitation auquel on retranche les charges financières et notamment les intérêts d'emprunts. Le résultat courant avant impôts est bénéficiaire si les produits dépassent les charges ou déficitaire dans le cas contraire.
Unité	€ hors taxe constants
Expression	RCAI= RE - frais financiers (intérêts d'emprunt)
Variables de calcul	RE Frais financiers ou intérêts d'emprunt
Spécificité liée au procédé	-

Indicateur	Résultat Net (RN)
Intérêt	Le résultat net d'exercice (ou bénéfice net au sens fiscal) correspond au RCAI moins l'impôt sur les sociétés (IS) après avoir tenu compte d'un éventuel crédit d'impôt.
Unité	€ hors taxe constants
Expression	RN = RE - Impôt sur les bénéfices - crédit d'impôt
Variables de calcul	RCAI Impôt sur les bénéfices Crédit d'impôt
Spécificité liée au procédé	-

• **Calculer les critères de rentabilité**

Il existe plusieurs méthodes pour mener l'analyse des performances économiques d'un projet et notamment l'évaluation de la rentabilité de l'installation (exemple méthode TEC – Taux d'Enrichissement du Capital). Dans ce guide, on s'attache à proposer les indicateurs les plus couramment utilisés.

Parmi les différents critères de rentabilité disponibles nous proposons d'en retenir quatre qui sont le plus souvent utilisés :

- La Valeur Actuelle Nette (VAN).
- Le Temps de Retour Brut (TRB).
- Le Temps de Retour Actualisé (TRA).
- Le Taux de Rentabilité Interne (TRI).

Indicateur	Valeur Actuelle Nette (VAN)
Intérêt	La VAN consiste à calculer la valeur actualisée des différents flux financiers sur la durée projet du projet en intégrant l'investissement initial. Ce calcul permet ainsi de déterminer le gain financier pendant la durée de vie du projet. Une VAN positive indique que l'investissement peut être rentabilisé. Cet indicateur permet de déterminer la pertinence d'un projet d'investissement. Cependant, la VAN reste un outil d'évaluation prévisionnel basé sur des informations restant difficiles à prévoir car il faut être capable de prévoir les recettes et les charges liées au projet sur toute sa durée de vie mais aussi être capable de prévoir le taux d'actualisation sur la période de calcul (15 ans en ce qui concerne un projet de méthanisation). Elle peut être calculée à partir de la fonction VAN sous Excel®.
Unité	€ HT
Expression	$VAN = - \text{Investissements} + (\text{somme cash flow actualisés})$
Variables de calcul	Cash flow annuel avant impôts Taux d'actualisation Investissements
Spécificité liée au procédé	

Indicateur	Temps de Retour Brut (TRB)
Intérêt	Cet indicateur permet de déterminer le temps nécessaire pour que le cumul des économies annuelles équilibrent l'investissement (ou éventuellement le surcoût d'investissement constaté). L'unité utilisée est donc le plus souvent l'année. Cependant ce critère ne prend pas en compte la notion d'actualisation, il reste assez limité et peu pertinent.
Unité	En nombre d'années
Expression	$TRB = \text{Investissement} / \text{Cash Flow annuel moyen}$
Variables de calcul	
Spécificité liée au procédé	

Indicateur	Temps de Retour Actualisé (TRA)
Intérêt	Cet indicateur exprime le nombre d'années nécessaires pour que le cumul des économies annuelles actualisées équilibre l'investissement (ou éventuellement le surcoût d'investissement).
Unité	En nombre d'années
Expression	TRA = Investissement/ Cash Flow annuel moyen actualisé
Variables de calcul	
Spécificité liée au procédé	

Indicateur	Taux de rentabilité interne (TRI)
Intérêt	Le TRI est un outil de décision à l'investissement. Un projet d'investissement ne sera généralement retenu que si son TRI prévisible est suffisamment supérieur aux taux bancaires liés à des prêts à l'investissement, pour tenir compte notamment de la notion de risque propre au type de projet (ou prime de risque). Si le TRI est supérieur au taux d'actualisation du capital alors la valeur actuelle nette du projet est positive ; c'est-à-dire que le projet est rentable. LE TRI s'exprime en % et pour le calculer on peut utiliser la fonction TRI sous Excel®
Unité	TRI s'exprime en %
Expression	Le TRI peut se calculer : - directement sur Excel par l'intermédiaire d'une formule prédéfinie. La syntaxe est la suivante : =TRI (Cash Flow; estimation du taux d'actualisation) par itération : dans ce cas on cherche à résoudre VAN = 0 avec $VAN = [((CF)/(1+\text{taux d'actualisation})^1) + \text{ect} + ((CF)/(1+\text{taux d'actualisation})^n)] - \text{Investissements}$ n : nombre d'années si période considérée est de 15 ans alors n= 15
Variables de calcul	Cash Flow Taux d'actualisation
Spécificité liée au procédé	-

5. Fiches pratiques

5.1 Echantillonnage

L'échantillonnage est couramment utilisé dans le cadre d'un suivi des performances de fonctionnement d'une unité de méthanisation. De multiples analyses peuvent conduire à réaliser des échantillonnages :

- Les analyses de composition (cf fiche 5.3 - "Analyse de composition").
- L'évaluation du potentiel méthanogène d'un substrat ou d'un mélange.
- Les mesures de pH, d'alcalinité, de teneur en AGV, de matière sèche résiduelle (digestat) et teneur en matière organique résiduelle (digestat).

5.1.1 Principe

L'échantillonnage consiste à prélever **une partie représentative** d'un lot de substrat, de mélange ou de digestat. Ainsi, l'échantillon doit être constitué à partir de prélèvements réalisés à différents endroits du lot. La taille de l'échantillon final peut varier en fonction de l'analyse à réaliser. La méthode demeure toutefois la même, il convient simplement de s'adapter à la taille souhaitée.

Notons également que le conditionnement pour envoi en laboratoire peut varier. Ces détails sont exposés dans la partie "matériels".

5.1.2 Matériels

La réalisation d'un échantillon nécessite l'utilisation des matériels suivants :

- 1 contenant de 30 litres.
- 1 contenant de 1 litre.
- 1 tarière ou 1 sonde de prélèvement adéquat.
- 1 pelle.
- 1 sondimètre (possibilité d'en réaliser un soi-même) (canne métallique munie d'une bêche plastique).
- des contenants adaptés aux types d'analyses pour l'envoi des échantillons au laboratoire (généralement, les laboratoires fournissent ces contenants).
- 1 glacière (selon analyse).
- 1 bâche.

Il convient de prévoir des flacons à col large pour l'introduction des substrats solides.

5.1.3 Méthodologie

La méthode employée consiste à réaliser un **échantillon intermédiaire** de 30 litres qui servira de base à la réalisation d'un **échantillon final**, dont le volume/masse nécessaire est conditionné par le type d'analyse à réaliser et par le laboratoire d'analyse.

Tableau 12 : Exemples de conditionnement

Type d'analyse	Contenant
Potentiel méthanogène	2 kg en sachet ou 2 litres en flacon plastique ou en sachet
Analyse agronomique et/ou des ETM	1 flacon plastique ou 1 sachet de 1 litre
Analyse des CTO	1 flacon verre 850 ml
Analyse des inertes	1 sachet de 4 litres
Analyse microbiologique	1 flacon aseptique 500 ml (glacière)
pH, AGV, Alcalinité, Matière sèche résiduelle, matière organique résiduelle	1 flacon plastique ou 1 sachet de 1 litre

La méthode appliquée varie selon ce que l'on souhaite analyser :

- Echantillonnage **d'une seule catégorie de substrat** avant méthanisation (ex : fumier de bovins, lisier etc.)
- Echantillonnage **d'un mélange de substrats** avant méthanisation : dans ce cas il faut que l'échantillon ait la même composition que le mélange (respect de la part de chaque substrat qui compose le mélange).
- Echantillonnage **du digestat**.
- **Réalisation de l'échantillon intermédiaire**

☞ **Echantillonnage d'une seule catégorie de substrat**

Dans la plupart des cas, les substrats seront présentés en tas ou conditionnés dans une cuve :

- Substrats en tas : réaliser 30 prélèvements de 1 litre à différents endroits du tas en allant de la périphérie au cœur. Chaque prélèvement de 1 litre est déposé au fur et à mesure dans le contenant de 30 litres. Les prélèvements sont réalisés à l'aide d'une tarière ou d'une sonde.
- Substrats conditionnés dans une cuve : réaliser 30 prélèvements de 1 litre en allant de la surface au fond de la cuve. De la même façon que pour les substrats déposés en tas, les prélèvements sont déposés au fur et à mesure dans le contenant de 30 litres. Les prélèvements sont réalisés à l'aide d'un sondimètre²².

☞ **Echantillonnage d'un mélange de substrats**

Dans ce cas, il convient de constituer un échantillon de 30 litres pour chaque substrat qui compose le mélange. Ces échantillons sont ensuite homogénéisés. La méthode employée varie alors en fonction de la siccité du substrat :

- Pour des substrats solides, l'échantillon est déposé sur une bâche puis mélangé à l'aide d'une pelle.
- Pour des substrats liquides, le mélange est réalisé directement dans le contenant de 30 litres.

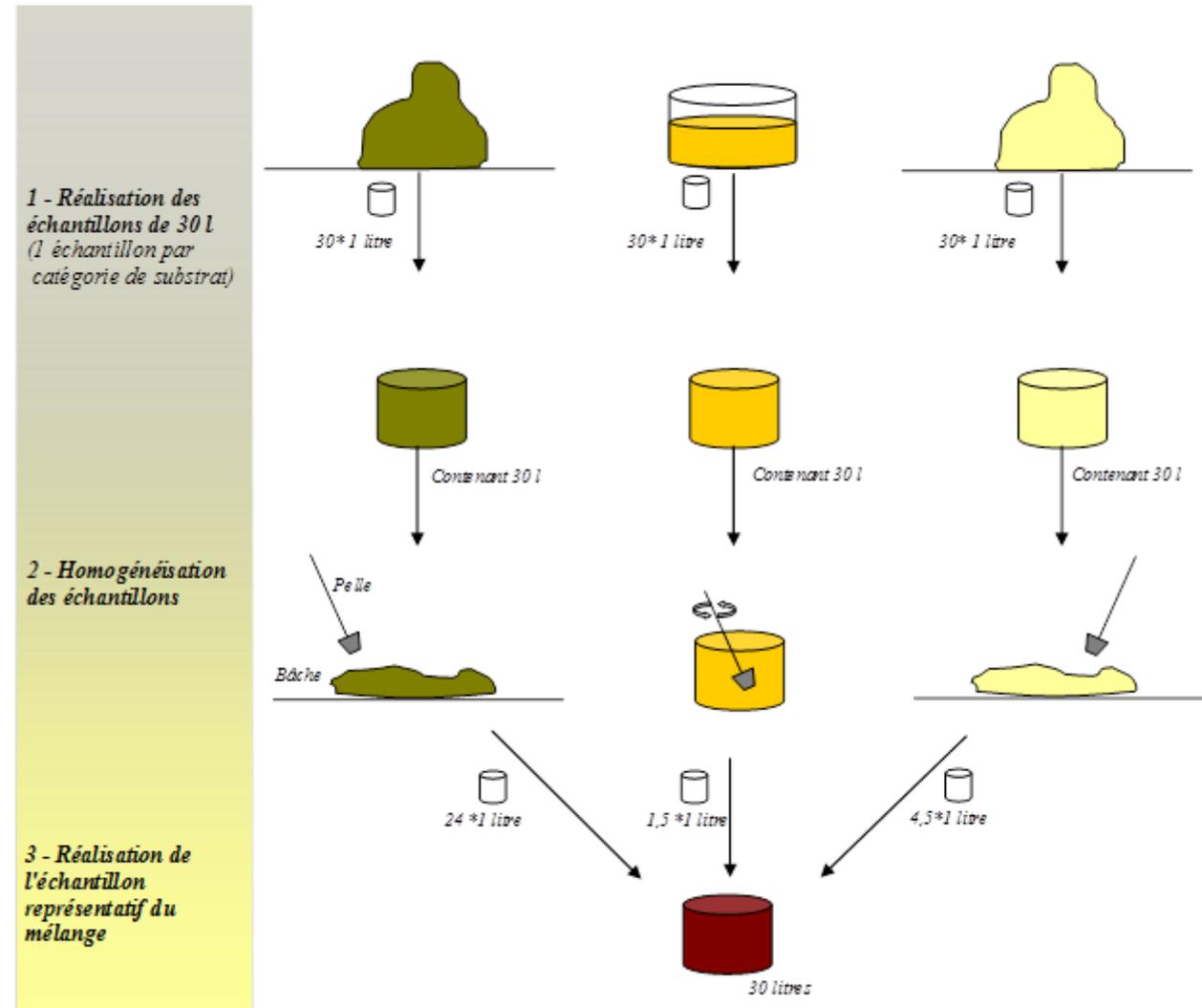
Ensuite, à partir de chacun des échantillons, il faut constituer un nouvel échantillon de 30 litres qui doit respecter la composition du mélange. Les prélèvements sont pris au hasard à plusieurs endroits de chacun échantillon de substrats.

²² Grande canne en polyéthylène permettant un prélèvement en fond de cuve

Figure 3 : Synoptique de réalisation d'un échantillon intermédiaire
Exemple d'échantillonnage d'un mélange

Composition du mélange²³

- 80 % de fumier
- 15 % de tontes
- 5 % de graisses



²³ en % du volume total

☞ Echantillonnage du digestat

Selon le procédé, la méthode employée varie :

- Dans une installation à alimentation continue (type infiniment mélangé), le prélèvement du digestat peut s'effectuer dans la fosse de stockage du digestat au niveau du branchement de la tonne. On s'applique alors à recueillir le digestat dans un contenant de 30 litres.
- Dans une installation à alimentation discontinue (type batch) : l'échantillonnage a lieu au moment du déchargement. Il convient de prélever un volume de 1 litre dans le godet en répétant l'opération 30 fois dans des godets choisis au hasard afin d'obtenir un échantillon représentatif.

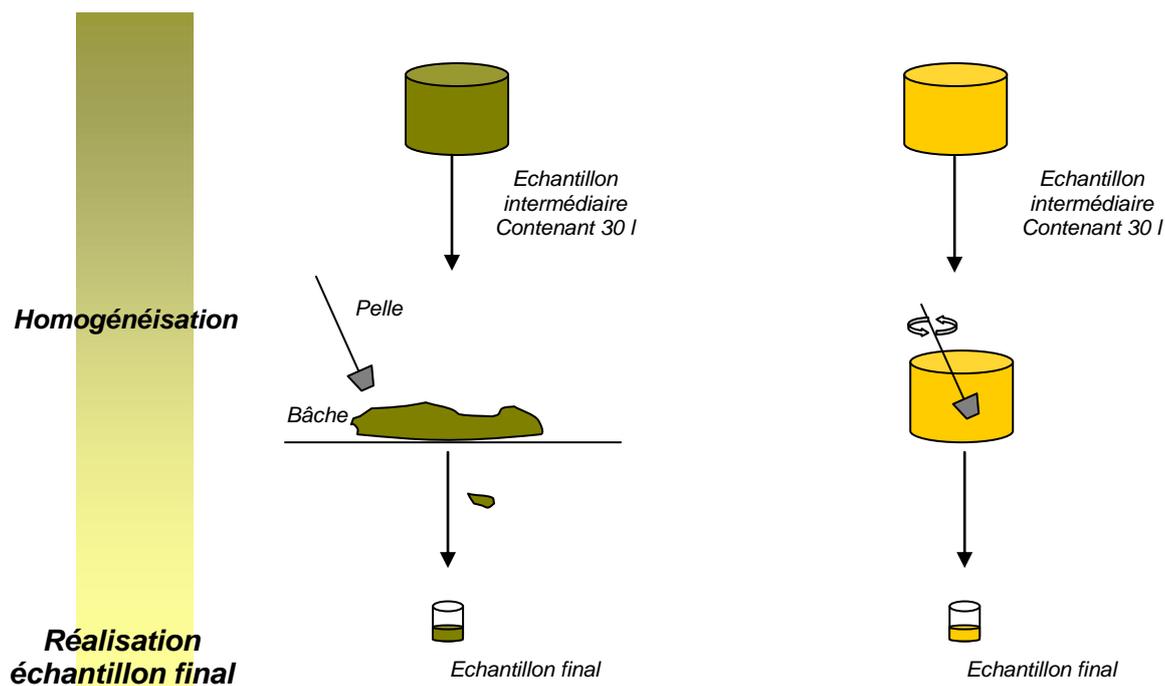
- **Réalisation de l'échantillon final**

Les échantillons intermédiaires vont servir de base à la constitution de l'échantillon final. Au préalable, ils doivent être homogénéisés.

Pour les échantillons solides, l'homogénéisation est réalisée après déversement de l'échantillon intermédiaire sur une bâche. Le mélange est réalisé à l'aide d'une pelle. Pour les échantillons liquides, le mélange est réalisé directement dans le contenant à l'aide d'une pelle.

Après avoir homogénéisé, il convient de prélever manuellement ou à l'aide d'un sondimètre pour les matières liquides, à différents endroits, des petites quantités de l'échantillon intermédiaire et remplir le contenant adapté.

Figure 4 : Synoptique de réalisation d'un échantillon final



- **Conditionnement et envoi**

Après avoir réalisé les échantillons, les envois pour analyse en laboratoires doivent être rapides (maximum 1 journée de délais). Dans tous les cas, ils doivent être conservés au frais (maximum 5 °C). Certains échantillons doivent être acheminés en glacière munie de pains de glace (analyse microbiologique).

5.2 Mesure de densité

5.2.1 Principe

La densité est le rapport entre le poids et le volume. Elle est exprimée en t/m^3 . Le calcul de la densité peut être réalisé sur chacun des substrats susceptibles d'être méthanisés, sur le mélange entrant ou sur le digestat.

La mesure de la densité est réalisée sur un échantillon représentatif (voir fiche échantillonnage).

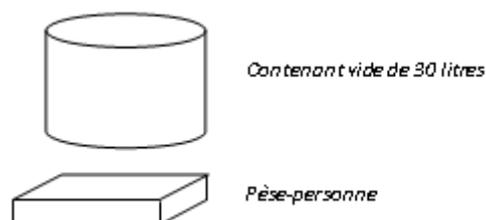
5.2.2 Matériels

Le matériel listé ne comprend pas celui nécessaire à la réalisation de l'échantillon.

- une balance (pèse - personne).
- 1 contenant de 30 litres.
- 1 pelle.

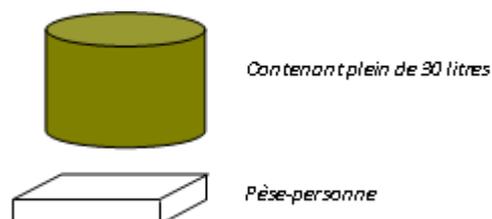
5.2.3 Méthode

1. **Faire la tare du contenant à vide** (de 30 litres par exemple) => relever le poids du récipient vide.



2. **Réaliser un échantillon** en suivant la méthode préconisée dans la fiche échantillonnage en veillant à remplir à ras bord la poubelle. Tasser légèrement le contenu.

3. **Connaître le poids de l'échantillon.** Peser le récipient plein. Relever le poids obtenu.



5.2.4 Calcul de la densité :

La formule de calcul de la densité est la suivante :

$$\text{Densité} = \frac{(\text{Poids échantillon} - \text{Poids à vide contenant})}{\text{Volume du contenant}}$$

Unités :

- Poids de l'échantillon : en kilogramme
- Poids du contenant : en kilogramme
- Volume du contenant : en litre

5.3 Analyses de composition

La méthanisation est un processus biologique donc sensible aux variations de composition du milieu dans lequel évoluent les bactéries. A ce titre, il est nécessaire pour un exploitant de suivre un certain nombre de paramètres biologiques reflétant la composition du milieu notamment :

- Pouvoir tampon.
- Ammoniac.
- Teneur en acide gras volatils.
- Matière sèche résiduelle, matière organique résiduelle.

L'ensemble de ces paramètres peuvent être mesurés au sein d'un laboratoire qui propose des gammes d'analyse pouvant regrouper plusieurs paramètres à analyser. Selon le niveau de précision souhaité, les éléments analysés peuvent varier (cf tableau ci-dessous).

Par ailleurs signalons que l'autocontrôle est envisageable mais nécessite un matériel analytique spécifique de laboratoire.

Tableau 13 : Eléments analysés en fonction du niveau de caractérisation souhaité

Type d'analyse	Eléments	Niveau de suivi	
		<i>Substrats</i>	<i>Digestat</i>
Analyse agronomique	Matière sèche, Matière organique, Azote total, C/N, Phosphore, Potassium, Magnésium, Calcium, Sodium	Simplifié Complet Expérimental	Simplifié Complet Expérimental
Analyse en éléments traces métalliques (ETM)	Arsenic, Cadmium, Chrome, Mercure, Nickel, Plomb, Sélénium, Cuivre, Zinc	Complet Expérimental	Complet Expérimental
Analyse des inertes	Films et PSE > 5 mm, Autres plastiques >5 mm, Verres et Métaux > 2 mm		
Analyse des composés traces organiques (CTO)	Fluoranthène, benzo(b)fluoranthène, benzo(a)pyrène		
Analyse micro-biologique	Oeufs d'helminthes viables, Salmonelles voire Escherichia coli et Entérocoques		

5.4 Instrumentation

Quelques précisions sur les besoins en instrumentation.

- **Instrumentation sur les matières entrantes et sortantes du digesteur**

Les besoins en instrumentation sur les matières entrantes et sortantes d'une installation de méthanisation peuvent être limités. Les moyens à mettre en œuvre doivent permettre d'effectuer les échantillons de produits dans les règles de l'art. Ces échantillons sont ensuite envoyés à un laboratoire agréé pour effectuer les analyses appropriées.

- **Instrumentation des paramètres de fonctionnement du digesteur**

- Mesure en interne digesteur : L'instrumentation de base d'un digesteur concerne la mesure de la température interne (sonde de type thermocouple) et éventuellement la mise en place d'une sonde pH. Généralement les constructeurs mettent en place ce type de matériel.

Dans le cadre d'un suivi de type expérimental, il sera nécessaire de mettre en place une instrumentation complémentaire ; notamment pour permettre le suivi en continu des AGV (matériel de titrimétrie, dosage par spectrophotomètre) ou bien envoi d'un échantillon à un laboratoire agréé.

- Mesure en externe sur le digestat prélevé quotidiennement : il est nécessaire de suivre régulièrement le pH (si mesure in situ n'existe pas). Pour cela une sonde avec boîtier pour mesure de terrain permet d'effectuer rapidement et de manière simple la mesure.
- Mesure sur biogaz : la mise en place d'un débitmètre est nécessaire si l'on souhaite effectuer un suivi complet du digesteur. En absence de débitmètre biogaz, la production volumique de biogaz peut être approchée en s'appuyant sur les données d'enregistrement de l'énergie électrique produite (voir paragraphe ci-après) et en effectuant le calcul suivant :

$$\text{Vol}_{\text{CH}_4} = E_{\text{gaz}} / 9,96 \text{ en Nm}^3 \text{ de CH}_4$$

$$\text{Vol}_{\text{biogaz}} = \text{Vol}_{\text{CH}_4} / \text{TeneurCH}_4 (\%) \text{ en Nm}^3 \text{ de biogaz}$$

L'analyse de la composition du biogaz (teneur en méthane et/ou teneur en dioxyde de carbone) demande de disposer soit de tubes colorimétriques, soit d'un analyseur spécifique biogaz.

- **Instrumentation pour la mesure de l'énergie produite**

L'instrumentation pour la mesure de l'énergie produite est *de facto* en place sur une installation de méthanisation dès qu'il y a un contrat de vente de l'électricité conclu avec un acheteur d'électricité (arrêtés tarifaires du 10 juillet 2006 ou du 19 mai 2011).

A minima, l'installation est équipée d'un compteur électrique à courbe de charge télé-relevé mis en place par le gestionnaire du réseau. Ce dernier sert de base de décompte de la production d'électricité livrée au réseau et de base de facturation de l'exploitant à l'acheteur d'énergie.

Ensuite, les autres instruments de métrologie exigés par l'acheteur d'énergie varient selon si :

- L'exploitant prétend ou non à la prime à l'efficacité énergétique (V).
- La taille de l'installation notamment la quantité d'énergie thermique distribuée valorisée annuellement, le seuil étant de 5 GWh/an.

Notons que les instruments de métrologie demandés sont similaires entre les arrêtés tarifaires 2006 et 2011.

Pour mémoire, le calcul du V diffère selon l'arrêté tarifaire :

$$2006 : V = (Pe + Pth)/(Pp * 0,97) \text{ avec}$$

Pe : énergie électrique produite nette, correspondant à la production électrique totale produite moins la consommation électrique des auxiliaires

Pth: production d'énergie thermique autoconsommée et valorisée

Pp : production d'énergie primaire du biogaz

2011 : $V = (Pe + P_{th}) / (P_p * 0,97)$ avec

Pe : énergie électrique produite nette, correspondant à la production électrique totale produite moins la consommation électrique des auxiliaires

P_{th} : production d'énergie thermique valorisée autrement que pour la production d'électricité, l'autoconsommation (process) et le traitement des intrants

P_p : production d'énergie primaire du biogaz

Le tableau ci-dessous reprend les contraintes d'instrumentation selon l'arrêté tarifaire.

Tableau 14 : Exigences d'instrumentation

	Production de chaleur distribuée et valorisée	
	< 5 GWh/an	> 5 Gwh/an
Production d'énergie primaire	Estimation par calcul ²⁴ : Production d'électricité totale (Pet)/rendement électrique du cogénérateur ²⁵	Débitmètre pour estimer la production de biogaze annuelle Analyseur biogaz pour estimer le taux de méthane du biogaz
Production d'électricité	Production d'électricité totale (Pet) : compteur dédié Production d'électricité distribuée sur le réseau : compteur de livraison au réseau (gestionnaire de réseau)	
Production de chaleur	Mise en place de compteur permettant de justifier la quantité de chaleur valorisée prise en compte dans le calcul du V	

Note sur l'énergie thermique valorisée (eau chaude)

Elle est mesurée à l'aide de compteurs spécifiques.

L'énergie thermique produite est généralement mesurée à différents niveaux de l'installation de production d'eau chaude (ou vapeur si existante) : compteur général (mesure toute l'énergie thermique produite sur le circuit d'eau), compteur sur les circuits de valorisation, compteur sur le circuit d'évacuation de l'énergie thermique excédentaire (aérotherme).

Un schéma de comptage doit être joint aux annexes du contrat ; ces éléments sont déterminants dans le calcul du taux de valorisation de l'énergie (V).

Les préconisations fournies par EDF sont les suivantes :

- Type de compteurs : Electromagnétique GEORGIN avec convertisseur MAG 6000.
- Principe de la mesure : Mesure du débit d'eau reposant sur la loi de Faraday et mesure de l'écart de température aller retour pour conversion en énergie et cumuls.
- Signal du compteur : 4 à 20 ma pour un débit de 0 à 30 M3/h.
- Précision de la mesure de volume : 0,5 %.

Précisons qu'au niveau du comptage de l'énergie calorifique, il est important de considérer la masse volumique de l'eau (par exemple, si utilisation d'eau glycolée) et de la précision du compteur calorifique (minimum $\pm 0.1^\circ\text{C}$). Ces données sont à prendre en compte dans l'interprétation des mesures indiquées par les compteurs mis en place sur l'installation.

²⁴ Signalons que l'acheteur d'énergie demande une incertitude inférieure à 4% sur V (taux de valorisation de l'énergie primaire

²⁵ Notons qu'en présence de plusieurs moteurs, c'est la valeur moyenne des rendements, pondérée des puissances des machines qui sera retenue

5.5 Fiches de suivi

Les tableaux de suivi sont essentiels pour réaliser le suivi. En effet, l'ensemble des relevés est reporté dans ces fichiers. Ils seront plus ou moins complexes en fonction du niveau de suivi choisi.

Ci-dessous figurent des exemples de tableaux de suivi, relativement complets. Il est proposé deux exemples, un pour un procédé de méthanisation à alimentation continue et un deuxième pour un procédé à alimentation discontinue.

5.6 Tableur de calcul d'indicateurs

Ces tableurs en format Excel[®] accompagnent le guide.

5.6.1 Indicateurs de fonctionnement

Un modèle de tableur de calcul (au format Excel[®]) est annexé au guide. Il constitue une base d'enregistrement et de calcul des performances. Une adaptation à chaque situation de terrain restera à réaliser par une personne compétente. En effet ce tableur a pour objectif de montrer aux opérateurs de terrain une manière d'enregistrer et de traiter leurs données et mesures de fonctionnement de leur installation. Il s'agit donc bien d'une base de données qui demandera à être adaptée selon les caractéristiques de fonctionnement spécifiques à chaque installation.

Le tableur comporte différents onglets :

- Un onglet de saisie des données.
- Un onglet regroupant les données concernant le fonctionnement.
- Un onglet regroupant les données concernant les performances.
- Un onglet présentant une synthèse des résultats de performance hebdomadaire.

Afin d'éviter des erreurs de calcul, tous les onglets sont protégés en écriture par un mot de passe, sauf les cellules qui demandent une saisie par l'opérateur.

Rappelons que la logique du suivi repose sur un relevé 5 jours par semaine des différents paramètres de fonctionnement de l'installation. Rappelons également que « l'unité temps » choisie est la semaine ; ainsi les valeurs enregistrées sont comptabilisées ou moyennées pour obtenir une valeur hebdomadaire qui sera retenue au niveau de la synthèse du fonctionnement. Ces relevés (effectués sur un document papier) sont reportés par l'intermédiaire de l'onglet de saisie du tableur. Les cellules de saisie sont « déverrouillées » pour permettre la saisie par l'opérateur. L'enregistrement de ces informations permet d'alimenter automatiquement les autres onglets du tableur et ainsi d'établir la synthèse des performances de l'installation.

Signalons que différents graphes peuvent ensuite être facilement créés à partir de l'onglet « synthèse » pour suivre les performances de l'installation.

Des fiches de synthèse peuvent être alors élaborées.

Ci-après figure un exemple de fiche de synthèse élaborée à partir du suivi expérimental réalisé sur l'installation du GAEC du Bois Joly (La Verrie, 85).

Installation : La Verrie (85) Maître d'ouvrage : Gaec du Bois Joly Procédé : Discontinu		Période considérée : 13 mai 2008 au 31 mars 2009 Suivi assuré par : Denis Brosset/Biomasse Normandie/APESA			
INDICATEURS TECHNIQUES (13 mai 2008 au 31 mars 2009)					
Données générales					
<i>Fréquence de chargement et temps de rétention hydraulique (TRH)</i>					
Postes	Mini	Moyen	Maxi	Ecart type	
Fréquence de chargement (jours)	4	12	26	6	
TSM (jours)	24	53	85	14	
Temps de travail					
<i>Itinéraire de remplissage</i>					
Itinéraire technique	Répétitions	%			
Chargement direct	15	83%			
Mélange préalable	2	11%			
Mixte	1	6%			
Global	18	100%			
<i>Temps de travail par chargement</i>					
Postes	Temps passé (en minutes)				
Chargement digesteur	193				
Egalisation	43				
Pose filet et tuyau	14				
Fermeture digesteur (bâchage)	79				
Déchargement	206,25				
Moyenne générale	535				
Ecart type	134				
Minimum	-				
Maximum	407				
<i>Temps de remplissage en fonction de l'itinéraire de remplissage</i>					
Itinéraires	Répétitions	Temps (en minutes)	Temps moyen (en minutes)	Temps minimum (en minutes)	Temps maximum (en minutes)
Chargement direct (15 répétitions)	15	265	177	105	68
Mélange préalable (2 répétitions)	2	400	300	191	130
Mixte (1 répétition)	1	407	407	216	91
					0
Autres postes					
<i>Déchargement</i>					
<i>Suivi et contrôle de l'installation</i>					
Postes	Humain (min/j)				
Contrôle quotidien général de l'installation	10,8				
Données techniques relatives aux digesteurs					
<i>Suivi des températures à l'intérieur des digesteurs (cf feuilles t° D1; t° D2; t° D3; t° D4)</i>					
Digesteur	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart type sur 1 chargement	
D1	21	35	43	2,0	
D2	24	37	49	1,6	
D3	26	34	39	1,7	
D4	26	37	48	3,5	
Global	24	36	45	2,2	
<i>Temps de fonctionnement des pompes</i>					
Digesteur	Moyenne (en heures/j)	m3 jus recirculé/j	Température	pH	
D1	170	22	28	7	
D2	150	20	30	6	
D3	130	17	31	7	
D4	200	26	34	7	
Global	163	21	31	7	
Commentaires					
Un suivi des températures à l'intérieur des digesteurs est NECESSAIRE. En effet, la gamme de température en procédé mésophile se situe entre 36 et 39° C. Or, dans le cas de l'installation suivie, il est fréquent que la température relevée à l'intérieur du digesteur soit hors gamme de températures optimales observées pour la digestion.					

5.6.2 Autres indicateurs

• Tableau d'évaluation des risques de nuisance

Indicateurs liés à l'environnement et aux risques de nuisance					
Choisir uniquement les réponses figurant dans les menus déroulant et ne rien toucher ailleurs.					
Thème	Postes	Choix des risques	Note sur 10	Facteur de pondération	
Environnement global	<u>Environnement du site</u>	Zone fréquentée par du public (piscine, zone commerciale...)			
	Champs		1		
	Activités industrielles		5		
	Zone fréquentée par du public (piscine, zone commerciale...)		7		
	Zone d'habitations		10		
	Sous note sur 10			7,0	0,4
	<u>Distance des voisins (m)</u>	50-100			
	50-100		10		
	100-150		9		
	150-250		8		
	250-350		7		
	350-500		6		
	500-700		5		
	700-1000		4		
	1000-1500		3		
1500-2000		2			
>2000		1			
Sous note sur 10			10,0	0,4	
<u>Situation topographique du site</u>	Plaine				
Plaine		1			
Plateau		1			
Vallée		5			
Sous note sur 10			1,0	0,2	
Note globale Environnement général sur 10			7,0	0,2	
Intégration paysagère	<u>Clôtures</u>	Simple clôture dominant			
	Simple clôture dominant		10		
	Merlon de terre dominant		5		
	Haies paysagères/bocagères dominant		1		
	Sous note sur 10			10,0	0,4
	<u>Cuves de digestion et stockage digestat</u>	Cuves enterrées			
	Cuves enterrées		1		
	Cuves semi-enterrées		5		
	Cuves non enterrées		10		
	Sous note sur 10			1,0	0,4
	<u>Bâtiments</u>	Bâtiments intégrés (bardage bois...)			
	Bâtiments intégrés (bardage bois...)		10		
	Bâtiments classiques		1		
	Sous note sur 10			10,0	0,2
	Note globale intégration paysagère général sur 10			6,4	0,2
Risques Odeurs	<u>Déchets acceptés</u>	Acceptation de déchets hautement fermentescibles			
	Acceptation de déchets hautement fermentescibles		10		
	Non acceptation de déchets hautement fermentescibles		1		
	Sous note sur 10			10,0	0,5
	<u>Stockage des déchets fermentescibles</u>	A l'extérieur sans enceinte close et hermétique			
	A l'extérieur sans enceinte close et hermétique		10		
	Sous bâtiment sans enceinte close et hermétique sans traitement de l'air		8		
	A l'extérieur en enceintes closes et hermétiques		6		
	Sous bâtiment avec enceintes closes et hermétiques sans traitement de l'air		5		
	Sous bâtiment sans enceinte close et hermétique avec traitement de l'air		3		
	Sous bâtiment avec enceintes closes et hermétiques avec traitement de l'air		1		
	Sous note sur 10			10,0	0,2
	<u>Traitement des déchets fermentescibles</u>	Traitement après 48 h			
	Traitement après 48 h		10		
	Traitement dans les 48 h		1		
	Sous note sur 10			10,0	0,2
	<u>Vents dominants</u>	En direction de voisins proches			
	En direction de voisins proches		10		
	Sens opposé des voisins proches		1		
	Sous note sur 10			10,0	0,1
	Sous note globale déchets odeurs sur 10			10,0	0,5
	<u>Post-traitement digestat (compostage)</u>	Mise en place d'une étape de compostage du digestat			
	Mise en place d'une étape de compostage du digestat		10		
	Absence d'une étape de compostage du digestat		1		
	Sous note sur 10			10,0	0,5
<u>Caractéristiques de l'activité compostage</u>	Compostage à l'air libre avec retournement				
Compostage à l'air libre avec retournement		10			
Compostage à l'air libre sans retournement		8			
Compostage réalisé en bâtiment sans aération forcée et sans confinement de l'air		6			
Compostage réalisé en bâtiment sans aération forcée et confinement de l'air		3			
Compostage réalisé en bâtiment aération forcée et confinement de l'air		1			
Sous note sur 10			10,0	0,3	
<u>Criblage du compost produit</u>	Criblage du compost				
Criblage du compost		10			
Absence de criblage		1			
Sous note sur 10			10,0	0,3	
Sous Note globale post-traitement odeur sur 10			10,0	0,5	
Note globale odeur sur 10			10,0	0,2	

Bruit			
<i>Module de cogénération</i>			
	Absence d'un module de cogénération		
	Présence d'un module de cogénération	10	
	Absence d'un module de cogénération	1	
	Sous note sur 10		1,0
<i>Précautions prises pour limiter le bruit</i>			
	Aucun équipement spécifique		
	Caisson d'insonorisation	1	
	Revêtements muraux spécifiques	3	
	Aucun équipement spécifique	10	
	Sous note sur 10		0,5
	Note globale bruit sur 10		1,0

Transport			
<i>Déchets exogènes</i>			
	Apports de déchets exogènes		
	Non apport de déchet exogène	1	
	Sous note sur 10		10,0
<i>Importance du trafic</i>			
	> 40 camions par semaine		
	> 40 camions par semaine	10	
	31 à 40 camions par semaine	8	
	21 à 30 camions par semaine	6	
	11 à 20 camions par semaine	2	
	1 à 10 camions par semaine	1	
	Sous note sur 10		10,0
<i>Type de camion</i>			
	Camion ampliroll + caisson		
	Poids lourds ou benne ordures ménagères	10	
	Camion ampliroll + caisson	5	
	Tracteur + benne	3	
	Sous note sur 10		5,0
<i>Voie d'accès</i>			
	Chemin - accès unique		
	Chemin - accès unique	10	
	Route départementale - accès unique	8	
	Nationale/voie rapide - accès unique	6	
	Chemin - accès multiple	5	
	Route départementale - accès multiple	3	
	Nationale/voie rapide - accès multiple	1	
	Sous note sur 10		1,0
	Note globale transport sur 10		7,7

Prise en compte des mesure de prévention et de communication sur l'activité auprès du grand public			
<i>Actions de communication pour sensibiliser le grand public</i>			
	Absence de mesure pour communiquer sur activité du site		
	Mises en place de mesures pour communiquer sur activité du site	1	
	Absence de mesure pour communiquer sur activité du site	10	
	Sous note sur 10		10,0
<i>Type d'actions (renseignements ne donnant pas lieu à une note, élément qualitatif)</i>			
	Création d'une cliis		
	Réunions publiques (hors études ICPE)		
	Visites pédagogiques		
	Journées portes ouvertes		
	Autres		
	Note globale "sensibilisation" sur 10		10,0

Plaintes extérieures			
<i>Existence de plaintes</i>			
	Non dépôt de plainte / non création d'association de riverains ou autres		
	Dépôts de plaintes / création d'association de riverains ou autres	10	
	Non dépôt de plainte / non création d'association de riverains ou autres	1	
	Sous note sur 10		1,0
<i>Motifs de plaintes</i>			
	Plaintes sur les odeurs		
	Plaintes sur l'augmentation des transports		
	Plaintes d'envois de déchets		
	Plaintes sur les risques d'explosion		
	Plaintes sur le bruit		
	Autres motifs		
	Sous note sur 10		1,0
	Note globale "plaintes" sur 10		1,0

Note totale	6,0	1,0
--------------------	------------	------------

Explication des couleurs pour la note finale

- Risque faible (< 5/10)
- Risque présent mais modéré (de 5/10 à 8/10)
- Risque fort (> 8/10)

• **Tableur d'évaluation des emplois directs et indirects liés à la création et à l'exploitation d'une unité de méthanisation**

Indicateurs liés à la création d'emploi

Consignes : Remplir uniquement les cellules en marron

Puissance électrique	kW
Tonnes entrantes	t/an

Poste	Sous-poste	Type de mission	Temps passés (j)	Temps passés (h)	heures/an	ETP	ETP/kW élec.	ETP/t entrantes
Conception	Bureau d'études voire développeur (études de faisabilité)	Temporaire		-	-	-	#DIV/0!	#DIV/0!
	Bureau de conseils (financement, montage juridique...)	Temporaire		-	-	-	#DIV/0!	#DIV/0!
	Assistance à maîtrise d'ouvrage	Temporaire		-	-	-	#DIV/0!	#DIV/0!
	Maître d'œuvre (inclus architecte, urbanistes et les autres sous-traitant)	Temporaire		-	-	-	#DIV/0!	#DIV/0!
Sous-total Conception				-	-	-	#DIV/0!	#DIV/0!
Sous-total Conception - Emplois permanents				-	-	-	-	-
Sous-total Conception - Emplois temporaires				-	-	-	#DIV/0!	#DIV/0!
Construction	Entreprises Terrassement	Temporaire		-	-	-	#DIV/0!	#DIV/0!
	Voiries réseau de distribution	Temporaire		-	-	-	#DIV/0!	#DIV/0!
	Equipementier process méthanisation	Temporaire		-	-	-	#DIV/0!	#DIV/0!
	Equipementier process épuration	Temporaire		-	-	-	#DIV/0!	#DIV/0!
	Motoriste	Temporaire		-	-	-	#DIV/0!	#DIV/0!
	Maçon/construction	Temporaire		-	-	-	#DIV/0!	#DIV/0!
Sous-total Construction				-	-	-	#DIV/0!	#DIV/0!
Sous-total Construction - Emplois permanents				-	-	-	-	-
Sous-total Construction - Emplois temporaires				-	-	-	#DIV/0!	#DIV/0!
Exploitation	Suivi et fonctionnement quotidiens (exploitation, visites...)	Permanent				-	#DIV/0!	#DIV/0!
	Maintenance moteur	Permanent				-	#DIV/0!	#DIV/0!
	Prétraitement des substrats (déconditionnement ...) sur sites externes	Permanent				-	#DIV/0!	#DIV/0!
	Transport des substrats	Permanent				-	#DIV/0!	#DIV/0!
	Transport du digestat	Permanent				-	#DIV/0!	#DIV/0!
	Centre de gestion	Permanent				-	#DIV/0!	#DIV/0!
Sous-total Exploitation						-	#DIV/0!	#DIV/0!
Sous-total Exploitation - Emplois permanents						-	#DIV/0!	#DIV/0!
Sous-total Exploitation - Emplois temporaires						-	-	-
Total						-	#DIV/0!	#DIV/0!
Total permanent						-	#DIV/0!	#DIV/0!
Total temporaire						-	#DIV/0!	#DIV/0!

Hypothèses	
1 ETP	1820 h/an
Durée d'exploitation	15 ans

L'estimation des emplois liés à la mise en place et à l'exploitation du site ne prend pas en compte les structures d'accompagnement décrites ci-dessous ainsi que tout le travail d'ingénierie lié au développement des process de méthanisation, épuration et moteur. La fabrication de ces équipements n'est également pas intégrée.

Structures d'accompagnement :

- Organismes consulaires (chambre d'agriculture, ademe...)
- Administration (DREAL, EDF, GRDF/GRT...)
- Association
- Agence de l'Etat, Etat, Région, département, Europe (instruction dossiers subvention)

• **Tableur de bilan économique**

Le tableur proposé a été réalisé par Aile. Il permet de recueillir les éléments de base servant à réaliser les analyses économiques (récapitulatif des investissements, des charges et des recettes). Il servira de base aux analyses réalisées à partir des formules définies dans le guide. Il figure en format Excel et est annexé au guide.

6. Glossaire

Ce glossaire reprend la plupart des termes techniques utilisés en donnant une explication succincte et pédagogique pour chacun d'eux.

Acides gras volatils - AGV: intermédiaires de fermentation, résidus des actions d'hydrolyses et d'acidogénèse de la matière organique. L'acide acétique (C2) est majoritaire puis les acides propionique et butyrique, précurseurs d'un dysfonctionnement de digesteur.

Biogaz : mélange de CH₄ et CO₂. Plus la teneur en CH₄ est élevée, plus le PCI du biogaz est important ; généralement le taux de CH₄ se situe entre 55 et 70%v/v.

Charge organique - CO : représente la charge appliquée à un digesteur définie comme le flux de matière organique entrant dans le réacteur. La charge organique est ramenée à l'unité de volume de réacteur ; elle est exprimée en kg MO/m³ de réacteur/jour.

Composés traces organiques - CTO : ils comprennent de nombreuses familles de molécules. Dans le cadre de la norme AFNOR NFU 44 051, seule la famille des Hydrocarbures aromatiques Polycycliques Aromatiques est recherchés dont le fluoranthène, le benzo(a)fluoranthène et le benzo(a)pyrène.

Demande chimique en oxygène ou DCO : la DCO est une mesure indirecte de la concentration en matière organique ; elle est exprimée en mg d'O₂/l.

Éléments traces métalliques - ETM : dans le cadre de la norme NFU 44 051, 9 E.T.M. sont recherchés : Arsenic (As), Cadmium (Cd), Chrome (Cr), Mercure (Hg), Nickel (Ni), Plomb (Pb), Sélénium (Se), Zinc (Zn) et le Cuivre (Cu).

Excédent brut d'exploitation - EBE est un indicateur économique classique permettant de mesurer la ressource financière disponible après paiement des charges de fonctionnement, notamment les salaires. Les amortissements ne sont pas extraits du calcul.

Indice de stabilité biologique - ISB est un indicateur de stabilité de la matière organique permettant d'évaluer le degré de maturité du compost et l'efficacité du procédé.

Installation classée pour la protection de l'environnement - ICPE : réglementation française en matière d'environnement définit le régime ICPE dans la loi du 76-663 du 19 juillet 1976.

Matière brute - MB : quantité totale de la matière intégrant la matière sèche et l'eau.

Matière sèche - MS : la matière sèche d'un échantillon est obtenue par évaporation de l'eau dans une étuve à 105°C jusqu'à l'obtention d'un poids constant.

Matière organique -MO, Matière sèche volatile - MSV : la matière organique d'un échantillon est obtenue par calcination à 550°C du résidu sec d'un produit.

Méthane : c'est un hydrocarbure de formule brute CH₄. C'est le plus simple composé de la famille des alcanes. C'est le principal constituant du biogaz issu de la fermentation de matières organiques animales ou végétales en l'absence d'oxygène. Il est fabriqué par des bactéries méthanogènes qui vivent dans le digesteur. C'est le composé majoritaire du gaz naturel et à ce titre le seul constituant rigoureusement identique au composé d'origine fossile. C'est le composé qui est valorisé énergétiquement dans le biogaz. Son PCI est égal à 9,96 kWh/Nm³.

Normo m³ ou Nm³ : volume de gaz ramené aux conditions standards de pression et de température (0°C, 1bar)

pH : il s'agit d'un paramètre essentiel du pilotage d'un réacteur de méthanisation car l'écosystème anaérobie est extrêmement sensible aux variations du pH et en particulier sur les populations méthanogènes. Le pH optimum d'un digesteur se situe au-delà de la valeur 7.

Potentiel méthanogène : Le potentiel méthanogène représente la quantité de biogaz et de méthane (CH_4) pouvant être produite par un substrat. Il est exprimé en $\text{NiCH}_4/\text{kgMO}$. Le test de potentiel méthanogène ou BMP (Biochemical Methane Potential), permet de déterminer la production maximale de biogaz d'un échantillon de biomasse. Au cours de ce test, on mesure la vitesse de production de biogaz (cinétique de fermentation) et la composition en méthane (CH_4) et dioxyde de carbone (CO_2). Ce test peut être réalisé sur différents échantillons de biomasse : effluents d'élevages (lisiers, fientes, fumiers etc.), déchets agroalimentaires (résidus ligno-cellulosiques, graisses, boues etc.), déchets de collectivités (biodéchets, boues de STEP etc.), cultures énergétiques (plante entière, ensilage, foin etc.) ainsi que tout autre résidu ou sous-produit organique.

Pouvoir calorifique inférieur - PCI : désigne la quantité de chaleur dégagée par la combustion d'une unité de masse du produit (1 kg) ou de volume (Nm^3).

Pouvoir tampon et alcalinité : le pouvoir tampon d'un digesteur est mesuré par son taux d'alcalinité (laquelle est dépendante majoritairement de la concentration en bicarbonates HCO_3^-).

Rendement volumique : représente la vitesse de la réaction de production de biogaz (indirectement la vitesse de la réaction biologique). Le rendement volumique exprime la vitesse de production de biogaz ramenée au volume de réacteur (m^3) et à l'unité de temps (jour).

Temps de séjour - TS ou temps de rétention hydraulique - TRH : le temps de séjour est un paramètre couramment utilisé pour estimer le temps moyen de séjour d'un produit dans un réacteur.

Unité fonctionnelle – UF : Une unité fonctionnelle constitue un ensemble de matériels et d'actions relatifs à une étape du fonctionnement de l'installation de méthanisation.

Valeur actuelle nette - VAN : est un indicateur économique qui mesure le flux de trésorerie actualisé représentant l'enrichissement créé par un investissement.

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie et du ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.



ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr