

Production et distribution de biogaz

Santé et sécurité des opérateurs



C4H5O2_5 2/ 9/99 THERMC 4H 50 2 0G 300.000 5000.000 1392.000 1
1.64121890E+01 1.20184883E-02-4.40468566E-06 7.30124728E-10-4.42784365E-14 2

**PRODUCTION ET DISTRIBUTION DE BIOGAZ
SANTÉ ET SÉCURITÉ DES OPÉRATEURS**

RAPPORT FINAL

juin 2013

**E. GARDEUR-ALGROS, T. CHESNOT,
A.-M. CHARISSOU, T. PARIS, C. BRONNER**
– Eurofins Expertises Environnementales

Créée en 1989 à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD – REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement – est le fruit d'une triple coopération entre industriels, pouvoirs publics et chercheurs. L'objectif principal de RECORD est le financement et la réalisation d'études et de recherches dans le domaine des déchets et des pollutions industrielles.

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

Avertissement :

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

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

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :
RECORD, Production et distribution de biogaz. Santé et sécurité des opérateurs, 2013, 223 pages, n°11-0673/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr

© RECORD, 2013

SOMMAIRE

SOMMAIRE	3
A/ INTRODUCTION	6
1. Contexte général	7
2. Objectifs et champs de l'étude	7
B/ ORGANISATION DE L'ETUDE	9
3. Recherche bibliographique	10
3.1 Principaux organismes menant des travaux sur le sujet de la méthanisation et de la production / valorisation du biogaz – exemples de documents consultés.....	10
3.2 Bases de données d'articles scientifiques et moteurs de recherche généralistes consultés – exemple de documents utilisés.....	12
3.3 Bases de données recensant accidents / incidents dans des installations de production de biogaz	13
3.4 Statistiques des acteurs en charge du suivi de la santé des travailleurs	14
3.5 Valeurs limites d'exposition professionnelle et valeurs toxicologiques de référence utilisées	14
4. Interrogation d'experts	15
5. Présentation des données collectées et analysées	16
C/ PRINCIPALES INFORMATIONS DE BASE RELATIVES A LA METHANISATION, PRODUCTION, VALORISATION DE BIOGAZ	17
6. Principales définitions et notions relatives à la méthanisation, production de biogaz	18
6.1 Principales définitions et notions.....	18
6.2 La méthanisation dans les installations	19
7. Principaux aspects réglementaires des installations de production de biogaz et de la surveillance des opérateurs	21
7.1 Principaux aspects réglementaires s'appliquant aux installations de méthanisation et aux ISDND21	
7.2 Principales informations relatives à la surveillance de la santé et sécurité des opérateurs en France.....	24
8. Etat des lieux des installations de méthanisation en France	26
D/ IDENTIFICATION DES POINTS CRITIQUES VIS-A-VIS DE LA SANTE, SECURITE DES OPERATEURS DES FILIERES DE PRODUCTION, VALORISATION DE BIOGAZ	35
9. Méthodologie d'étude	36
9.1 Principes et étapes de la démarche HACCP	36
9.2 Applications de certaines étapes HACCP à l'étude des filières de production, valorisation de biogaz	38
10. Synthèse des données par filière étudiée	52
10.1 Description de la filière en France (source : ATEE, Club Biogaz, 2011)	52
10.2 Principaux textes / dispositifs réglementaires	52
10.3 Données sur les ATMP (Accidents du Travail – Maladies Professionnelles).....	52
10.4 Données sur les accidents/incidents recensés	52
10.5 Données sur les postes de travail	52
10.6 Données sur la composition des substrats et digestats ; effets de la digestion sur les micropolluants inorganiques, organiques et microorganismes pathogènes	52
10.7 Données sur la composition chimique des biogaz.....	52
10.8 Valeurs limites d'exposition professionnelles (VLEP) et valeurs toxicologiques de référence (VTR) de quelques substances	52
10.9 Données sur la composition microbiologique des biogaz.....	52
10.10 Diagramme de fonctionnement des installations / identification de points critiques pour la santé/sécurité des opérateurs.....	52
10.11 Bibliographie citée dans cette synthèse.....	52

11. Discussion, conclusion	180
BIBLIOGRAPHIE.....	188
ANNEXES	193
Annexe 1 : Principales définitions et notions relatives à la méthanisation, production de biogaz.....	194
Annexe 2 : Réglementation liée aux filières de production de biogaz	210
Annexe 3 : Informations complémentaires relatives aux filières en digesteur.....	217
Annexe 4 : Discussion relative au cas particulier de la filière de valorisation en biométhane.....	222

RESUME

La production et valorisation de biogaz à partir de différents substrats d'origines agricole, urbaine et industrielle sont au cœur d'enjeux de développement durable en permettant, la production d'énergie renouvelable, la diminution des gaz à effets de serre et le traitement de déchets.

En 2011, en France, environ 200 installations de méthanisation étaient opérationnelles. De plus, environ 300 installations de stockage de déchets non dangereux (ISDND) produisent également du biogaz dont environ 90 qui le valorisent. Du fait de contextes réglementaires et de dispositifs de soutiens économiques favorables, le nombre de sites de méthanisation croît et les filières se diversifient, en terme de substrats / déchets traités, procédés de méthanisation et voies de valorisation. Aussi, il paraît pertinent de s'intéresser à la santé et à la sécurité des travailleurs potentiellement exposés à divers dangers lors des opérations de suivi, maintenance ou en cas de dysfonctionnement des installations.

Dans un premier temps, au travers d'une recherche bibliographique et d'une interrogation d'experts, des données telles que la composition des substrats, digestats, biogaz, des retours d'expérience relatifs aux incidents / accidents recensés ou encore aux accidents du travail et maladies professionnelles des opérateurs ont par exemple été recherchées.

Dans un second temps, une identification de points critiques vis-à-vis de la santé et sécurité des opérateurs intervenant dans ces filières a été menée en mettant en œuvre certaines étapes d'une démarche HACCP (analyses des dangers - points critiques pour leur maîtrise).

Cinq filières (méthanisation agricole à la ferme et centralisée - méthanisation des boues urbaines - méthanisation des ordures ménagères - méthanisation industrielle en particulier dans les secteurs agroalimentaires, de la papeterie et de la chimie - production de biogaz en ISDND) ont ainsi été étudiées et ont fait l'objet de synthèses dédiées. Celles-ci résumant les informations collectées et, présentent un diagramme de fonctionnement illustrant les étapes de production, valorisation du biogaz. Les points critiques identifiés et hiérarchisés sont représentés sur ces diagrammes et sont associés aux phases de fonctionnement, maintenance ou dysfonctionnement.

Les résultats obtenus ont pour objectif de sensibiliser les acteurs aux risques potentiels et à l'attention qu'ils doivent porter pour leur maîtrise et/ou pour leur évaluation plus approfondie et adaptée à chaque site. Cependant ils ne peuvent en aucun cas être considérés comme le résultat d'une évaluation des risques professionnels ou d'une étude de dangers.

MOTS CLES : biogaz, biométhane, méthanisation, valorisation, santé, sécurité, opérateurs, points critiques

SUMMARY

Production and recovery of biogas from different substrates of agricultural, urban and industrial issues are at the heart of sustainable development for the production of renewable energy, reducing greenhouse gases and waste treatment.

In 2011, in France, about 200 biogas plants were operational. Moreover, about 300 ISDND (non-hazardous waste storage or landfill sites) also produce biogas, about 90 that of them valorize it.

Because of regulatory contexts and favorable measures to bolster the economy, the number of sites is growing and anaerobic pathways are diversifying in terms of substrate / treated waste, anaerobic digestion processes and ways of valorization. So it seems appropriate to focus on the health and safety of workers potentially exposed to various hazards during operations of monitoring, maintenance or malfunction of facilities.

First, through a literature search and a query of experts, data such as substrate, digestate and biogas composition, information feedback on reported incidents / accidents or accidents at work and illnesses of operators have been sought.

Then, critical points concerning the health and safety of operators in these sectors were identified by implementing some steps of HACCP (Hazard Analysis - Critical Control Points).

Five sectors (agricultural methanization in farms and in centralized plants - methanization of urban sewage sludge - methanization of household garbage - industrial methanization in sectors like food industry, stationery and chemistry - biogas production from landfill sites) have been studied and led to dedicated syntheses. They summarize the collected informations and present an operating diagram indicating the different stages of biogas production and recovery. On this diagram, critical points are identified, assessed according to their importance and are associated with phases of maintenance operation, or malfunction.

The results are intended to educate the actors to potential risks and attention they need to focus to control them and / to improve their evaluation, adapted for each site. However, they cannot in any circumstances be regarded as the result of an occupational risk assessment or hazards study

KEY WORDS : biogas, biomethane, methanization, recovery, health, safety, operators, critical points

A/ INTRODUCTION

1. Contexte général

Depuis les années 80, l'état doit faire face à une forte progression des quantités de déchets générées par nos habitudes de vie et nos activités. Les déchets dits « organiques » produisent lors de leur décomposition d'énormes quantités de méthane et de gaz carbonique. Les gaz émis contribuent à l'augmentation de l'effet de serre. La politique nationale actuelle de gestion des déchets préconise notamment leur réduction, leur récupération et leur valorisation.

La maîtrise de la méthanisation apparaît comme une solution intéressante car elle permet une valorisation énergétique des déchets organiques tout en répondant aux préconisations écologiques de réduction des quantités de méthane rejetées dans l'atmosphère.

En effet, le méthane contenu dans le biogaz produit et capté permet d'éviter des émissions à l'atmosphère par exemple lors du stockage du lisier ou des déchets ménagers. De plus la valorisation énergétique du biogaz produit se substitue à l'usage d'énergies fossiles.

La méthanisation et donc la production de biogaz se fait à partir de différentes sources de matières organiques (matières organiques résiduelles issues des secteurs agricoles, déchets ménagers, industriels, boues et rejets urbains) définissant ainsi différentes filières.

Le biogaz produit peut :

- ❑ être brûlé en torchère Ceci permet de transformer le méthane qui possède un fort impact sur l'effet de serre, en dioxyde de carbone dont les effets sont moindres,
- ❑ être valorisé énergétiquement. Le biogaz peut effectivement être i) utilisé pour produire de l'électricité et/ou de la chaleur et ii) être transformé en biocarburant pour l'alimentation de véhicules roulant au gaz naturel (GNV), ou pour être injecté dans les réseaux de gaz naturel (on parle alors de biométhane).

D'après le rapport du Club Biogaz de l'ATEE (2011), 197 sites de méthanisation (identifiés grâce à la base de données SINOE de l'ADEME) sont en fonctionnement et, 45 sont en cours de construction ou rénovation en 2011.

Ces données ne concernent pas les sites de production en ISDND. Pour ceux-ci, l'enquête ITOM est actuellement en cours de révision afin de dresser un état des lieux à jour de la filière. Les dernières données disponibles datent de 2008 : 301 installations produisaient alors du biogaz (ADEME et GrDF, 2010).

D'ici à 2020, la méthanisation doit contribuer à atteindre l'objectif du Grenelle I de l'environnement de 23% d'énergies renouvelables. De même le plan européen NREAP (National Renewable Energy Action Plans) de 2010 demande qu'en 2020, 27 % de l'électricité soit renouvelable et que dans les transports, 10 % de la consommation soient issus d'énergies renouvelables. En parallèle, les gaz à effet de serre doivent être réduits de 3 % par an selon le Plan Climat et le Grenelle I. Ceci passe donc par la non émission de biogaz à l'atmosphère et par la valorisation énergétique de celui-ci.

Pour répondre à ces objectifs et dans un contexte de parution de i) l'arrêté du 19 mai 2011 modifié fixant de nouvelles conditions d'achat de l'électricité produite par les installations qui valorisent le biogaz, et ii) l'arrêté du 23 novembre 2011 modifié fixant les conditions d'achat du biométhane injecté dans les réseaux de gaz naturel, le nombre de sites de production de biogaz va probablement augmenter tandis que les filières de production se diversifieront (mise en place de nouveaux procédés, prise en compte de nouveaux types de déchets).

A ce jour, il semble donc important de pouvoir évaluer si des risques potentiels sont à craindre pour les opérateurs des filières de production et valorisation de biogaz. En effet, tout au long des étapes de la filière de production et de mise à disposition du biogaz, les opérateurs peuvent être exposés à divers dangers associés à l'installation elle-même, aux matières intrantes, au biogaz produit ou aux digestats. Ces risques et dangers sont d'ordre physique, chimique ou biologique. Des nuisances (bruit, inconfort au poste de travail, nuisances olfactives...) peuvent également survenir et perturber l'opérateur pendant son travail.

2. Objectifs et champs de l'étude

L'étude vise à recenser et synthétiser les données relatives à la santé et à la sécurité des opérateurs des filières de production, valorisation du biogaz.

Il s'agit au travers d'une recherche bibliographique et d'une interrogation d'experts **d'identifier les points critiques** de ces filières vis-à-vis des différents dangers potentiels.

Il ne s'agit donc pas d'évaluer les risques proprement dits au sein des filières mais bien, d'identifier les étapes au cours desquelles une attention particulière devrait être portée à l'évaluation et à la gestion de ces risques potentiels. L'objectif est la **sensibilisation des acteurs**.

Même si le contenu de l'étude peut s'apparenter à certains moments à une évaluation des risques, ce contenu reste global et ne peut être utilisé comme résultat d'une évaluation des risques professionnels dans une entreprise ou sur un site.

Les filières visées par cette étude sont les suivantes :

- Méthanisation agricole : installation à la ferme et installation centralisée,
- Méthanisation des boues de stations d'épuration (STEP) urbaines,
- Méthanisation des ordures ménagères (OM),
- Méthanisation industrielle, (ex : industries agroalimentaires, papeteries, industries chimiques),
- Production de biogaz en installation de stockage des déchets non dangereux (ISDND).

L'objectif principal de cette étude est d'identifier les informations liées spécifiquement à la production / valorisation du biogaz. *Les risques liés aux autres activités, étapes au sein des installations (ex : traitement des lixiviats dans les ISDND) ne sont donc qu'abordés plus succinctement.*

Par ailleurs, les impacts environnementaux (ex : pollution du milieu aquatique) ne font pas partie du champ de l'étude. L'objet n'est pas non plus spécifiquement les risques industriels, ceux-ci étant définis comme des événements accidentels se produisant sur un site industriel mettant en jeu des produits et/ou des procédés dangereux et entraînant des conséquences pour le personnel, les riverains, les biens et l'environnement (INRS, 2008). Seuls les risques professionnels, concernant donc les impacts sur les salariés sont considérés ici.

B/ ORGANISATION DE L'ETUDE

Cette étude a fait l'objet d'une recherche bibliographique (cf. section 3/). Des experts dont des membres du comité de suivi de cette étude RECORD ont aussi été sollicités et quelques visites de sites ont été effectuées (cf. section 4/). La section 5/ indique comment les données ainsi collectées et analysées sont présentées dans la suite du rapport.

3. Recherche bibliographique

Le sujet de la méthanisation est actuellement au cœur d'enjeux de développement durable et est très étudié par un certain nombre d'organismes français et internationaux.

Une première base documentaire a donc été constituée par les synthèses, études produites par ces acteurs majeurs menant des travaux sur différents aspects (techniques, économiques, ...) de cette problématique (cf. 3.1/).

Par ailleurs des recherches dans des moteurs de recherche généralistes (Google) et bases de données d'articles scientifiques ont complété cette base (cf. 3.2/).

L'interrogation de bases spécifiques (cf. 3.3/) ou la consultation de statistiques particulières (cf. 3.4/) ont été aussi menées. Pour certaines substances, les valeurs d'exposition professionnelles actuellement en vigueur en France (et des valeurs toxicologiques de référence) ont été recherchées (cf. 3.5/).

3.1 Principaux organismes menant des travaux sur le sujet de la méthanisation et de la production / valorisation du biogaz – exemples de documents consultés

La liste des organismes français (organismes publics, associations ou autres) travaillant sur le sujet du biogaz et ayant élaboré des rapports consultés dans le cadre de cette étude est la suivante :

- L'**ADEME** soutient de nombreux projets de méthanisation en France et est à l'origine de différents guides et études sur la méthanisation, les substrats et les digestats (ex : rapport ADEME, 2011 relatif à la « Qualité agronomique et sanitaire des digestats »). L'ADEME a également développé la base de données SINOE : Système d'Information et d'Observation de l'Environnement qui permet de réunir toutes les données sur les déchets du territoire français (<http://www.sinoe.org/>). L'ADEME est aussi le maître d'ouvrage des enquêtes MODECOM (Campagne nationale de caractérisation des ordures ménagères) et ITOM (études portant sur toutes les installations de traitement qui accueillent des déchets collectés dans le cadre du service public d'élimination des déchets).

L'ADEME est particulièrement impliquée dans le développement de la filière de méthanisation agricole. Elle est notamment à l'origine :

- du rapport « Le cadre réglementaire et juridique des activités agricoles de méthanisation et de compostage » (2012 a),
- du rapport « Expertise de la rentabilité des projets de méthanisation rurale » (2010 a),
- du guide pratique « La méthanisation à la ferme » (2011) (réalisé conjointement avec les associations AILE, SOLAGRO et TRAME)
- de l'étude relative au « du suivi expérimental de l'installation de méthanisation du GAEC du Bois Joly » qui constitue une des seules études qui évalue notamment la durée des opérations nécessaires au suivi et à la maintenance de telles installations (ADEME, 2010 b).

A noter qu'un appel d'offre intitulé « Suivi technique, économique, environnemental et social d'installations de méthanisation à la ferme, centralisées, industrielles et en station d'épuration » lancé par l'ADEME en 2011 devrait aboutir prochainement à disposer de ce type de données pour d'autres installations et filières.

- L'**INERIS** est aussi un acteur majeur et a produit un certain nombre de rapports scientifiques et de synthèse, suite à des saisines du Ministère en charge de l'Environnement. Ces études ont notamment porté sur :

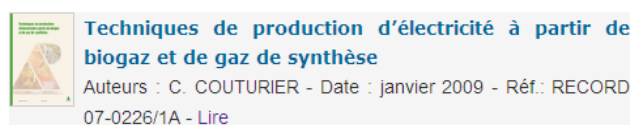
- la caractérisation des biogaz, (2002),
- l'étude comparative des dangers et des risques liés au biogaz et au gaz naturel (2006),
- des travaux préliminaires à l'évaluation des risques sanitaires liés à l'injection de biogaz issu de boues de STEP dans un réseau de gaz naturel (2009),
- les risques et règles de sécurité des installations de méthanisation agricole (2008 a et 2009),

- ❑ un retour d'expérience des accidents/incidents dans les installations de méthanisation (2012 a).
 - ❑ l'étude comparative de la qualité de composts et digestats issus de la fraction fermentescible d'ordures ménagères collectées séparément ou en mélange (2012 b).
- ❑ L'**ANSES** (ex : AFSSET) est à l'origine du travail d'experts « Evaluation des risques sanitaires liés à l'injection de biogaz dans le réseau de gaz naturel » en 2008,
- ❑ L'**INRS**, organisme de référence au cœur du dispositif de prévention des risques professionnels, est à l'origine de nombreux documents et études en lien avec les risques physiques, chimiques et biologiques encourus par les salariés.

A ce jour, aucun document traitant de la santé des opérateurs des filières de méthanisation, production de biogaz n'a été élaboré par l'INRS. Néanmoins, un travail de l'INRS conjointement avec les DIRECCTE des régions Pays de la Loire et Bretagne, relatif à la méthanisation agricole, est actuellement en cours de finalisation et devrait être édité en 2013 (source : communication personnelle, Jérôme Beillevaire, DIRECCTE Pays-de la Loire).

Par ailleurs, une autre équipe de l'INRS doit débiter une étude en 2013 qui portera également sur la santé et sécurité des opérateurs dans plusieurs filières. Une phase bibliographique suivie d'une phase métrologique seront menées (source : communication personnelle, Philippe Ferrari, INRS).

- ❑ L'association **RECORD** est à l'origine d'études précédentes sur le sujet du biogaz, axées principalement sur des aspects techniques des procédés et économiques :



RECORD mène également des études sur les aspects santé. Peuvent ainsi être mentionnées les études suivantes consultées dans le cadre de cette étude :



- ❑ L'**ATEE** : Association Technique Energie Environnement avec en particulier son **Club Biogaz** <http://biogaz.atee.fr/>.

Le Club Biogaz rassemble les principaux acteurs français concernés par le biogaz :

- ❑ industriels et collectivités utilisateurs de cette technique,
- ❑ fournisseurs d'énergie participant à la chaîne de valorisation,
- ❑ fournisseurs d'équipements nécessaires à la fabrication, au captage, à l'analyse et l'épuration, à l'utilisation du biogaz,
- ❑ ingénieries, bureaux d'études,
- ❑ établissements financiers et assurances,

- ❑ établissements publics, associations, universités.

L'objectif du Club Biogaz ATEE est de promouvoir le développement des différentes filières de production et de valorisation

Le Club Biogaz a notamment dressé en 2011 un état des lieux de la filière méthanisation en France.

- ❑ l'**AILE** : Association d'Initiatives Locales pour l'Energie et l'Environnement <http://www.aile.asso.fr/>
- ❑ la **RAEE** : Rhônealpnéergie - Environnement <http://www.raee.org/>
- ❑ la **FNADE** : Fédération Nationale des Activités de la Dépollution et de l'Environnement <http://www.fnade.org/>
- ❑ **SOLAGRO** <http://www.solagro.org/>
- ❑ l'**AAMF** : Association des Agriculteurs Méthaniseurs de France <http://pardessuslahaie.net/agriculteurs-methaniseurs>
- ❑ l'**EDEN** : association Energie Développement Environnement www.eden-enr.org
- ❑ le réseau **TRAME** : <http://www.pardessuslahaie.net/frontend.php/trame/814>
- ❑ l'association **METHEOR** : Association pour la Méthanisation Ecologique des déchets : <http://www.metheor.org/>

Le site de l'**Agence Internationale de l'Energie** (IEA) a également été consulté. L'IEA dispose d'un groupe de travail (Task 37) qui étudie le traitement biologique de la fraction organique de différents déchets municipaux, industriels, agricoles. De nombreuses publications et présentations de workshop sont disponibles. <http://www.iea-biogaz.net/index.html>. Les aspects traités concernent principalement les procédés de méthanisation et des données économiques.

3.2 Bases de données d'articles scientifiques et moteurs de recherche généralistes consultés – exemple de documents utilisés

En interrogeant les bases de données (Medline, Science Direct) et moteurs de recherche généraliste (Google) l'objectif était de compléter la base documentaire issue des organismes cités précédemment et, de cibler plus spécifiquement les études ayant porté sur les aspects santé et sécurité des opérateurs.

Des données relatives aux dangers en particulier chimiques et biologiques dans les matières entrantes et sortantes des filières de méthanisation (substrats, digestats, biogaz) ont également été recherchées ainsi que des résultats d'enquêtes épidémiologiques.

Les travaux menés mentionnent principalement les risques liés aux zone ATEX et l'émission de l'hydrogène sulfuré (H₂S) mais abordent peu l'ensemble des autres dangers potentiels, y compris dans les pays où la méthanisation est plus largement développée qu'en France (Allemagne, Suisse, Autriche, Pays-Bas). L'interrogation de différents acteurs du domaine à ce sujet confirme cette information.

Sont cités ci-dessous quelques documents et projets de recherche utilisés / consultés dans le cadre de cette étude. La bibliographie complète est disponible en fin de rapport.

- ❑ projet Agrobiogaz : <http://www.agrobiogaz.eu/> (An integrated approach for biogas production with agricultural waste)
- ❑ projet Biogasmax : <http://www.biogasmax.fr/>
- ❑ rapport « Evaluation des risques sanitaires des filières d'épandage des boues des stations d'épuration - Base scientifique de l'évaluation des risques sanitaires liés aux agents pathogènes » de l'ADEME *et al.* (2007). Ce rapport fournit notamment un scénario d'exposition d'un agriculteur épandant des boues dans un champs,

- ❑ rapport « Impacts environnementaux de la gestion biologique des déchets. Bilan des connaissances » de l'ADEME (2005) fournissant des données moyennes françaises de teneurs en micropolluants dans différents substrats pouvant être méthanisés,
- ❑ rapport « Programme de recherche de l'ADEME sur les émissions atmosphériques du compostage – Connaissances acquises et synthèse bibliographique » de l'ADEME (2012 b),
- ❑ rapport « L'évaluation des effets sanitaires liés à la gestion des déchets ménagers et assimilés (DMA). Rapport scientifique » de l'Observatoire Régional de la Santé en Rhône-Alpes (ORS, 2010) synthétisant les études épidémiologiques réalisées notamment chez de professionnels de la gestion des déchets (centre de compostage, collecte et tri, incinération et stockage des déchets) et, dans lesquels les auteurs attribuent des niveaux de preuve entre l'exposition et les effets sanitaires, en fonction des données disponibles et de leur qualité,
- ❑ rapports de l'INRS :
 - « Endotoxines en milieu de travail. II. Exposition, risques, prévention. Dossier médico-technique » en 2011,
 - « Approche des risques chimiques et microbiologiques dans le secteur du compostage. Hygiène et sécurité du travail. ND 2336 – 22 » en 2010,
 - « Les risques biologiques en milieu professionnel – Hygiène et sécurité du travail – cahiers de notes documentaires – PR 28-207 » en 2007,
- ❑ rapport « Les bioaérosols en milieu de travail : guide d'évaluation, de contrôle et de prévention », guide technique de l'IRSST : Institut (canadien) de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail » (Goyer *et al.* 2001),
- ❑ rapport « Synthèse des connaissances sur les impacts environnementaux et les risques sanitaires de l'incinération, de la méthanisation, et des centres de stockage » de Bio-tox (2009),
- ❑ rapport « Compost et digestat en Suisse » de l'OFEV (Office Fédéral de l'Environnement, 2007).

3.3 Bases de données recensant accidents / incidents dans des installations de production de biogaz

Dans un but de recensement des accidents / incidents survenus dans les filières de méthanisation, production de biogaz, les bases de données suivantes ont été interrogées à l'automne 2012 :

- ❑ la base **ARIA** (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents) qui recense les incidents ou accidents qui ont, ou auraient, pu porter atteinte à la santé ou la sécurité publiques, l'agriculture, la nature et l'environnement. Elle est gérée par le BARPI (Bureau d'Analyse des risques et Pollutions Industriels) au sein de la Direction Générale de la Prévention des Risques du Ministère du développement durable. <http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/index.html> ; consulté le 02/10/2012,
- ❑ la base **EPICEA**, source de données nationales gérée par l'INRS qui rassemble plus de 18 000 cas d'accidents du travail survenus, depuis 1990, à des salariés du régime général de la Sécurité sociale. Ces accidents sont mortels, graves ou significatifs pour la prévention. <http://www.inrs.fr/accueil/produits/bdd/epicea.html> ; consulté le 02/10/2012,
- ❑ la base **COLCHIC** également gérée par l'INRS, non disponible en ligne mais dans laquelle des personnes de l'INRS ont réalisé des requêtes sur notre demande. COLCHIC constitue une base collectant les résultats d'analyses réalisées notamment en ambiance de travail par les laboratoires des CARSAT.

Les mots-clés employés ont été en particulier « biogaz », « méthanisation » « digestion anaérobie » mais ils ont aussi été complétés par des recherches sur des dangers particuliers (« hydrogène sulfuré », « H₂S », « ammoniac », « NH₃ », ...).

Dans ARIA un certain nombre d'événements, présentés dans les fiches par filière (en section 10/), sont effectivement recensés.

Quelques accidents sont aussi disponibles dans la base EPICEA (en particulier pour les secteurs des ordures ménagères).

En revanche, d'après l'INRS, aucune donnée relative à des installations de méthanisation, production de biogaz n'est renseignée dans la base COLCHIC. Des recherches plus affinées auraient peut-être permis de disposer de résultats mais l'interrogation de la base ayant été effectuée par l'INRS (base non disponible), nous n'avons pas demandé la réalisation de requêtes complémentaires.

3.4 Statistiques des acteurs en charge du suivi de la santé des travailleurs

Les statistiques des acteurs du suivi de la santé au travail, à savoir de la CNAMTS (Caisse Nationale de l'Assurance Maladie des Travailleurs Salariés) et de la MSA (Mutualité Sociale et Agricole) ont également été consultées afin d'identifier les types d'accidents du travail et maladies survenant dans les secteurs pouvant être concernés par la production / valorisation de biogaz et, d'en connaître les principales causes.

Aucune statistique ne mentionne, à ce jour, la méthanisation ou la production / valorisation de biogaz.

Les données suivantes ont été prises en compte (selon les filières) :

- données nationales de la MSA (2011) relatives aux accidents du travail et maladies professionnelles des non-salariés agricoles de 2005 à 2007,

(Rapport disponible en ligne : http://referencessante-securite.msa.fr/files/SST/SST_1301927284760_AT_ET_MP_DES_NS_AGRICOLES_2005_2007.pdf ; consulté le 18/12/2012)

- statistiques en termes d'accidents du travail et maladies professionnelles de la CNAMTS concernant globalement les 9 branches d'activités étudiées et, concernant les secteurs d'activités suivants :
 - « autres services d'assainissements - 900 AA » dont *a priori* le secteur du traitement des eaux usées en STEP,
 - « entreprises de traitement des ordures ménagères et des déchets industriels et commerciaux banals – code 900 BC » dont *a priori* le secteur des ISDND et le traitement des ordures ménagères.

(Statistiques disponibles en ligne : Statistiques par numéro de risque ou par code APE-NAF. <http://www.risquesprofessionnels.ameli.fr/statistiques-et-analyse/sinistralite-atmp.html> ; consulté le 19/04/2013).

3.5 Valeurs limites d'exposition professionnelle et valeurs toxicologiques de référence utilisées

Dans la démarche appliquée dans le cadre de cette étude et décrite en section 9.2/, s'agissant d'un travail portant sur la santé et sécurité des opérateurs professionnels, les **valeurs limites d'exposition professionnelles (VLEP)** actuellement applicables, ont été recherchées pour les substances identifiées comme pouvant constituer des dangers dans les filières de méthanisation.

Ces VLEP sont disponibles dans la brochure de l'INRS (2012 a) : « Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France. ED 984. Aide-mémoire Technique ». Ces valeurs sont publiées par le Ministère du Travail et peuvent être (selon les substances) :

- indicatives,
- réglementaires indicatives,
- réglementaires contraignantes.

A noter que différentes VLEP sont distinguées (INRS, 2012 a) :

- des VLCT : Valeurs Limites Court Terme destinées à protéger des effets des pics d'exposition. Elles se rapportent en général, à une durée de référence de 15 minutes,
- des VME : Valeurs limites Moyennes d'Exposition destinées à protéger les travailleurs des effets à terme qui sont mesurées sur la durée d'un poste de travail de 8 heures.

Pour compléter l'analyse, certaines **valeurs toxicologiques de référence** (VTR) ont aussi été recherchées dans notamment les fiches de données toxicologiques produites par l'INERIS (et disponibles en ligne <http://www.ineris.fr/rapports-d%C3%A9tude/toxicologie-et-environnement/fiches-de-donn%C3%A9es-toxicologiques-et-environnementales->; consulté le 26/12/12). Les VTR sont des indicateurs permettant d'établir une relation qualitative voire quantitative entre une exposition à une substance chimique et un effet néfaste chez l'Homme (INERIS, 2008 b). Elles sont utilisées dans le cadre d'évaluations de risque sanitaire.

Différents types de VTR existent selon les organismes qui les ont élaborées. Elles peuvent se rapporter à des substances à effet avec ou sans seuil mais aussi aux différentes voies d'exposition (orale, cutanée, inhalation) et pour une exposition aiguë ou chronique.

4. Interrogation d'experts

Afin de compléter le recueil bibliographique, un certain nombre d'experts du domaine a été sollicité dans le cadre de cette étude.

Dans un premier temps, il avait été envisagé d'élaborer des questionnaires mais, après les premières prises de contact, cela nous est apparu non nécessaire. En effet, de façon générale, les experts sollicités en particulier sur les aspects santé, sécurité des opérateurs, retours d'expérience nous ont indiqués qu'ils disposaient de peu, voire pas d'information.

Différents interlocuteurs ont été sollicités :

- des constructeurs et bureau d'études d'unités de méthanisation interrogées notamment à l'occasion du congrès Biogaz Europe à Nantes du 24 au 26 octobre 2011. Peu d'informations ont été recueillies auprès de ces acteurs. Cependant cela nous a permis de savoir que l'INERIS avait lancé fin 2011, début 2012 un retour d'expérience dans les filières de méthanisation. Un rapport relatif à cette étude est paru en juillet 2012 (INERIS, 2012 a),
- des acteurs de la surveillance de la santé au travail. :

Un certain nombre de MSA a été contactée, notamment dans les régions dans lesquels les nombres d'installations agricoles sont les plus élevés (Bretagne, Pays de la Loire, Lorraine, Champagne-Ardenne). Peu d'informations ont été fournies. Certains interlocuteurs ont effectué des recherches dans leur base des ATMP (Accidents du Travail / Maladies Professionnelles) mais n'ont trouvé aucune information propre à des unités de méthanisation.

Les quelques informations fournies sont les suivantes :

- o les digesteurs agricoles nécessitent d'être vidés tous les 10 ans,
- o les opérations de maintenance en particulier des matériels de valorisation du biogaz sont en général effectuées par les constructeurs machines et/ou installateurs des unités,
- o le risque explosif est en particulier présent lors des phases de démarrage et d'arrêt des méthaniseurs.

Des médecins du travail ont également été sollicités mais n'ont en général pu apporter d'information complémentaire.

Le Docteur O. Schlosser, médecin expert de Suez Environnement nous a cependant, à l'occasion, d'un entretien téléphonique, confirmé un certain nombre d'informations relatives aux risques chimiques et microbiologiques en particulier dans les filières ISDND et STEP (cf. section 10),

- des DSV et chambres d'agriculture, afin de les solliciter notamment sur les agréments sanitaires devant être délivrés aux installations à la ferme,
- le Club Biogaz qui nous a renvoyés vers les documents disponibles,
- l'association AILE qui nous a informés de l'étude en cours relative aux unités de méthanisation agricole par l'INRS et les DIRRECTE Pays de la Loire et Bretagne (à paraître *a priori* en 2013),
- l'INRS qui nous a indiqués qu'une étude allait débiter en 2013 et qui a réalisé quelques requêtes dans leur base de données COLCHIC (n'ayant fournis aucun résultats pour rappel),

- des acteurs européens (en Allemagne notamment) :
 - o German Energy Agency ,
 - o German Biogas Association,
 - o Leibniz-Institut für Agrartechnik,
 - o BfR : Bundesinstitut für Risikobewertung,

- des professionnels (exploitants de STEP, d'ISDND, d'installations agricoles) au travers notamment de quelques visites de sites.
 Ces retours d'informations nous ont notamment permis d'identifier des postes de travail particuliers (notamment dans le secteur des ISDND) et d'appréhender les opérations de suivi / maintenance devant être effectuées (ex : 2 à 3 purges quotidiennes du réseau de biogaz dans le cas d'un STEP), ...
 Ces retours de professionnels nous ont conduits aussi à exclure de l'étude, les substances émises par les appareils de combustion/valorisation du biogaz et torchères. D'après les professionnels, ces émissions sont réalisées à plusieurs mètres de hauteur et selon des débits fixés et ne devraient pas impacter la santé des opérateurs au sol.
 Une visite de site a permis d'identifier que les appareils d'injection de biogaz dans les digesteurs (pour le brassage des matières, notamment utilisé en STEP) sont à l'origine de niveaux sonores relativement importants.
 D'après un professionnel du secteur des stations d'épuration, la maintenance électromécanique des moteurs, pompes, compresseurs, vis nécessite des gammes de maintenance de périodicité variant de l'opération hebdomadaire à quinquennale.

- des interlocuteurs de DREAL qui nous indiqués que leur rôle n'était pas de contrôler le risque pour les opérateurs.

5. Présentation des données collectées et analysées

La suite du rapport est constituée de la façon suivante :

- un chapitre (D/) présentant les principales informations issues du recueil bibliographique dont :
 - o des informations de base concernant la méthanisation, les substrats traités, les types de technologies (en particulier des digesteurs), les voies de valorisation du biogaz et des digestats (cf. 6/ et annexe 1),
 - o quelques éléments règlementaires relatifs aux installations et à la surveillance des opérateurs (cf. 7/ et annexe 2),
 - o un résumé de l'état des lieux des installations de méthanisation, production de biogaz en France, (cf.. 8/),

- un chapitre (E/) visant à présenter les points citriques vis-à-vis de la santé et sécurité des opérateurs des filières de production, valorisation de biogaz :
 - o dans un premier temps, la démarche appliquée pour exploiter les données recueillies est décrite, (cf.. 9/),
 - o dans un second temps, les informations sont présentées par filière étudiée sous forme de « synthèse par filière » (cf. 10/).

Une discussion générale est aussi proposée en fin de rapport (cf.11/).

**C/ PRINCIPALES INFORMATIONS DE BASE RELATIVES A
LA METHANISATION, PRODUCTION, VALORISATION DE
BIOGAZ**

6. Principales définitions et notions relatives à la méthanisation, production de biogaz

Afin de ne pas surcharger le corps du rapport, seul un résumé des principales définitions et notions relatives à la méthanisation, production de biogaz est présenté dans ce chapitre. Les informations sont plus détaillées en annexe 1.

6.1 Principales définitions et notions

La **méthanisation**, ou digestion anaérobie, est définie comme « un procédé naturel de transformation, dégradation de la matière organique par des bactéries en absence d'oxygène ».

Elle peut se dérouler de manière **spontanée** dans les marais par exemple ou dans les installations de stockage de déchets non dangereux (ISDND).

Elle peut aussi être **contrôlée en digesteur**, enceinte fermée dans laquelle les matières organiques entrantes (ou matières intrantes ou substrats) sont soumises à l'action de différentes bactéries en absence d'oxygène permettant la succession des différentes phases de digestion anaérobie. Principalement deux phases peuvent être distinguées :

- une première phase de fermentation acide comprenant une hydrolyse et une acidogénèse,
- une seconde phase de méthanisation proprement dite comprenant une acétogénèse et une méthanogénèse.

La digestion anaérobie conduit à la production de **biogaz**, composé essentiellement de méthane (CH₄), de gaz carbonique (CO₂) et saturé en eau. De nombreux autres composés appartenant à diverses familles peuvent aussi être présents dans le biogaz (exemples : hydrogène sulfuré – H₂S, ammoniac – NH₃, mais aussi des composés organohalogénés, des métaux, hydrocarbures aromatiques polycycliques, ...). Ils représentent moins de 5 % en proportion.

La composition du biogaz varie en fonction des matières entrantes digérées notamment. Celles-ci sont **d'origines diverses** (déchets / effluents ménagers, industriels, agricoles, boues de stations d'épuration) et sous formes diverses également (effluent liquide, pâteux, matière solide). Ces différentes matières ont des potentiels méthanogènes variables, ceux-ci représentant les quantités maximales de méthane produit par litre ou par kg de substrat.

Le biogaz peut être **valorisé** de diverses manières (production de chaleur, d'électricité, de biométhane carburant ou de biométhane à des fins d'injection dans le réseau de gaz naturel). A ce jour, la cogénération d'électricité et de chaleur est *a priori* la voie prépondérante en France. A noter que l'injection du biométhane dans le réseau de gaz naturel se développe en France depuis 2011. De nombreux projets d'injections devraient pouvoir voir le jour dans les prochaines années.

En digesteur, un **digestat** est également produit. (En ISDND, il n'y a donc pas de digestat). Il est le résidu après la digestion et est composé de matières organiques non biodégradables, de matières minérales et d'eau. Sa composition est aussi dépendante des matières méthanisées. Le digestat peut être utilisé pour sa valeur agronomique, dans le cadre de plan d'épandage ou entrer dans une logique produit. Dans ce dernier cas, le digestat devra être composté et pourra être :

- soit homologué,
- soit normalisé s'il répond aux seuils (en éléments traces métalliques ETM, hydrocarbures aromatiques polycycliques HAP, polychlorobiphényles PCB et microorganismes) définis par les normes suivantes :
 - o la NF U 44-051 : Amendements organiques,
 - o la NF U 44-095 applicables aux « Composts contenant des matières d'intérêt agronomique, issues du traitement des eaux » (ex : digestat de boues de STEP).

Une flore microbienne cultivable, principalement représentée par des espèces bactériennes, a également été mise en évidence dans des biogaz et des eaux condensées présentes dans les conduites des installations. A partir des matières intrantes, certaines espèces sont plus facilement aérosolisées.

Des microorganismes pathogènes ont déjà été mis en évidence dans les digestats. Certaines matières entrantes sont plus propices à la présence de pathogènes et ne peuvent sans hygiénisation préalable être méthanisées. Les microorganismes sont aussi influencés par les procédés de méthanisation, les pré- et post-traitements, les dispositifs thermophiles permettant une réduction plus importante de leurs teneurs.

6.2 La méthanisation dans les installations

Deux grands cas peuvent être discernés (AFSSET, 2008) :

- la méthanisation maîtrisée en digesteur (i) dont les principaux substrats sont :
 - o les déchets agricoles : résidus de cultures (pailles, tourteaux, pulpes, fanes,...), substrats provenant d'industries agroalimentaires (déchets de légumes ou de fruits, petit lait, huiles, graisses,...), de collectivités (tonte de gazons, ..), restaurateurs ou encore de cultures énergétiques (maïs d'ensilage, herbe, betterave, ...) (Aile *et al.*, 2006) (**filière agricole à la ferme ou centralisée**),
 - o les boues urbaines : boues primaires (issues du décanteur primaire), secondaires (issues du traitement biologique) ou mixtes (mélange des boues primaires et secondaires) (Solagro, 2001) (**filière boues de stations d'épuration urbaines**),
 - o les déchets ménagers : biodéchets collectés sélectivement, ou ordures ménagères triées en usine avant l'introduction de la matière organique dans le digesteur (**filière ordures ménagères**),
 - o les effluents industriels : déchets de papeteries, de laiteries, d'abattoirs, d'industries de transformation des corps gras, d'industries agro-alimentaires (**filière industrielle**).

 - la méthanisation spontanée en installations de stockage de déchets non dangereux (ii) (**filière de production de biogaz en ISDND**),
- i) En digesteur, différents paramètres contrôlant la méthanisation peuvent être cités :
- En premier lieu, la digestion peut se dérouler à différentes plages de température (Moletta, 2002) :
 - o psychrophile : 15-25°C environ,
 - o mésophile : 25-45°C environ,
 - o thermophile : 45-65°C environ.Les procédés mésophiles sont les plus répandus en France.

 - Selon la teneur en matières sèches des substrats entrants, la digestion peut se faire par voie humide ou par voie sèche :
 - o les matières humides sont en général brassées dans un digesteur dit infiniment mélangé, le brassage pouvant être mécanique (ex : par pales), hydraulique (injection de digestat) ou pneumatique (injection de biogaz),
 - o la méthanisation par voie sèche se déroule en général dans des digesteurs de type piston, systèmes cylindriques dans lesquels les matières avancent sous l'influence de pales. L'agitation est assurée par un brassage mécanique et/ou une recirculation sous pression du biogaz.
Des procédés en batch se développent également pour les substrats ayant des teneurs en matières sèches relativement élevées (> 40 %). Le batch est rempli puis fermé une fois plein. Les déchets solides sont aspergés avec un percolat chauffé riche en microorganismes. Une fois la méthanisation terminée (plusieurs semaines), le digestat est extrait en une seule fois. Ce type de procédé tendrait à se développer dans les années à venir pour les substrats de type fumier.

 - L'alimentation des digesteurs peut être continue, semi-continue ou discontinue et est aussi influencée par le type de substrats traités et leurs teneurs en matières sèches. Dans le cas d'une alimentation semi-continue, les unités sont équipées d'un digesteur et d'un post-digesteur. Dans ce dernier la production du biogaz se poursuit mais dans une moindre mesure,

 - S'agissant des microorganismes responsables des différentes étapes de la digestion anaérobie, ils peuvent être présents sous forme libres (digesteurs à cultures libres) ou être fixés sur des supports permettant d'augmenter la concentration bactérienne. Sont

distingués des systèmes à lits fixés, lits fluidisées, UASB (Upflow Anaerobic Sludge Banket ou lit de boues anaérobies à flux ascendant) ou IC (Internal Recirculation).

Par ailleurs, en amont et aval de la méthanisation en digesteur proprement dite, différentes étapes de préparation des matières entrantes et traitement et stockage du biogaz et digestat sont réalisées et peuvent varier en fonction des filières et unités.

Ainsi de manière générale, des broyeurs, des tamiseurs, des presses, des pré-fosses de mélange, des procédés de chauffage ou d'hygiénisation de matières entrantes peuvent être employés. Certaines matières entrantes (certains sous-produits animaux) exigent effectivement qu'une hygiénisation préalable soit réalisée en vue de réduire les agents pathogènes.

Du fait des possibles fluctuations de production, le biogaz doit pouvoir être stocké dans des réservoirs (gazomètres).

Avant sa valorisation, le biogaz peut subir une déshumidification, une épuration de l'H₂S, des siloxanes, du CO₂ et d'autres composés traces au moyen de différents procédés (dessiccateur, filtre à presse, charbon actif, injection de chlorure ferrique, ...). Ces traitements dépendent notamment de la valorisation choisie.

ii) Dans le cas des ISDND

Dans les ISDND, les intrants sont les déchets non dangereux, soit, les déchets domestiques et municipaux ainsi que les déchets non dangereux de toute autre origine (ex : DIB : déchet industriel banal). Ceux-ci sont relativement hétérogènes.

Les ISDND, sont dorénavant constitués en casiers (éventuellement subdivisés en alvéoles) dans lesquels les déchets sont déversés.

Du fait du passage de conditions aérobies à des conditions anaérobies (consommation de l'oxygène par tassement des déchets et lors de la fermeture des alvéoles), du biogaz est produit. Celui-ci doit réglementairement être capté. Des réseaux de captages du biogaz sont installés (puits, drains) dans les massifs de déchets. A noter qu'aujourd'hui les modes d'exploitation d'une ISDND permettent d'optimiser la production et le captage du biogaz. Dans les procédures d'exploitation, de nombreux contrôles et suivis réguliers (température, taux de CH₄ et d'O₂, pression, débit notamment) dans les conduites de captage permettent de régler chaque puits afin d'avoir la meilleure production de biogaz possible (en débit et en taux de CH₄).

Après captage, le biogaz est ensuite détruit (torchère) ou valorisé (de plus en plus).

Depuis quelques années, la gestion en mode bioréacteur tend aussi à se développer, même si aucune donnée n'est disponible à ce jour sur le nombre d'installations fonctionnant ainsi. La gestion en mode bioréacteur est une technique qui consiste à accélérer les processus de dégradation et de stabilisation des déchets dans une enceinte confinée (ADEME et FNADE 2007). Elle est opérée par la maîtrise des principaux facteurs d'optimisation de l'activité microbienne : humidité, température, nature du déchet.

7. Principaux aspects réglementaires des installations de production de biogaz et de la surveillance des opérateurs

7.1 Principaux aspects réglementaires s'appliquant aux installations de méthanisation et aux ISDND

La réglementation relative à la production et à la distribution du biogaz utilise les sources de droit internationales, droit communautaire (Union Européenne) et droit français. Les sources réglementaires applicables sont fonction d'un nombre important de paramètres : matières entrantes, tonnage utilisé et quantités de biogaz produit, modes de transformation, taille et forme juridique de l'installation, modes de transports et de valorisation.

Sont évoquées ici les principales réglementations auxquelles doivent répondre les installations et en particulier :

- le règlement sanitaire européen traitant du sujet des sous-produits animaux (SPA),
- la réglementation française ICPE : installations classées pour l'environnement.

Des informations plus détaillées sont aussi fournies en annexe 2.

7.1.1 Règlement 1069/2009

Si l'unité de méthanisation traite des **sous-produits animaux** (lisier, matières stercoraires, c'est-à-dire qui ont rapport aux excréments, parties d'animaux abattus propres à la consommation humaine) le **règlement 1069/2009**¹ s'applique. Celui-ci impose en particulier la mise en place d'un **agrément sanitaire**, précisant les exigences en matière d'hygiène et de traitements de ces SPA pour la conversion en biogaz et, distingue trois catégories de SPA (cf. Tableau 1).

Tableau 1 : Catégories de sous-produits animaux selon la réglementation européenne 1069/2009.

Catégories	Description	Exemples	Exigences
3	SPA qui pourraient être consommés par l'homme	Déchets de l'industrie agro-alimentaire contenant de la viande	Pasteurisation à 70°C pendant 60 min puis stabilisation.
2	SPA présentant un risque plus important (que la catégorie 3) pour la santé publique,	Produits contenant des résidus de médicaments vétérinaires, lisiers, produits de collecte des eaux résiduaires	Stérilisation à 133°C pendant 20 min sous 3 bars <i>(il existe des exceptions pour le lisier, l'appareil digestif et son contenu, le lait, les produits à base de lait, le colostrum, les œufs et des produits à base d'œufs, si l'autorité compétente estime qu'il n'y a pas de risque de propagation d'une quelconque maladie grave transmissible)</i>
1	Intrants représentant le plus grand risque pour la santé humaine, animale et environnementale	Organes d'animaux suspectés d'être infectés par un prion	Pas d'utilisation possible en méthanisation – destruction par exemple par incinération

7.1.2 Réglementation ICPE

S'agissant de la **réglementation ICPE** (installations classées pour l'environnement), plusieurs rubriques ont été identifiées et sont applicables aux unités de méthanisation ou de production de biogaz. Elles sont liées aux spécificités techniques, à savoir le type de déchets traité, les quantités

¹ Règlement (CE) N°1069/2009 du parlement Européen et du conseil du 21 octobre 2009 établissant des règles sanitaires applicables, à compter du 4 mars 2011, aux sous-produits animaux et produits dérivés non destinés à la consommation humaine.

de matières entrantes, les quantités produites, le stockage éventuel du biogaz (gaz inflammable), sa combustion et son élimination en torchère.

Les principales rubriques sont indiquées ci-dessous.

a) Rubriques « déchets »

Concernant les types de déchets susceptibles d'être traités en unités de méthanisation, les rubriques suivantes sont à considérer :

2750 – Stations d'épuration collective d'eaux résiduaires industrielles

2751 – Station d'épuration collective de déjection animale

2752 – Station d'épuration mixte

S'agissant des **ISDND**, la rubrique applicable est la **2760-2** - Installation de stockage de déchets non dangereux.

Ces installations de stockage de déchets non dangereux sont réglementées par l'arrêté ministériel du 9 septembre 1997, modifié en dernier lieu par l'arrêté du 12 mars 2012. Y est notamment traitée la production de biogaz (en termes d'estimation du volume produit, de conception et suivi des réseaux de captage, de destruction ou valorisation du biogaz).

Concernant les installations de production de biogaz à proprement dit les rubriques 2781, et 2791 sont concernées :

2781 – Méthanisation de déchets non dangereux ou matières végétales brute, à l'exclusion des installations de méthanisation d'eaux usées ou de boues d'épuration urbaines lorsqu'elles sont méthanisées sur leur site de production. La nomenclature des installations classées de traitement biologique des déchets a été révisée en 2009, 2010 et 2011. La méthanisation relève depuis lors d'une rubrique ICPE unique subdivisée en 2 sous-rubriques en fonction de la nature des déchets traités.

- **2781-1.** Méthanisation de matières végétales, effluents d'élevage, matières stercoraires, lactosérum, déchets végétaux d'industries agroalimentaires.
- **2781-2.** Méthanisation d'autres déchets non dangereux (déchets ménagers, déchets animaux, boues d'épuration...)

Les seuils définissant les différents régimes administratifs ICPE sont basés sur la quantité de matière traitée en tonnes/jours, selon les conditions explicitées dans la figure 1.

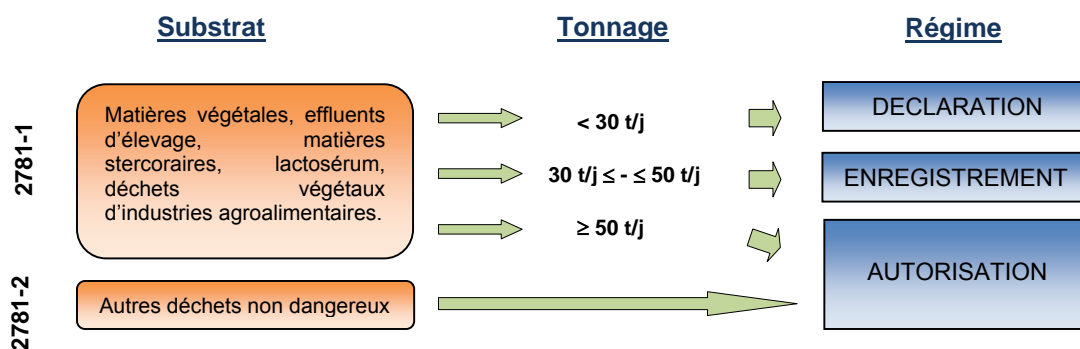


Figure 1 : Schéma de classification ICPE appliquée aux installations de méthanisation – rubriques 2781.

Il existe également la rubrique 2780 – Installations de traitement aérobie (compostage ou stabilisation biologique) de déchets non dangereux ou de matière végétale brute, ayant le cas échéant subi une étape de méthanisation.

2791 - Installations de traitement de déchets non dangereux à l'exclusion des installations visées aux rubriques 2720, 2760, 2771, 2780, 2781 et 2782

b) Rubriques « substances inflammables »

Concernant les **substances inflammables**, deux rubriques sont identifiées :

1411 – Gazomètres et réservoirs de gaz comprimés renfermant des gaz inflammables

1413 – Installations de remplissage de réservoirs de gaz naturel ou biogaz, sous pression

c) Rubriques « Divers »

Enfin dans la catégorie « divers » de la nomenclature ICPE, la rubrique 2910 concerne la combustion du biogaz

2910 – Combustions – A l' exclusion des installations visées par les rubriques 2770 et 2771

La valorisation du biogaz peut s'envisager sous forme de chaleur, d'électricité ou d'une combinaison chaleur/électricité (cogénération). La combustion du biogaz entre dans le champ de la réglementation ICPE au titre de la rubrique 2910 B comme le précise la circulaire du 10 décembre 2003 relative aux installations de combustion utilisant du biogaz, ou 2910 C lorsque l'installation consomme exclusivement du biogaz provenant d'installation classée sous la rubrique 2781-1.

La classification des différents régimes administratifs ICPE est basée sur la typologie des combustibles consommés, du type régime des installations de production et de la puissance thermique de l'installation de combustion, selon les conditions explicitées dans le schéma ci-après.

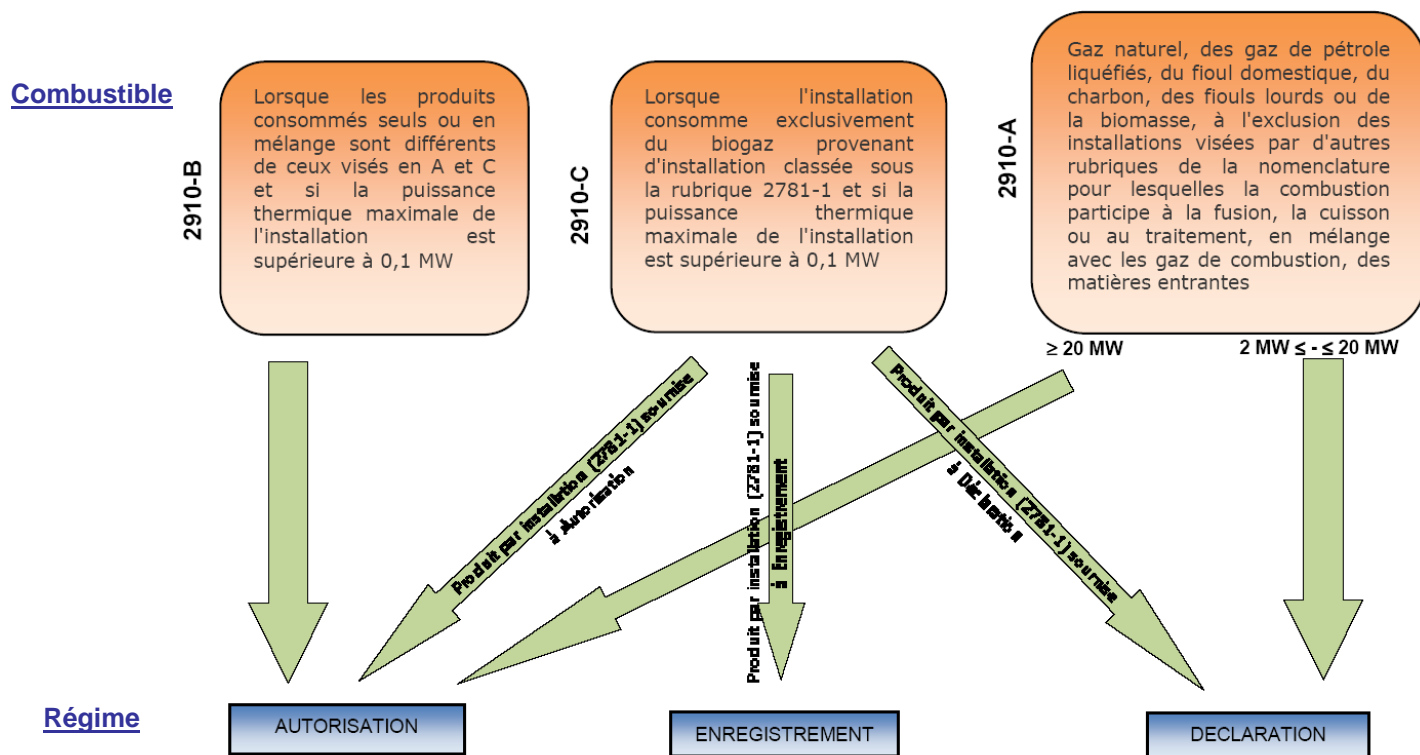


Figure 2 : Schéma de classification ICPE appliquée aux installations de combustion².

² La puissance thermique maximale est définie comme la quantité maximale de combustible, exprimée en PCI, susceptible d'être consommée par seconde. La biomasse au sens du A de la rubrique 2910 se présente à l'état naturel et n'est ni imprégnée ni revêtue d'une substance quelconque. Elle inclut le bois sous forme de morceaux bruts, d'écorces, de bois déchiquetés, de sciures, de poussières de ponçage ou de chutes issues de l'industrie du bois, de sa transformation ou de son artisanat

7.2 Principales informations relatives à la surveillance de la santé et sécurité des opérateurs en France

Ce chapitre résume les principales obligations réglementaires et identifie les organismes compétents assurant le suivi des opérateurs, notamment sur les aspects santé et sécurité.

La prévention des risques professionnels est l'ensemble des dispositions à mettre en œuvre pour préserver la santé et la sécurité des travailleurs et améliorer le bien-être et les conditions de travail.

Cela se décline par :

- une **approche collective** en termes de gestion, maintenance et vérification des installations des équipements et surveillance des ambiances, ainsi que par le management, l'organisation du travail et la formation du personnel,
- une **approche individuelle**, par le suivi médical du salarié et une analyse de l'activité et approche ergonomique.

Ainsi, la prévention des risques professionnels consiste en une approche globale du salarié à son poste et dans son environnement de travail. D'un point de vue réglementaire, les principes généraux de prévention sont fixés par la **directive européenne cadre du 12 juin 1989** transposée dans le Droit du travail français par la loi du 31 décembre 1991.

C'est le **Code du Travail**, dans sa quatrième partie (partie réglementaire nouvelle) qui fixe l'ensemble des exigences relatives à la santé et sécurité au travail. Il précise ainsi les principes généraux de prévention et les obligations des employeurs à évaluer les risques, et à transcrire les résultats dans un document unique.

S'agissant des **entreprises agricoles et des agriculteurs non salariés**, il faut noter que les entreprises agricoles restent soumises aux règles du code du travail. Certaines actions de prévention sont adaptées dans le cadre des activités agricoles. Quelques textes réglementaires peuvent être retenus :

- *le décret n°82-397 du 11 mai 1982 – Relatif à l'organisation et au fonctionnement des services de santé au travail en agriculture,*
- *l'arrêté du 20 octobre 2004 fixant la liste des travaux effectués dans les entreprises agricoles et nécessitant une surveillance médicale.*

En France, la prévention des risques professionnels est placée sous la responsabilité des **pouvoirs publics et de la Sécurité sociale**. Des représentants des employeurs et des salariés et différents acteurs institutionnels complètent ce dispositif. Le chef d'entreprise y joue un rôle majeur. C'est l'acteur principal de la prévention en entreprise et il est juridiquement responsable de la sécurité et de la santé de ses salariés.

Les principales institutions et structures en charge des opérateurs sont :

- les **pouvoirs publics** avec :
 - o le Ministère chargé du travail et plus précisément la DGT (Direction Générale du Travail), qui définit la stratégie réglementaire de prévention des risques sur les lieux de travail et qui élabore et met en application des textes législatifs et réglementaires. Son action est relayée sur le terrain par les DIRECCTE (Directions régionales des entreprises, de la concurrence, de la consommation, du travail et de l'emploi), par l'Inspection médicale du travail et l'Inspection du travail,
 - o le Ministère en charge de l'agriculture qui a pour mission de veiller à la santé et à la sécurité au travail des opérateurs agricoles ou forestiers. Placé au sein de la sous-direction du travail et de la protection sociale, le Bureau de la Santé et de la Sécurité au Travail est chargé tout spécialement des questions de santé et de sécurité. Il définit notamment, avec la caisse centrale de la mutualité sociale agricole (MSA), la politique de prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles en direction des salariés et des non-salariés agricoles,
- les **organismes définis par le Code du Travail**, à savoir :

- les services de la santé au travail (SST) (ancienne médecine du travail). Elle permet aux salariés du secteur privé de bénéficier d'une surveillance médicale du travail visant à leur éviter toute altération de la santé du fait de leur travail,
 - le Comité d'Hygiène, de Sécurité et des Conditions de Travail (CHSCT). Constitué dans tous les établissements occupant au moins 50 salariés, le CHSCT a pour mission de contribuer à la protection de la santé et de la sécurité des travailleurs ainsi qu'à l'amélioration des conditions de travail,
 - l'Agence Nationale pour l'Amélioration des Conditions de Travail (ANACT). Le réseau a pour vocation d'améliorer à la fois la situation des salariés et l'efficacité des entreprises, et de favoriser l'appropriation des méthodes correspondantes par tous les acteurs concernés,
 - le conseil d'orientation sur les conditions de travail (COCT) participe à la politique nationale de protection et de promotion de la santé-sécurité du travail et d'amélioration des conditions de travail. Ses représentants sont fortement impliqués dans la gestion de branche AT/MP (Accidents de Travail / Maladies Professionnelles) de la Sécurité sociale *via* notamment la CATMP (Commission des AT et MP, dépendant de la CNAMTS). Ils constituent également le conseil d'administration de l'Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (INRS),
- **les organismes d'assurance sociale :**
- l'assurance sociale est chargée de définir des mesures et moyens de prévention et de garantir la réparation aux victimes d'Accidents du Travail (AT) et de Maladies Professionnelles (MP). Elle participe, en liaison avec le ministère chargé du Travail, à l'élaboration de la politique de prévention. Elle s'appuie au niveau national sur la CNAMTS : Caisse Nationale de l'Assurance Maladie des travailleurs salariés. Celle-ci est représentée, au niveau national, par la Direction des Risques professionnels ; au niveau régional, par les caisses régionales (CARSAT : en général), et ; au niveau local, par les caisses primaires d'assurance maladie (CPAM),
 - la Mutualité Sociale Agricole (MSA) est le régime de protection sociale du monde agricole et rurale en France. A ce titre, elle gère la protection légale et complémentaire de l'ensemble de la profession agricole (exploitants, salariés agricoles, ainsi que leurs familles). La MSA a en charge la mise en œuvre de la santé sécurité au travail auprès des salariés et exploitants agricoles (article L. 723-11 du code rural et de la pêche maritime). Elle établit et exploite notamment les statistiques nationales d'accidents du travail et de maladies professionnelles (AT/MP),
- **d'autres organismes** impliqués notamment dans l'expertise et la réalisation d'études :
- l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS) dont la principale mission est de développer et de promouvoir une culture de prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles en relation avec l'État et l'ensemble des organismes de prévention,
 - l'Agence Nationale de la Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail (ANSES) qui, a pour mission de réaliser l'évaluation des risques, de fournir aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique et technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion des risques. Elle assure aussi des missions de veille, d'alerte, de vigilance et de référence. Elle définit, met en œuvre et finance des programmes de recherche scientifique et technique,
 - l'Institut de Veille Sanitaire (InVS) avec son département santé travail (DST) qui a pour mission essentielle la surveillance épidémiologique des risques professionnels.

8. Etat des lieux des installations de méthanisation en France

Le Club Biogaz de l'ATEE a dressé en 2011 un bilan des installations de méthanisation en France (hors ISDND). Cet état des lieux a notamment été élaboré par enquête auprès des installations françaises. Le rapport fournit ainsi les nombres d'installations opérationnelles ou en construction mais fournit aussi diverses informations telles que :

- les types de digesteurs et la température de digestion employés,
- les prétraitements des substrats mis en œuvre,
- les quantités de substrats traités,
- les quantités de biogaz produits,
- les voies de valorisation du biogaz et du digestat,
-

Sur la base de ce bilan et de données complémentaires, certaines informations (technologie du digesteur, température de digestion, traitement du biogaz, valorisation, traitement du digestat) ont été extraites afin de construire pour chaque filière étudiée, un diagramme de fonctionnement représentatif des installations les plus répandues en France. Ces diagrammes (*cf.* ci-après) illustrent :

- les étapes en amont de la méthanisation (ex : stockage en préfosse, tri de déchets, ...),
- l'étape de méthanisation en indiquant la technologie du digesteur, la température de digestion et le type de brassage les plus répandus,
- le cas échéant, les traitements d'épuration mis en œuvre,
- la valorisation du biogaz la plus répandue par filière,
- les étapes de gestion du digestat (stockage, compostage, épandage).

Le Tableau 2 récapitule ces informations pour les filières de méthanisation en digesteur. Elles sont aussi rappelées dans les synthèses par filière (en section 10).

Des informations complémentaires sur les filières de méthanisation sont fournies en annexe 3.

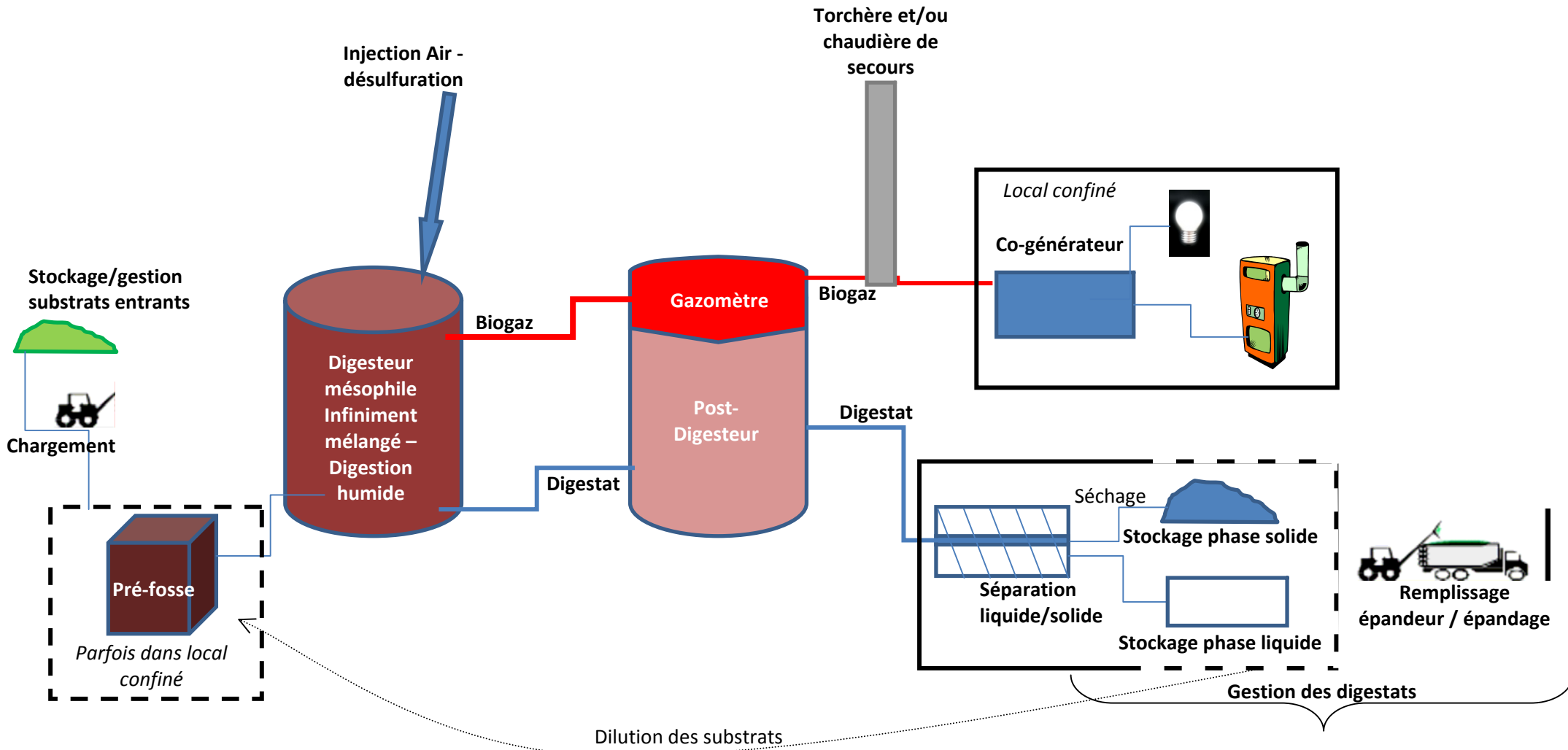
Tableau 2 : Synthèse des données de l'ATEE, Club Biogaz (2011) concernant les unités de méthanisation en France, par filière. (hors ISDND)

Filières/ secteurs	Nb installations opérationnelles (nb en construction / rénovation)	Technologies du digesteur			Traitement du biogaz	Valorisation biogaz	Traitement valorisation digestat
Méthanisation des ordures ménagères	9 (2)	3 mésophiles 6 thermophiles			5 déshydratation 3 traitement H ₂ S (injection de sulfure ferrique en amont digesteur) 3 traitement H ₂ S et CO ₂ (2 filtres charbon / 1 tour de lavage)	8 : cogénération 1 : biométhane carburant/réseau de gaz naturel	compostage
Agricole à la ferme et installations centralisées	48 (35)	Type de matériel	Nb installations à la ferme (sur 26 ayant décrit procédés)	Nb installations centralisés (sur 7)	11/39 déshumidification (canalisation enterrée, dessiccateur, sècheur frigorifique, pompe à chaleur) 36/39 Traitement H ₂ S (11/16 par injection air – 2/16 tour de lavage – 1/16 filtre à charbon, 1/16 compresseur d'air, 1/16 aérateur d'aquarium)	Cogénération (sauf 2 uniquement chaleur)	29 séparations phases liquides et solides (centrifugeuse, presse à vis ou piston) Séchage phase solide (nb installations non connu) : sècheur à tapis, échangeur à plaque, compostage (1 ferme, 1 territoriale) Phase solide épandue Phase liquide : épandue ou diluant matières entrantes ou traités pour servir engrais (acidification, nitrification/dénitrification, osmose inverse) Post-digesteur dans majorité de cas ou géomembrane, fosse en béton ou inox. Stockage phase solide : plateforme ou hangar Stockage phase liquide : lagune ou fosse couverte Traitement poussé digestat (rare dans cas grosses installations)
		Broyeur	3	2			
		Presse	2	1			
		Hygiénisation intrants	3	3			
		Dégrilleur / tamiseur	2	2			
		Préchauffage déchets entrants	4	1			
		Fosse de pré-mélange	17	1			
<i>Type de digesteur</i> : Infiniment mélangé (100%) <i>Brassage</i> : agitation mécanique (92,5 %) recirculation, du digestat (7,5 %): <i>Température de digestion</i> : 1 thermophile suite phase mésophile 1 psychrophile Autres : mésophiles La quasi-totalité des installations de méthanisation d'effluents agricoles sont équipées de gazomètre double membrane situés au dessus du post-digesteur, parfois sur le digesteur.							
Industrielle	80 (4)	Type de matériel	Nb installations (sur 55 ayant décrit procédés)		6 /40 déshumidification, 2/40 épuration des siloxanes, 6/40 épuration H ₂ S	4 valorisent en électricité Chaleur pour la plupart des autres (besoins du digesteur en général) +/- torches 3 torchent entièrement	14 : séparation de phases (centrifugeuse, décanteur, clarificateur, flottateur presse à vis et/ou à bande.) Eau : épuration aérobie (milieu récepteur aquatique/épandage si conforme norme, sinon STEP collective) 3 industries agroalimentaires compostent
		Broyeur	2				
		Presse à vis et à bande	1				
		Hygiénisation intrants*(quand chargés en pathogènes)	1 (abattoir)				
		Dégrilleur / tamiseur	24				
		Préchauffage déchets entrants	18				
		Autres procédés tels que : chaulage, nitrification/dénitrification, ajustement pH, épuration aérobie pour dépollution effluents)	Nb non précisé				
<i>Type de digesteur</i> : Infiniment mélangé (42 %) Lit fixé (11 %) Lite fluidisé (11%) UASB (36%) <i>Température de digestion</i> : 4 psychrophiles 43 mésophiles 0 thermophile déclaré 29/35 ont gazomètre (type non précisé)							

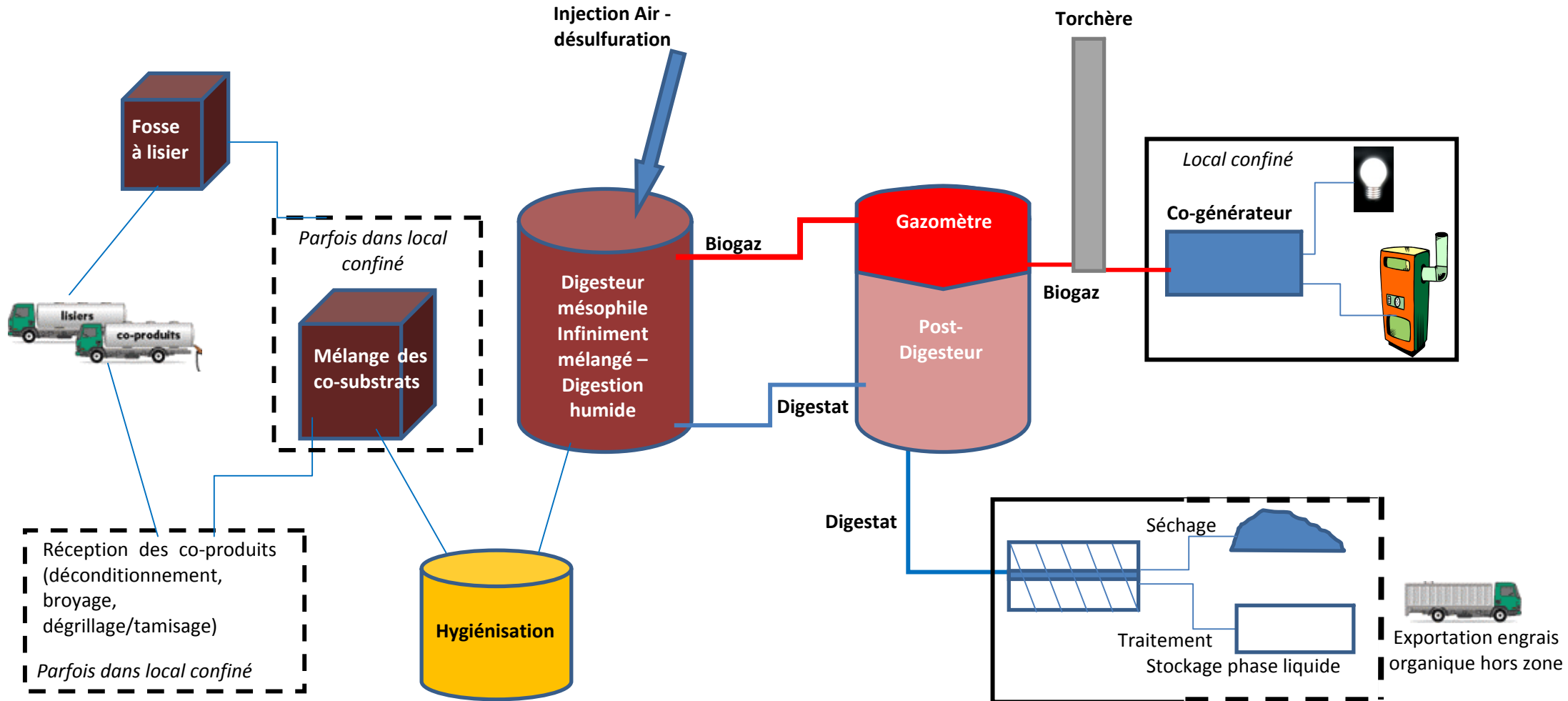
Filières/ secteurs	Nombre installations opérationnelles (nb en construction / rénovation)	Technologies du digesteur	Traitement du biogaz	Valorisation biogaz	Traitement valorisation digestat
Méthanisation de boues de STEP urbaines	60	<p><i>Type de digesteur</i> : Infiniment mélangé 100 %</p> <p><i>Brassage</i> :</p> <p>12/20 Digesteur brassé par bullage biogaz 6/20 brassage mécanique 2/20 recirculation boue</p> <p><i>Température de digestion</i> :</p> <p>1/35 (grosse STEP) : thermophile 34/35 : mésophile</p> <p>42/43 ont un gazomètre (dont 16/28 en cloche et 12/28 à membrane souple)</p>	<p>7/22 : déshumidification (refroidisseur, sécheur à bande ou purgeurs).</p> <p>2/22 épuration des siloxanes,</p> <p>5/22 désulfuration (filtre à charbon actif, injection de chlorure ferrique en amont du digesteur, ou tour de lavage à l'eau).</p>	<p>45 : production de chaleur uniquement 14 : cogénération 1 : production de biométhane carburant</p>	<p>18/24 : séparation des phases liquides et solides (13 par centrifugeuse, 2 par séchage, 1 combine les 2 techniques)</p> <p>9/24 : équipement de traitement des boues digérées (5 par chaulage, 1 par addition de polymère, 1 par aération)</p> <p>14 stations compostent les boues digérées</p> <p>7 stations épandent sur des exploitations agricoles sans compostage</p>

Nb : nombre

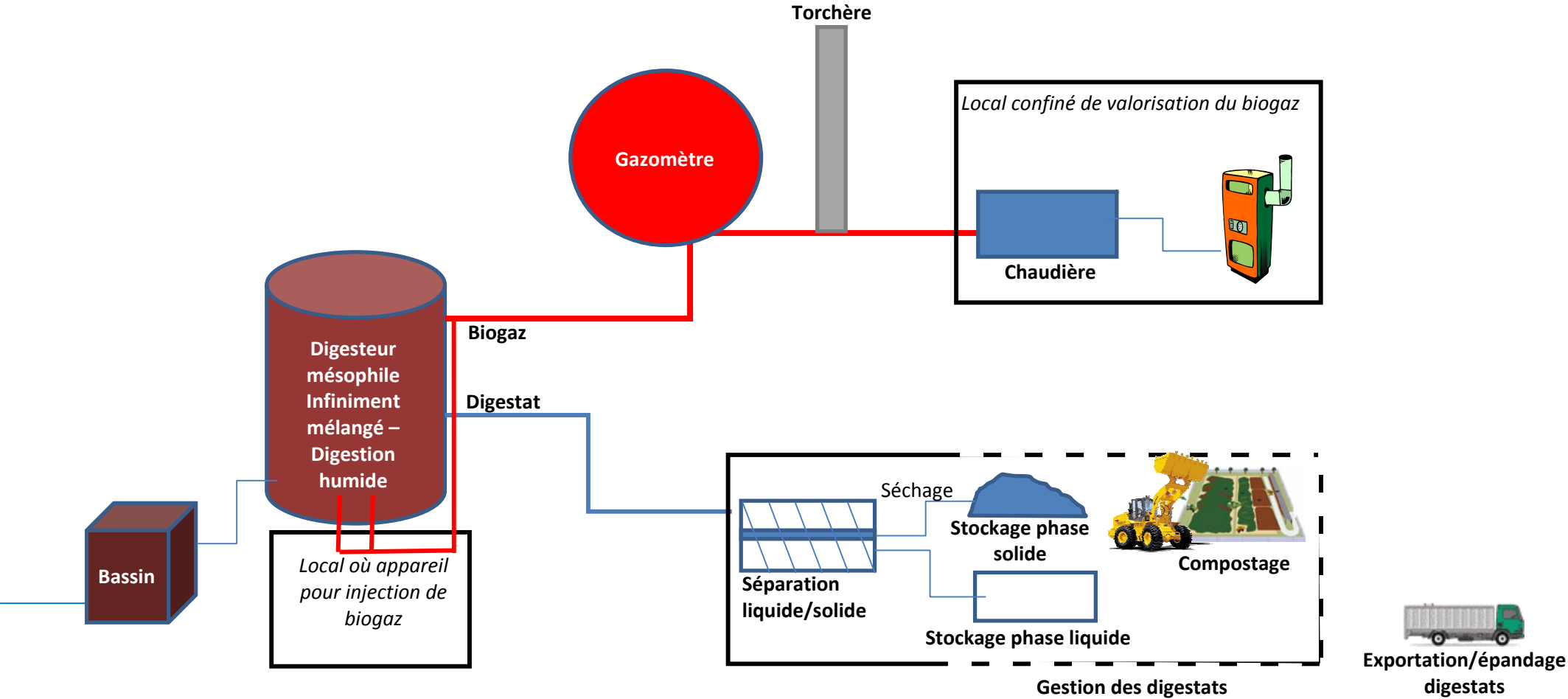
Filière agricole à la ferme



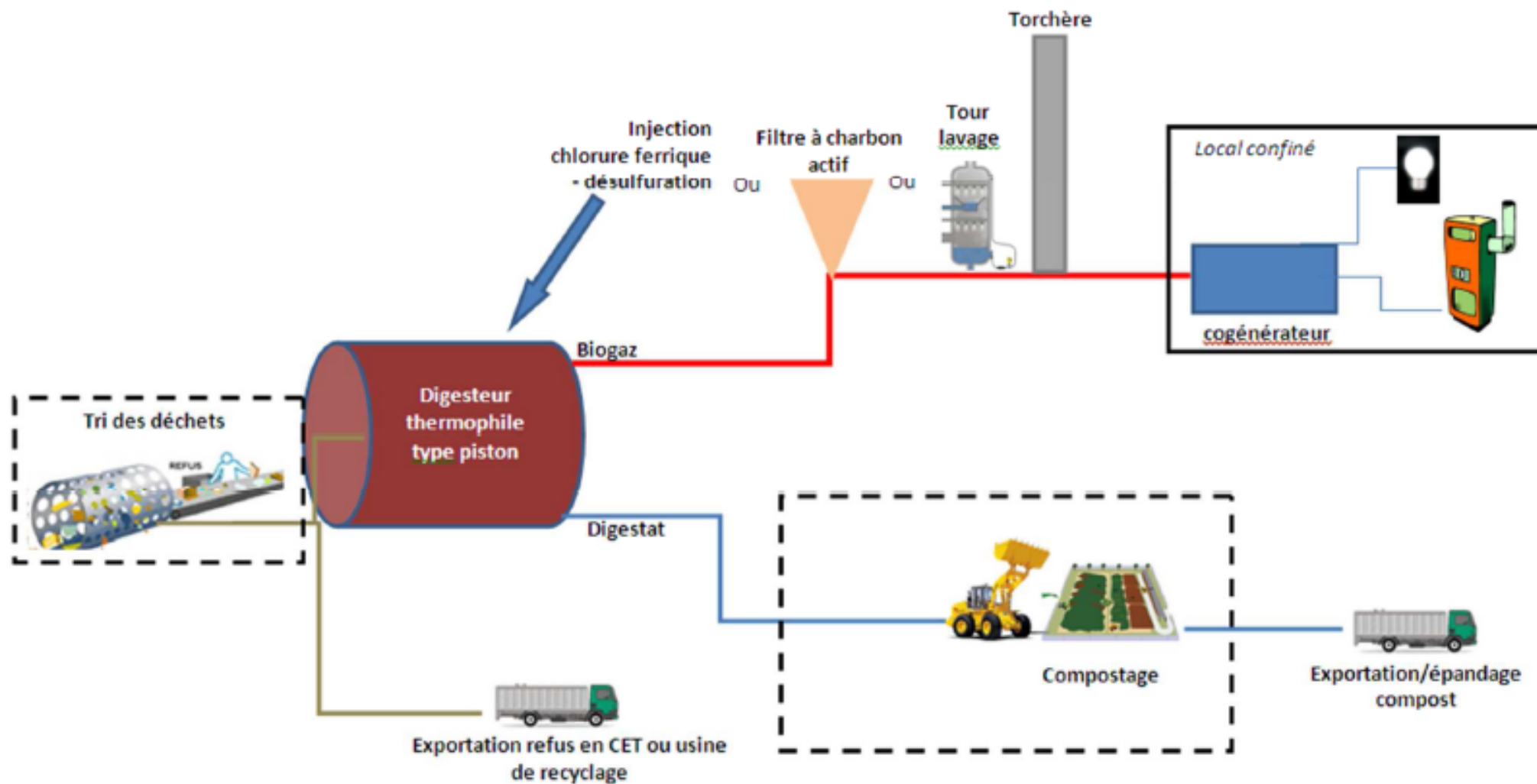
Filière agricole centralisée



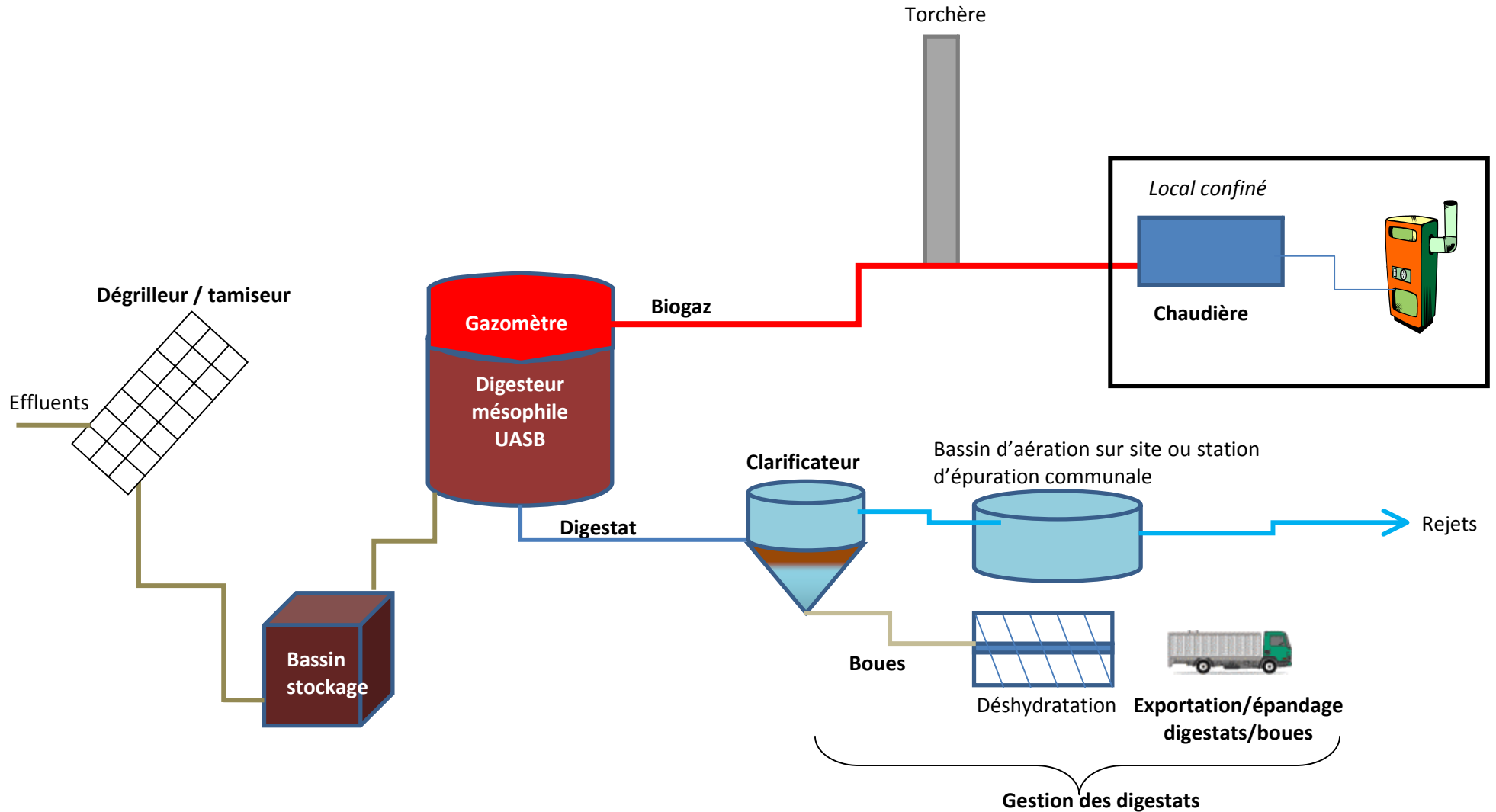
Filière Méthanisation des boues de STEP urbaines



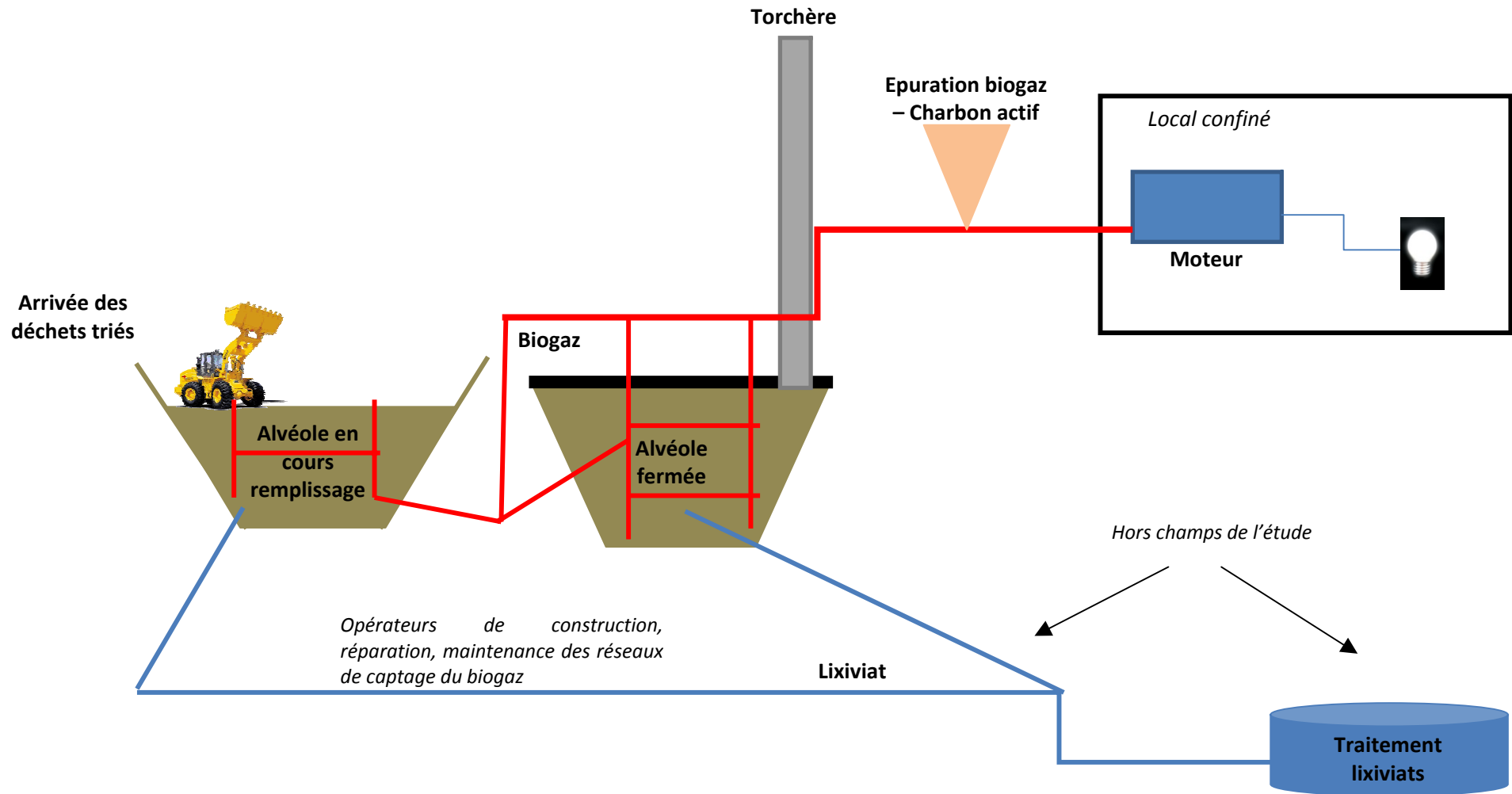
Filière Méthanisation des Ordures Ménagères



Filière industrielle de méthanisation : Ex : effluents vinicoles



Filière production / valorisation de biogaz en ISDND



**D/ IDENTIFICATION DES POINTS CRITIQUES VIS-A-VIS
DE LA SANTE, SECURITE DES OPERATEURS DES
FILIERES DE PRODUCTION, VALORISATION DE BIOGAZ**

9. Méthodologie d'étude

Afin de répondre à l'objectif d'identification des points critiques vis-à-vis de la santé et la sécurité des opérateurs de la filière biogaz, la démarche mise en œuvre s'inspire d'une démarche HACCP. Les principes et étapes de celle-ci sont décrits en section 9.1/. L'application de certaines étapes aux différentes filières de production et valorisation de biogaz est décrite en section 9.2/. Des synthèses par filière sont ensuite présentées en section 10.

9.1 Principes et étapes de la démarche HACCP

La méthode HACCP (Hazard Analysis – Critical Control Point) ou, en français « analyse des risques - points critiques pour leur maîtrise » est une méthode développée vers la fin des années 60 aux Etats-Unis, par la NASA en vue de fabriquer des aliments pour les astronautes. C'est donc une méthode de maîtrise de la sécurité sanitaire des denrées alimentaires. Elle se fonde sur le *Codex Alimentarius*. Elle est aujourd'hui recommandée par la directive 93/43/CEE relative à l'hygiène des denrées alimentaires. Elle peut toutefois s'appliquer à tout process, la démarche s'articulant d'abord, en une identification et hiérarchisation des dangers puis, en une détermination de points critiques pouvant être contrôlés à des fins de maîtrise des risques³.

La méthode repose sur sept principes fondamentaux et 12 étapes clé (cf. Figure 3) qui s'enchaînent et permettent de définir un système d'assurance de la sécurité sanitaire.

Lors de la première étape une équipe, de préférence multidisciplinaire et formée, doit être constituée pour mettre en œuvre la démarche HACCP.

La deuxième étape de description du produit s'attache à recueillir des données sur le produit fini et éventuellement le produit en cours de fabrication mais aussi sur les matières premières (ex : caractéristiques physico-chimiques).

La troisième étape définit l'utilisation finale du produit.

La quatrième étape consiste en la schématisation des procédés de production. Des diagrammes, de production ou de fonctionnements sont réalisés. Ils doivent reprendre les étapes du processus. La cinquième étape est une vérification / confirmation sur place de ces diagrammes.

Lors de la sixième étape, une liste des dangers associés à chaque phase de production / fabrication est définie. Les groupes de dangers sont chimiques, physiques et microbiologiques. Une évaluation qualitative (conséquence, gravité) et quantitative (probabilité d'apparition, fréquence) des dangers doit ensuite être effectuée afin d'évaluer un degré de risques.

Pour effectuer cette évaluation, il convient de s'appuyer sur des données scientifiques propres ou extraites d'autres sources (bibliographie). A partir de ces données une hiérarchisation des dangers peut être réalisée.

Une grille d'évaluation telle que celle présentée dans le Tableau 3 peut être constituée. Celle-ci intègre des données sur la gravité et la fréquence de survenue, en utilisant les scores en fonction de la gravité plus ou moins importante et la fréquence plus ou moins élevée des événements étudiés.

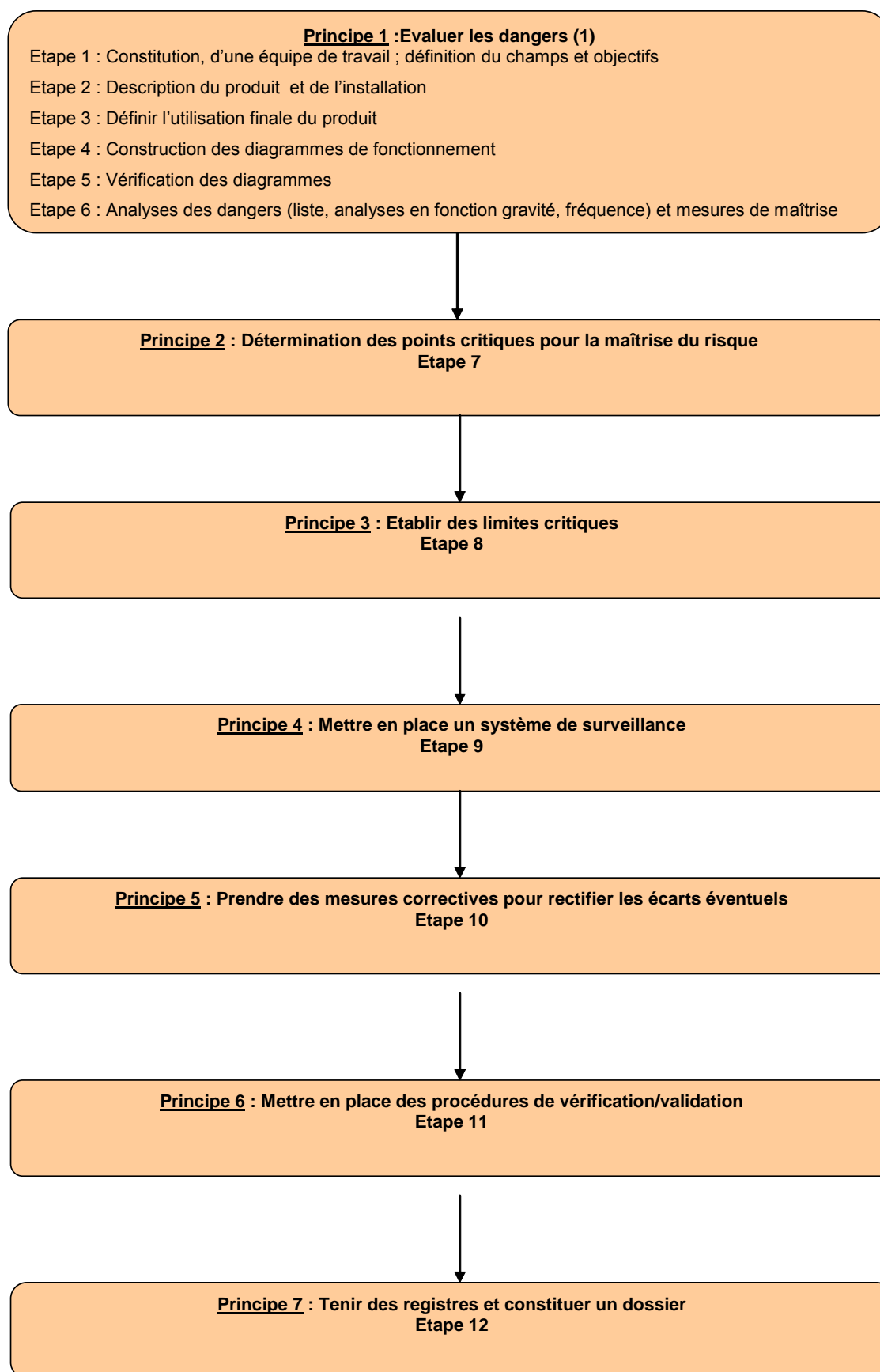
Tableau 3 : Grilles de hiérarchisation des dangers ou risques.

Fréquence	Elevée – 3	Moyenne – 2	Faible – 1
Gravité			
Importante – 3	3 x 3 = 9	3 x 2 = 6	3 x 1 = 3
Modérée – 2	2 x 3 = 6	2 x 2 = 4	2 x 1 = 2
Faible – 1	1 x 3 = 3	1 x 2 = 2	1 x 1 = 1

Dans le cadre de cette sixième étape, les mesures préventives ou de maîtrise des dangers/risques identifiés doivent être décrites. Ces mesures sont des actions ou activités visant à éliminer le danger ou à réduire son occurrence à un niveau acceptable. Elles doivent être formalisées sous formes de procédures et instructions.

³ Des détails peuvent être consultés par exemples sur les sites suivants : <http://agriculture.gouv.fr/guides-de-bonnes-pratiques-d,10454> ; <http://www.haccp-guide.fr/> ; http://ec.europa.eu/food/training/haccp_fr.pdf
Etude RECORD n°11-0673/1A

Figure 3 : Principes et étapes de la démarche HACCP.



Ces six premières étapes constituent le premier principe de la démarche HACCP à savoir, l'évaluation / hiérarchisation des dangers / risques.

Les principes suivants visent à :

- déterminer les points critiques pour la maîtrise du risque, un point critique constituant une procédure ou étape où la perte de maîtrise entraîne un risque inacceptable (principe 2 ; étape 7). Des arbres de décisions pour identifier si un point est critique sont utilisés,
- établir des seuils pour chaque point critique (principe 3, étape 8). Il s'agit de définir des critères qui indiquent si une opération est maîtrisée pour un point critique particulier avec l'instauration de tolérance (ex : température). En théorie, ces seuils critiques doivent être mesurables,
- établir un système de surveillance pour chaque point critique (principe 4, étape 9). Un plan de surveillance définit les moyens, méthodes, fréquences de mesures ou d'observations pour s'assurer du respect des seuils définis précédemment,
- prévoir des mesures correctives pour chaque point critique afin de rectifier les écarts s'ils se produisent (principe 5, étape 10),
- établir des procédures de vérification de l'ensemble de la démarche HACCP afin de s'assurer de l'efficacité du système et de son application effective (principe 6, étape 11). Des audits peuvent être réalisés,
- constituer des dossiers et registres complets de la démarche (principe 7, étape 12).

9.2 Applications de certaines étapes HACCP à l'étude des filières de production, valorisation de biogaz

9.2.1 Remarques préalables : retour d'expérience sur la démarche HACCP et termes employés dans le cadre de cette étude

Retour d'expérience sur la démarche :

La démarche HACCP a été employée dans le cadre de cette étude, son application ayant été initialement demandée dans le cadre de l'appel d'offre de RECORD.

Pour rappel, même si elle a été développée pour la maîtrise du risque sanitaire des denrées alimentaires, elle est applicable à tous process. La mise en œuvre d'une telle démarche a, de plus, l'intérêt de formaliser et structurer les informations recherchées. Ainsi en particulier concernant le premier principe de la démarche (l'évaluation des dangers), les 6 étapes appliquées aux filières biogaz sont décrites ci-après (cf. sections 9.2.2 à 9.2.6).

A noter cependant qu'une autre démarche telle que l'HAZOP (HAZard and OPerability study) ou l'AMDEC (Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité) ayant également pour objectif d'identifier et hiérarchiser dangers, risques ou causes aurait également pu être suivie. En effet ces méthodologies reposent toutes sur le recueil de données relatives aux dangers ou effets, à la gravité des conséquences, à la probabilité de survenue de l'évènement ou de la cause.

La présente étude ayant porté non pas sur les installations proprement dites mais sur les filières de façon générale, les étapes suivant l'évaluation des dangers (identification des points critiques, des seuils à respecter, des mesures correctives, ...) nous sont apparues en revanche moins transposables. A noter aussi, que les diagrammes constitués pour être représentatifs des différentes filières de production de biogaz sont probablement plus simplifiés que si l'on avait voulu décrire dans le détail une installation donnée.

Rappel de l'objectif de l'étude, termes employés dans le cadre de cette étude :

Pour rappel, dans le cadre de cette étude, l'objectif n'était pas d'évaluer les risques au sens strict du terme même si les principes de l'évaluation des risques ont été parfois appliqués.

L'objectif était d'identifier des points critiques au niveau des filières, portant sur différents types de dangers (ex : microbiologique, chimique) et pour lesquels il semble pertinent de sensibiliser les acteurs pour qu'ils mettent en œuvre les moyens de maîtrise existants et/ou approfondissent les données en réalisant des évaluations des risques plus détaillées à certains postes de travail.

Le contenu de cette étude, en particulier illustré sur les diagrammes, reste global au niveau de chaque filière et ne peut être utilisé par une entreprise ou un site comme résultats de l'évaluation des risques professionnels ou d'une étude de dangers ICPE.

Afin de ne pas prêter à confusion avec une évaluation des risques professionnels ou une étude de dangers ICPE, en concertation avec le comité de suivi de l'étude RECORD, certains termes ont été évités et les suivants ont été employés :

- le terme « gravité des conséquences » a été évité au profit du terme « enjeux »,
- la probabilité de survenue a été évoquée sous le terme de « niveau de retour d'expérience ».
- il a été ensuite déterminé des « niveaux de criticité » par le croisement des données « enjeux » et « niveau de retour d'expérience » (cf. section 9.2.6).

9.2.2 Etape 1 : constitution d'une équipe

Une équipe de travail au sein d'Eurofins Expertises Environnementales a été mise en place. Elle regroupe des intervenants multidisciplinaires :

- Emilie Gardeur- Algros : Chef de projet, Docteur en pharmacie, disposant de compétences en évaluation des risques,
- Thierry Chesnot, Docteur en Microbiologie,
- Tony Paris, Docteur en Microbiologie,
- Anne-Marie Charissou, Docteur en Ecotoxicologie, disposant de compétences en évaluation des risques,
- Céline Bronner, Ingénieur qualité de l'air et experte des risques chimiques professionnels (activité d'hygiène industrielle).

Cette équipe s'est aussi appuyée sur les membres du comité de suivi de l'étude (cf. Tableau 4) ceux-ci représentant différents filières de production de biogaz. Des entretiens téléphoniques visant à décrire les filières et postes de travail associés ont été menés avec certains membres.

Tableau 4 : Membres du comité de suivi de l'étude.

Membres comité de suivi	Sociétés
Bénédicte COUFFIGNAL	RECORD
Gérard KECK	VETAGRO Lyon, RECORD
Guillaume BASTIDE	ADEME
Michael FISCHER	SITA BIOENERGIES
Frédérique LÉBOVITS-BRAVIN puis Olga OLIVETI SELMI et Solène DE FERRIERES	GDF SUEZ
Estelle OUDART	SOCOTEC
Adeline RAIN	TIRU
Audrey MORAND	SARP INDUSTRIES
Philippe RUAT	SECHE

9.2.3 Etape 2 : description du produit

Deux types de produits peuvent être considérés dans le cadre de cette étude :

- d'une part, le biogaz. A noter que l'on peut distinguer le biogaz brut, le biogaz épuré des composants tels que l'H₂S et, le biométhane.
- d'autre part, le digestat tel quel ou composté.

Dans le cadre de cette étape, les matières premières ou intrantes doivent également être décrites. Celles-ci varient en fonction des filières.

Ainsi, pour chaque filière étudiée, des informations relatives aux substrats traités, aux digestats obtenus et au biogaz produit sont fournies dans les synthèses (en section 10/).

Des données ont notamment été collectées en termes de teneurs en substances chimiques, agents pathogènes présents dans ces matières et/ou émis par celles-ci. Elles sont fournies dans les synthèses par filière dans les sections suivantes :

- « Données sur la composition des substrats et digestats ; effets de la digestion anaérobie sur les micropolluants inorganiques, organiques et microorganismes pathogènes »,
- « Données sur la composition chimique des biogaz des filières de méthanisation, production de biogaz ».

9.2.4 Etape 3 : description de l'utilisation finale du produit

Pour rappel, le produit biogaz peut être valorisé :

- en chaleur
- en électricité
- en biométhane en vue d'être injecté dans les conduites de gaz naturel ou en vue d'être utilisé comme carburant de véhicules.

Ces utilisations finales guident les spécifications du biogaz. De façon générale, les composants à éliminer selon les modes de valorisation sont les suivants (ATEE, Club Biogaz, 2012) :

- valorisation en chaleur - eau, soufre (H₂S, éventuellement),
- valorisation en électricité ou cogénération : eau, soufre (H₂S), organo-halogénés (éventuellement),
- valorisation en carburant : eau, soufre (H₂S), organo-halogénés (éventuellement), carbone (CO₂), métaux (éventuellement),
- valorisation en biométhane pour injection dans le réseau de gaz naturel : eau, soufre (H₂S), organo-halogénés (éventuellement), carbone (CO₂), métaux (éventuellement), oxygène (éventuellement). Des prescriptions techniques des différents opérateurs de réseau sont par exemple disponibles en ligne sur le site « Injection Biométhane » <http://www.injectionbiomethane.fr/construire-votre-projet/2-1-faisabilite/2-1-considerations-generales.html> ; consulté le 15 mars 2013.

Le digestat peut être épandu dans le cadre de plans d'épandage ou compostés puis être considérés comme amendements organiques.

Sur la base du bilan du Club Biogaz, les voies de valorisation les plus répandues par filière sont présentées dans les synthèses (section Description des filières) et illustrées sur les diagrammes de fonctionnement.

A noter qu'à ce jour, les valorisations les plus répandues en France sont la co-génération, la production de chaleur seule ou la production d'électricité. Le développement de la production de biométhane étant assez récente en France (principalement lié à des aspects réglementaires et économiques plutôt que techniques⁴), elle n'apparaît pas sur les diagrammes constitués. A noter que quelques sites produisent cependant du biométhane : une décharge avec valorisation en carburant *in situ* et deux usines de traitement d'ordures ménagères l'injectant dans le réseau de gaz naturel (communication personnelle, Olga Oliveti Selmi, GrDF). Dans d'autres pays en Europe, la production du biométhane est une réalité depuis la fin des années 80 (quelques sites) - avec un essor dans la moitié des années 2000. Le biométhane est soit valorisé en tant que carburant (par exemple en Suède) soit injecté dans le réseau (par exemple en Allemagne) (IEA Bioenergy, 2009). Une analyse de la voie de valorisation en biométhane est proposée en annexe 4.

9.2.5 Etapes 4 et 5 : constitution et vérification des diagrammes de fonctionnement

Sur la base du bilan dressé en 2011 concernant les installations de méthanisation en France par le Club Biogaz, des diagrammes par filière ont été construits. Ils représentent les types d'installations les plus répandues (cf. section 8/ et section 10/ : synthèse par filière).

Ils illustrent :

- les étapes en amont de la méthanisation (ex : stockage en préfosse, tri de déchets, ...)
- l'étape de méthanisation en indiquant la technologie du digesteur, la température de digestion et le type de brassage les plus répandus,
- le cas échéant, les traitements d'épuration en général mis en œuvre,
- la valorisation du biogaz la plus répandue par filière,
- les étapes de gestion du digestat (stockage, compostage, épandage).

Ces diagrammes n'ont pas été vérifiés sur place. De plus ils s'appliquent à une filière générale et ne représentent donc pas toutes les installations.

Cependant la validation du comité de suivi et/ou de professionnel des secteurs peut être considérée comme l'étape 5 de vérification de la démarche HACCP.

⁴ Pour rappel, l'arrêté fixant les conditions d'achat du biométhane injecté dans les réseaux de gaz naturel date du 23 novembre 2011 (il a été modifié par l'arrêté du 27 février 2013).

9.2.6 Etape 6 : identification et hiérarchisation des dangers

① Lors de cette étape, et suite au recueil de données bibliographiques une **liste de dangers** inclus dans notre analyse a d'abord été dressée. Cette liste est fournie ci-dessous. Ces dangers ont ensuite été associés aux étapes et phases (fonctionnement, maintenance, dysfonctionnement) des installations.

Les dangers identifiés sont les suivants :

- danger électrique : il est considéré dans le cas de valorisation électrique du biogaz (raccordement au réseau EDF, armoires électriques) en particulier lors de la mise en service de l'installation, lors d'opérations de maintenance et d'interventions exceptionnelles en mode dégradé (soit lors de dysfonctionnements). *A noter que le danger électrique est à considérer dès lors qu'une armoire électrique est présente notamment,*
- incendies / explosions de zones ATEX / biogaz : ces événements peuvent survenir du fait de la présence (en général) majoritaire dans le biogaz de méthane, gaz inflammable. En mélange stœchiométrique dans l'air, il peut exploser en cas de source d'ignition. Dans les filières de méthanisation, des zones ATEX doivent donc être définies selon la réglementation en vigueur (Directives 1999/92/CE et 94/9/CE⁵). Des zones ATEX peuvent se former en espace entièrement ou partiellement confiné ou, à l'air libre. Des zones sont identifiées au niveau des digesteurs / gazomètres, brides et raccords des conduites de biogaz, torchères et milieux confinés au niveau desquels des fuites de biogaz pourraient se produire. *A noter que les dangers identifiés au niveau des digesteurs, gazomètres, canalisations, torchères comprennent les soupapes, brides, raccords, joints, pots de purges des condensats,*
- blessures, chutes peuvent survenir lors d'accidents du travail. D'après les statistiques disponibles (CNAMTS et MSA), ils sont le plus souvent provoqués lors de l'emploi d'objets (par exemple dans le cas d'opérations de maintenance) ou correspondent à des chutes avec ou sans dénivellation. Les blessures ont donc été identifiées comme des dangers possibles pendant les phases de maintenance notamment des appareils de valorisation, lorsque des chutes de hauteurs sont possibles (par exemple en bord de bassins, fosses) ou lors des phases de maintenance des digesteurs par exemple (ex : montée sur les toits des digesteurs).
Dans le cas des secteurs des ordures ménagères et ISDND, suite au retour d'expérience de plusieurs professionnels, et aux quelques événements recensés dans la base de données EPICEA⁶ de l'INRS (cf. synthèses de ces deux filières), une situation particulière au niveau des quais de vidage des déchets a été identifiée (risque de chutes, basculement camion, blessures importantes suite à contact avec engins),
- brûlures : des brûlures (hors situation d'incendie) peuvent être provoquées par le contact avec des machines du type chaudière ou moteur. Elles pourraient aussi survenir au contact avec des conduites de biogaz ou digestat non calorifugés. Elles peuvent être liées à des produits chimiques corrosifs (ex : acides) utilisés par exemple pour le traitement des digestats, ou encore au condensat présent dans les canalisations de biogaz (en présence d'eau et d'H₂S, formation d'acide sulfurique),
- intoxications à H₂S : l'hydrogène sulfuré est effectivement un gaz produit par la dégradation anaérobie de substrats biodégradables. Il peut, comme déjà indiqué, en présence d'eau, former de l'acide sulfurique, très corrosif. L'émission d'H₂S est en particulier redoutée dans les locaux confinés (fuite de biogaz), lorsque les matières premières se trouvent en

⁵ La directive 1999/92/CE, transposée en droit français par les décrets 2002-1553 et 2002-1554, et par les arrêtés des 8 et 28 juillet 2003, concerne la protection des travailleurs susceptibles d'être exposés aux risques des atmosphères explosives

La directive 94/9/CE, transposée en droit français par le décret 96-1010, relatif aux appareils et aux systèmes de protection destinés à être utilisés en atmosphères explosibles. Ce décret définit des catégories et des exigences essentielles.

⁶ EPICEA est une base de données nationale gérée par l'INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles) rassemblant plus de 18 000 cas d'accidents du travail survenus, depuis 1990, à des salariés du régime général de la Sécurité sociale. Ces accidents sont mortels, graves ou significatifs pour la prévention.
<http://www.inrs.fr/accueil/produits/bdd/epicea.html> ; consulté le 02/10/2012

anaérobie (ex : préfosse) ou lorsque des déchets incompatibles se retrouvent en mélange (INERIS, 2012 a),

- anoxie liée au remplacement de l'oxygène par d'autres gaz (CO₂, CH₄) : ce scénario est en particulier envisageable dans les locaux confinés, en cas de fuite de biogaz,
- intoxications à l'ammoniac : la problématique de l'émission de l'ammoniac est notamment envisagée lors du compostage des digestats, le compostage de différents substrats pouvant effectivement générer des pics d'émission importants de ce gaz (INRS, 2010),
- intoxications chroniques à d'autres substances chimiques qu'H₂S et NH₃ par inhalation de biogaz et/ou ingestion/inhalation de poussières contaminées aérosolisées⁷. Les substrats traités en méthanisation étant contaminés par un certain nombre de micropolluants organiques et inorganiques, certains composés se retrouvent dans le biogaz et les digestats. Ainsi la gestion des matières entrantes mais aussi des digestats peut provoquer l'exposition des opérateurs par inhalation et ingestion de poussières aérosolisées notamment. L'exposition au biogaz est potentielle notamment en cas de dysfonctionnement (fuites) ou lors de maintenance (ex : purges de réseaux de biogaz, manipulations au niveau des différentes soupapes des digesteurs, gazomètres et pots de purge des condensats). Le relargage de tels composés serait aussi possible lors de la maintenance (changements) des systèmes de charbons actifs pouvant être utilisés pour l'épuration du biogaz,
- risque microbiologique incluant les pathologies suivantes : infections, allergies, inflammations. Les substrats traités en méthanisation sont tous potentiellement contaminés par des microorganismes pathogènes, notamment d'origines fécale et respiratoire. Les substrats constituent de plus des environnements propices aux développements de bactéries et champignons. Ces microorganismes et leurs dérivés (endotoxines, mycotoxines) peuvent en particulier être aérosolisés (formation de bioaérosols) et conduire à l'exposition des opérateurs lors de certaines opérations (gestions des matières entrantes et sortantes, compostage),
- troubles musculo-squelettiques : ceux-ci sont des troubles liés à des postures, gestes, vibrations, port de charge. Ils peuvent en particulier survenir pour des conducteurs d'engins présents dans leur véhicule toute la journée ou sur une longue période, mais aussi chez des opérateurs répétant des gestes comme lors du tri de déchets ou lors de la pose de canalisations en ISDND par exemples,
- nuisances sonores. Le bruit est lié aux véhicules, moteurs / chaudières de valorisation du biogaz, moteur des circuits de recirculation de biogaz, digestats,
- nuisances olfactives. Les nuisances olfactives sont liées à des composés malodorants volatils qui peuvent ne pas être toxiques. Peuvent être cités des composés soufrés, des acides gras volatils, ... Toute dégradation de matière organique génère des odeurs. Cependant la méthanisation (hors secteur ISDND) se déroule en système clos (en fonctionnement normal). Les nuisances olfactives dans les filières de production de biogaz ne sont donc pas liées au biogaz mais aux étapes de gestion de matières (entrantes, voire digestats).

② Pour ces dangers, des **niveaux d'enjeux** ont ensuite été attribués en fonction des conséquences potentielles. Arbitrairement 3 niveaux ont été définis et des scores leur ont été appliqués :

- niveau élevé – score de 3,
- niveau moyen – score de 2,
- niveau faible – score de 1.

Ils sont fournis et argumentés dans le Tableau 5 et rappelés dans les synthèses par filière.

⁷ L'inhalation et l'ingestion de poussières aérosolisées sont les deux voies d'exposition potentielles des opérateurs retenues dans cette étude. En effet, il a été exclu les voies par ingestion (volontaire ou accidentelle) de substrats/digestats et le contact cutané. S'agissant de professionnels l'ingestion volontaire comme l'ingestion accidentelle (moyens de protection, lavage des mains) semblent peu probables. La voie cutanée est quant à elle souvent considérée comme négligeable au regard des autres voies (même si certaines substances comme le toluène peuvent avoir une pénétration cutanée importante) et des moyens de protection peuvent aussi être employés. De plus, les VLEP sont définies uniquement pour la voie inhalation.

Tableau 5 : Dangers étudiés dans le cadre de cette étude - niveaux d'enjeux attribués en fonction des conséquences potentielles.

Dangers	Niveaux d'enjeux / scores	Argumentaire, source																																
Risque électrique	Elevé - 3	D'après l'INRS (2012), des accidents graves, notamment mortels peuvent survenir par électrisation / électrocution.																																
Incendies / explosions de zones ATEX / biogaz	Elevé - 3	L'explosion d'une ATEX peut engendrer de nombreux dégâts matériels, environnementaux et humains (blessés, morts). Les incendies ou feux torches en particulier liés à des fuites de gaz peuvent aussi être dévastateurs. (INRS, 2008). A noter qu'en milieu extérieur, en cas de fuites au niveau de brides/raccords de canalisations, les pressions dans les canalisations étant faibles (quelques mBar), l'ATEX ne pourra s'accumuler et n'aura pas un volume important (conséquences en terme de surpression relativement faibles). Un feu-torche pourra en revanche survenir avec risque de brûlures pour les opérateurs présents et risque de propagation de l'incendie. En milieu confiné, la formation d'une ATEX et son inflammation / explosion peut engendrer des surpressions importantes (jusqu'à une dizaine de bars) (INERIS, 2008a).																																
Blessures, chutes	Faible - 1	Les accidents du travail (AT) liés à des chutes ou des blessures peuvent avoir des gravités très variables. Cependant d'après les statistiques disponibles (CNAMTS et MSA) quel que soit le secteur d'activité, les plus fréquents (>10 % des AT) ont pour conséquence des douleurs, lumbagos, contusions, plaies ou entorses.																																
<i>Blessures / chutes qui vidage ISDND et filières ordures ménagères</i>	<i>Elevé - 3</i>	<i>Un cas particulier est identifié au niveau des quais de vidages des déchets dans les ISDND et filière de méthanisation des ordures ménagères. Des chutes, basculement camions ont déjà été recensés et ont entraîné de graves conséquences (mort, lourdes blessures) (d'après les retours de professionnels des secteurs et quelques événements recensés dans la base EPICEA).</i>																																
Brûlures	Faible- 1	Les brûlures considérées ici excluent celles éventuellement provoquées lors d'incendies. Elles concernent des brûlures liées par exemple à la maintenance de moteurs ou à l'emploi de produits chimiques corrosifs ou encore au contact avec les condensats des canalisations chargés en acide sulfurique. Elles ne devraient être que limitées (ex : brûlures aux mains).																																
Intoxications aiguës à H ₂ S	Elevé - 3	<p>L'exposition à de fortes concentrations en H₂S peut être rapidement mortelle : par exemple à 963 mg/m³ pendant 10 minutes.</p> <p>Les seuils d'effets létaux et seuils d'effets irréversibles à l'H₂S sont les suivants (INERIS, 2000) :</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Seuils d'effets létaux chez l'Homme :</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">TEMPS (min)</th> <th colspan="2">CONCENTRATION</th> </tr> <tr> <th>mg/m³</th> <th>ppm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>2 129</td> <td>1 521</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>963</td> <td>688</td> </tr> <tr> <td>20</td> <td>759</td> <td>542</td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>661</td> <td>472</td> </tr> <tr> <td>60</td> <td>521</td> <td>372</td> </tr> </tbody> </table> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Seuils d'effets irréversibles chez l'Homme :</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>TEMPS (min)</th> <th>CONCENTRATION (ppm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>320</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>150</td> </tr> <tr> <td>20</td> <td>115</td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>60</td> <td>80</td> </tr> </tbody> </table> </div> </div>	TEMPS (min)	CONCENTRATION		mg/m ³	ppm	1	2 129	1 521	10	963	688	20	759	542	30	661	472	60	521	372	TEMPS (min)	CONCENTRATION (ppm)	1	320	10	150	20	115	30	100	60	80
TEMPS (min)	CONCENTRATION																																	
	mg/m ³	ppm																																
1	2 129	1 521																																
10	963	688																																
20	759	542																																
30	661	472																																
60	521	372																																
TEMPS (min)	CONCENTRATION (ppm)																																	
1	320																																	
10	150																																	
20	115																																	
30	100																																	
60	80																																	
Anoxie liée au remplacement de l'O ₂ par d'autres gaz (CO ₂ , CH ₄)	Elevé - 3	L'anoxie / asphyxie par manque d'oxygène peut conduire à la mort.																																

Dangers	Niveaux d'enjeux / scores	Argumentaire, sources																					
Intoxications aiguës au NH ₃	Moyen - 2	<p>L'ammoniac est un puissant irritant des voies respiratoires. Il peut aussi être mortel ou provoquer des effets irréversibles mais les seuils d'effets, notamment létaux et irréversibles de l'ammoniac sont plus élevés que ceux de l'H₂S. Ils sont les suivants (INERIS, année non précisée) :</p> <table border="1" data-bbox="757 387 1608 655"> <thead> <tr> <th data-bbox="757 387 1010 464">Durée d'exposition</th> <th data-bbox="1010 387 1272 464">Seuils d'effets létaux</th> <th data-bbox="1272 387 1608 464">Seuils d'effets irréversibles</th> </tr> <tr> <td colspan="3" data-bbox="1010 427 1608 464" style="text-align: center;">en mg/m³</td> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="757 464 1010 501">3 min</td> <td data-bbox="1010 464 1272 501">non déterminé</td> <td data-bbox="1272 464 1608 501">700</td> </tr> <tr> <td data-bbox="757 501 1010 537">10 min</td> <td data-bbox="1010 501 1272 537">6183</td> <td data-bbox="1272 501 1608 537">606</td> </tr> <tr> <td data-bbox="757 537 1010 574">20 min</td> <td data-bbox="1010 537 1272 574">4387</td> <td data-bbox="1272 537 1608 574">428</td> </tr> <tr> <td data-bbox="757 574 1010 611">30 min</td> <td data-bbox="1010 574 1272 611">3593</td> <td data-bbox="1272 574 1608 611">350</td> </tr> <tr> <td data-bbox="757 611 1010 655">60 min</td> <td data-bbox="1010 611 1272 655">2543</td> <td data-bbox="1272 611 1608 655">248</td> </tr> </tbody> </table>	Durée d'exposition	Seuils d'effets létaux	Seuils d'effets irréversibles	en mg/m ³			3 min	non déterminé	700	10 min	6183	606	20 min	4387	428	30 min	3593	350	60 min	2543	248
Durée d'exposition	Seuils d'effets létaux	Seuils d'effets irréversibles																					
en mg/m ³																							
3 min	non déterminé	700																					
10 min	6183	606																					
20 min	4387	428																					
30 min	3593	350																					
60 min	2543	248																					
Intoxications chroniques à d'autres substances chimiques qu'H ₂ S et NH ₃ par inhalation de biogaz et/ou ingestion de poussières contaminées aérosolisées	Elevé - 3	Les substances considérées ici sont les divers micropolluants organiques et inorganiques qui peuvent avoir des degrés de toxicité différents mais dont des substances CMR (Cancérogènes, Mutagènes, Reprotoxiques) qui peuvent provoquer de graves pathologies conduisant à la mort (ex : cancers).																					
Risque microbiologique incluant les pathologies suivantes : infections, allergies, inflammations	Moyen - 2	Des pathologies de gravités différentes peuvent survenir, cependant elles devraient en général être relativement courtes et traitables (ex : troubles gastro-intestinaux). Des allergies, inflammations des voies respiratoires peuvent aussi survenir (notamment liées à l'exposition à des bioaérosols) mais, même s'ils elles peuvent être très inconfortables, ne provoquent en général pas la mort.																					
Troubles musculo-squelettiques TMS	Faible - 1	Ces TMS sont des troubles en particulier liés à des postures, gestes répétés, vibrations, port de charges et peuvent provoquer des affections plus ou moins handicapantes mais ne provoquent pas la mort. Ils sont cependant inscrits aux tableaux des maladies professionnelles.																					
Nuisances sonores	Faible - 1	Même si les impacts sur la santé liés au bruit sont souvent sous-estimés, on peut cependant considérer qu'ils sont généralement de faible gravité (ne provoque pas la mort).																					
Nuisances olfactives	Faible - 1	Les odeurs (non toxiques aux niveaux considérés ici) même si elles peuvent être inconfortables sont considérées comme des nuisances de faible gravité (ne provoque pas la mort) <i>Il peut être souligné, qu'en particulier pour des riverains, les nuisances olfactives peuvent cependant avoir des conséquences psychologiques non négligeables.</i>																					

③ Enfin, pour chacun des dangers identifiés et associés aux étapes et phases (fonctionnement, maintenance ou dysfonctionnement) des filières de production, valorisation de biogaz, des informations ont été recherchées afin d'attribuer un **niveau de retour d'expérience** en fonction notamment du fait que de tels événements aient été ou non déjà décrits ou s'ils paraissent plausibles ou non.

Les données utilisées pour attribuer ces niveaux de retour d'expérience sont variables en fonction des dangers concernés. *A noter que cela introduit un certain biais si l'on souhaite comparer les dangers entre eux.*

Il s'agit :

- des données issues du **recensement des accidents / incidents** survenus dans les filières *via* la banques de données ARIA, ainsi que celles issues du rapport relatif au retour d'expérience dans les filières de méthanisation de l'INERIS (2012 a) et des données issues des retours des professionnels des secteurs. Celles-ci ont en particulier été utilisées pour les dangers d'explosions / incendies, intoxication à l'H₂S, blessures / chutes dans les filières ISDND et ordures ménagères au niveau des quais de vidage des déchets,
- des données issues des **statistiques des acteurs du suivi de la santé des travailleurs** (CNAMTS et MSA) concernant les accidents du travail et maladies professionnelles. Elles ont été utilisées pour les dangers « blessures /chutes » et « troubles musculo-squelettiques »,
- des **données bibliographiques relatives aux concentrations observées** dans le biogaz et aux quelques teneurs d'ambiance de travail et/ou d'exposition individuelles disponibles.

Ces éléments ont été considérés pour les dangers chimiques identifiés (soit liés à l'H₂S, au NH₃, aux substances volatiles émises par les matières et présentes dans le biogaz).

La démarche pour ces dangers a été notamment de comparer les données disponibles pour le biogaz (valeurs maximales observées notamment) avec les valeurs limites d'exposition professionnelles (notamment VME : valeur limite moyenne d'exposition définie pour une période de 8H). L'objectif n'était pas de réaliser une évaluation de risques ou une évaluation réglementaire puisque **les teneurs dans le biogaz ne représentent en aucun cas, l'exposition de l'opérateur**. Celui-ci ne sera effectivement jamais exposé à une atmosphère composée de 100 % de biogaz (dans ce cas l'asphyxie interviendrait avant tout effet toxique de substance). Cependant cette démarche permet de situer les teneurs dans le biogaz au regard de ces VME et d'évaluer si l'événement (ici à savoir exposition à des valeurs supérieures aux VME) pourrait être probable ou non.

Lorsque des valeurs d'ambiance de travail ou d'exposition individuelle étaient disponibles, elles ont été aussi comparées à ces VLEP,

- des **résultats d'études épidémiologiques** ayant mis en évidence un lien entre exposition dans des secteurs d'activité et la survenue d'effets sanitaires chez les professionnels.

Ils ont été en particulier utilisés pour les dangers microbiologiques.

Pour ceux-ci, la démarche décrite pour les substances chimiques ne peut être appliquée de la même manière, des VLEP n'étant pas disponibles et des mesures dans le biogaz étant très éparées. L'attribution du niveau de probabilité des dangers liés aux microorganismes est donc principalement issue de quelques données épidémiologiques ayant mis en évidence des liens entre l'exposition à des bioaérosols et des effets sanitaires.

Des résultats épidémiologiques ont aussi mis en évidence un lien entre « l'exposition » au poste de travail (tri de déchets manuel) et l'apparition de TMS.

Arbitrairement trois **niveaux de retour d'expérience** ont été définis et des scores leur ont été attribués :

- niveau de retour d'expérience élevé – score de 3,
- niveau de retour d'expérience moyen – score de 2,
- niveau de retour d'expérience faible – score de 1,

Les éléments justifiant de l'attribution de ces scores sont fournis dans le Tableau 6 et repris dans des tableaux argumentaires dans les synthèses par filière.

Tableau 6 : Dangers étudiés dans le cadre de cette étude - niveaux de retours d'expérience attribués en fonction des données bibliographiques recueillies.

Dangers	Niveaux de retours d'expérience – scores	Filières concernées	Argumentaires
Electrique	Faible – 1	Toutes	D'après l'INRS (2012), ces accidents sont de plus en plus rares (toutes professions confondues, 10 morts / an par électrocution)
Incendies / explosions de zones ATEX / biogaz	Elevé - 3	<p>Toutes</p> <p>Le danger « explosion/incendie d'ATEX » se rencontre au niveau des digesteurs (ne concerne donc pas la filière ISDND à ce niveau), des brides / raccords des canalisations, des postes de brulages (torchères) et dans les locaux de valorisation du biogaz. En ISDND, ce danger se rencontre aussi lors d'interventions pour la construction et l'entretien des réseaux de captage du biogaz (exemple : opérations de découpe).</p> <p>En ISDND, les phénomènes d'incendies sont aussi assez fréquents. Il peut s'agir de flammes apparentes ou de feux couvants (fumerolles uniquement). D'après un professionnel du secteur, ce dernier cas est relativement fréquent et difficile à maîtriser. La cause majeure du phénomène est l'auto-échauffement dans le massif de déchets (phénomènes d'oxydation ou réactions liées à la décomposition des déchets).</p>	<p>Ces événements ont déjà été décrits dans des unités de méthanisation et/ou centres ISDND (source : base ARIA). Un niveau de probabilité élevé – score de 3 a donc été attribué à ces événements quelle que soit la filière. Ces dangers sont effectivement automatiquement présents du fait de la production de biogaz composé essentiellement de méthane, inflammable et pouvant exploser en conditions stœchiométriques dans l'air en cas de source d'ignition. L'INERIS (2012 a) identifie les incendies et les explosions comme les deux principaux phénomènes dangereux des filières de méthanisation. Les risques peuvent cependant être maîtrisés en respectant les règles définies notamment par les réglementations ATEX.</p>
Intoxications à l'H ₂ S	Elevé - 3	Toutes	<p>Des événements d'intoxications à l'H₂S ont déjà été décrits dans la bibliographie, même s'ils ne sont pas forcément à relier à une unité de méthanisation. Ces intoxications sont décrites en particulier dans des milieux confinés ou mal ventilés, lors de la maintenance de cuves ayant contenu des matières organiques (fosse à lisier, cuve de marc de raisins). Un cas d'incompatibilité de déchets a été décrit dans une unité de méthanisation en Allemagne (Rhaderseistedt) (source : base ARIA). L'INERIS (2012 a) identifie les incendies et les explosions, suivi des émissions d'H₂S dans des milieux confinés mal ventilés comme les principaux phénomènes dangereux des filières de méthanisation. De plus, les teneurs déjà observées dans le biogaz des différentes filières de production de biogaz (plusieurs milliers de mg/m³) sont nettement supérieures à la VME (= 7 mg/m³). <i>(Pour rappel, ces teneurs ne représentent toutefois pas l'exposition des opérateurs)</i></p>

Dangers	Niveaux de retours d'expérience – scores	Filières concernées	Argumentaires
Blessures / chutes	Elevé – 3	Toutes	<p>Les accidents du travail de type blessures ou chutes sont les AT les plus fréquents décrits dans les statistiques de la CNAMTS et de la MSA.</p> <p><i>Un score de 3 est également attribués au cas particulier des risques de chutes / blessures au niveau des quais de vidage de déchets des ISDND, ces évènements étant décrits dans la base de données EPICEA de l'INRS et par les professionnels du secteur.</i></p>
Troubles musculo-squelettiques	Moyen – 2	Toutes	<p>Les maladies professionnelles que sont les TMS sont les plus fréquentes selon les statistiques de la CNAMTS et la MSA. Cependant le nombre de maladies professionnelles déclarées par an est plus faible que le nombre d'accidents du travail.</p>
Intoxications au NH ₃	Elevé – 3	<p>Filières dans laquelle le compostage des digestats est réalisé (filières méthanisation de boues de STEP urbaines et d'ordures ménagères).</p> <p><i>Si le compostage est réalisé, dans une autre filière (ex : agricole), l'émission de NH₃ devra aussi être identifiée comme critique.</i></p>	<p>La problématique de l'émission d'ammoniac lors du compostage de différents substrats a été démontrée (INRS, 2010). Des résultats de mesures réalisées en ambiance de travail, cabines d'engins dépassent parfois la VME (7 mg/m³).</p>
Anoxie liée au remplacement de l'O ₂ par notamment le CO ₂	Moyen – 2	Toutes	<p>Le remplacement de l'oxygène par d'autres gaz tels que le CO₂ peut survenir dans toutes les filières produisant du biogaz formé de 20 à 60 % de CO₂ en général. Cet évènement ne peut se produire qu'en cas de fuite dans un local confiné. Les rapports « concentrations dans le biogaz / VME » pour le CO₂ sont plus faibles (< 100, VME = 9000 mg/m³) que pour l'H₂S (> 1000), le niveau de probabilité a donc été considéré comme inférieur pour le CO₂.</p> <p><i>(Pour rappel, les teneurs dans le biogaz ne représentent toutefois pas l'exposition des opérateurs)</i></p>

Dangers	Niveaux de retours d'expérience – scores	Filières concernées	Argumentaires
Intoxications chroniques à des substances chimiques autres qu'H ₂ S et NH ₃ par inhalation de biogaz	Faible – 1	Toutes sauf ISDND	Les valeurs maximales observées dans le biogaz sont inférieures aux VME. <i>De plus, pour rappel, les teneurs dans le biogaz ne représentent pas l'exposition des opérateurs)</i>
	Intermédiaire – 1,5	ISDND	Un niveau intermédiaire entre 1 et 2 a été déterminé dans le cas des ISDND au niveau de l'alvéole en exploitation et des opérateurs de construction / maintenance des réseaux de captages des biogaz. En effet, le biogaz issu d'ISDND contient des concentrations plus élevées en certains composés volatiles en particulier halogénés que les autres biogaz et dont les teneurs maximales sont supérieures aux VME. Cependant il n'a pas été attribué un score de 2 car : <ul style="list-style-type: none"> - les opérateurs ne sont pas exposés à 100 % de biogaz, - les quelques teneurs d'ambiance de travail et d'exposition individuelle disponibles (RECORD, 2001) (notamment pour les conducteurs d'engins intervenant sur les alvéoles) sont en deçà des VME. Cependant la filière ISDND représente une filière pour laquelle l'exposition peut potentiellement être plus élevée que dans les autres filières (d'où score de 1,5). Des équipements efficaces de cabines (médiats filtrants, charbon actif de qualité) permettent cependant de limiter considérablement l'exposition (communication personnelle, O. Schlosser, médecin expert, Suez Environnement). Quelques résultats non disponibles mentionnés par cet expert ne mettraient en évidence aucun dépassement de VLEP.
Intoxications chroniques à des substances chimiques autres qu'H ₂ S et NH ₃ par inhalation de COV et ingestion de poussières aérosolisées	Moyen – 2	Filières OM – tri des déchets entrants	Nadal <i>et al.</i> (2009) ont réalisé une campagne de mesure des COV sur un site de traitement de fractions organiques des ordures ménagères, collectées sélectivement (biodéchets) en Espagne. L'air ambiant dans les cabines de tri, le hall de réception, la zone de méthanisation et celle de compostage a été échantillonné. Les premières étapes de la filière sont les plus émettrices en COV (étape de tri). Les niveaux restent inférieurs aux VLEP espagnols et françaises. Cependant, les auteurs ont aussi conduit une évaluation des risques pour les travailleurs sur la base de valeurs toxicologiques de référence et, lors de l'étape du compostage, les quotients de risque (voie inhalation) restent inférieurs à 1 alors que pour l'étape de tri, le QR du toluène (effet avec seuil, non carcinogène) a été évalué à 5. A noter que l'inhalation et l'ingestion de poussières contaminées est aussi possible à cette étape. L'INRS (2010) note par exemple qu'un agent d'entretien non équipé d'une protection réparant un trommel peut être exposé à des poussières à plus de 8 mg/m ³ (VME poussières inhalables et alvéolaires respectivement de 10 et 5 mg/m ³).

Dangers	Niveaux de retours d'expérience – scores	Filières concernées	Argumentaires
Danger microbiologique (infection, allergie, inflammation) lors de la gestion des matières (bioaérosols)	Moyen - 2	Filières boues de STEP urbaine et ordures ménagères	<p>Quelques études épidémiologiques ont déjà mis en évidence</p> <ul style="list-style-type: none"> - des preuves de liens entre exposition des travailleurs de STEP et des infections, symptômes d'irritations et d'allergies (ORS, 2010). Les agents en cause étaient des endotoxines, parasites, virus et champignons, - des troubles respiratoires aigus et l'exposition des professionnels de la collecte et du tri des déchets (ORS, 2010), associé à l'abondance des bioaérosols.
	Faible - 1 <i>par absence de donnée</i>	Filières Agricoles	<p>Aucune donnée épidémiologique ou rapportée de l'Allemagne par exemple n'est disponible. Cependant, certaines MP des non salariés agricoles sont des affections respiratoires de mécanismes allergiques. Les fermes sont des lieux propices à certains bioaérosols. Les déjections animales et autres substrats sont contaminés par un certain nombre de microorganismes pathogènes par ingestion. Des mesures seraient nécessaires. Par absence de données, le niveau de retour d'expérience a cependant été considéré comme faible.</p>
	Faible - 1 <i>par absence de donnée</i>	Filières industrielles	<p>Aucune donnée n'est disponible concernant spécifiquement des effluents vinicoles (filière industrielle traitée, le nombre d'unités étant le plus élevé). D'après l'INRS (2011), une exposition des travailleurs est possible lorsque des aérosols d'eau sont générés. D'après des résultats de mesures dans des ambiances de travail, les concentrations en bactéries totales sont élevées, de l'ordre de 10⁶ UFC/m³ dans les secteurs suivants : agriculture, fabrication du compost pour la culture de champignons, utilisation fluides de coupes, papetières et porcheries (Goyer <i>et al.</i>, 2001). S'agissant des concentrations en actinomycètes, moisissures, endotoxines, l'industrie papetière n'est pas mentionnée parmi les secteurs présentant les niveaux les plus élevés. Les concentrations d'endotoxines les plus fortes ont été mesurées dans une usine de préparation de pommes de terre. Aucune donnée épidémiologique n'étant disponible à ce jour, le niveau a aussi été considéré comme faible, toutes les filières confondues. Cependant, d'après les résultats de Goyer <i>et al.</i> (2011), la nature et les quantités d'aérosols dépendent des substrats manipulés.</p>
	Intermédiaire -1,5	ISDND	<p>Aucune étude épidémiologique n'a semble-t-il été menée pour étudier spécifiquement un éventuel lien entre exposition à des microorganismes / bioaérosols et des troubles de salariés de la filière ISDND. De façon générale cependant, l'OMS considère que la filière de traitement des déchets municipaux est susceptibles d'exposer les salariés à un risque de pathologies infectieuses, pulmonaires allergiques, bronchites chroniques et hépatites plus élevés que la population générale. Ces risques sont associés à des niveaux de bioaérosols dans l'air de 2 à 4 fois supérieurs dans une ambiance de décharge d'OM par rapport à une ambiance générale (RECORD, 2003).</p>

Dangers	Niveaux de retours d'expérience – scores	Filières concernées	Argumentaires
Danger microbiologique (infection, allergie, inflammation) par exposition au biogaz ou eau condensée des conduites	Nulle - 0	Toutes	Les concentrations dans les biogaz semblent relativement faibles et de l'ordre de la contamination de l'air ambiant. Très peu d'études ont néanmoins été conduites. En l'état actuel des connaissances, les opérateurs ne devraient pas être exposés à des doses importantes pouvant engendrer des pathologies d'après Vinneras <i>et al.</i> (2007). Les mesures de Nadal <i>et al.</i> (2009), dans un centre en Espagne de traitement d'OM par digestion anaérobie et compostage montrent que les niveaux en bioaérosols sont les plus faibles dans la zone de méthanisation : ils sont largement inférieurs aux quelques valeurs seuils proposées.
Nuisances sonores	Moyen - 2	Toutes : lors de l'utilisation de véhicules notamment et au niveau des locaux de recirculation de digestats / biogaz)	Aucune donnée disponible mais les moteurs (des camions ou pour la (re)circulation du biogaz, digestats) engendrent automatiquement du bruit, celui-ci n'étant cependant, pas forcément nuisible, d'autant plus si les règles constructeurs sont respectées.
	Elevé- 3	Toutes au niveau des locaux de valorisation du biogaz	D'après un professionnel et des mesures effectués sur un site, les niveaux de bruit à proximité d'un local de valorisation de biogaz (moteur) sont de 75 à 85 dB(A). Dans le local du moteur, ils s'élèvent entre 95 et 110 dB(A). En tous les cas, l'entrée dans les locaux de valorisation de biogaz nécessite le port de protections auditives.
Nuisances olfactives	Elevé - 3	Toutes	La plupart des matières traitées en méthanisation émettent par nature des composés malodorants (dégradation de la matière organique). A noter que les acides gras volatils formés lors de la dégradation sont les principales substances responsables de ces odeurs.
Brûlures	Faible- 1	Toutes	Les accidents du travail ne rapportent pas de nombreux cas de brûlures. Aucun retour de professionnel n'a été obtenu sur ce point. Elles devraient être rares.

④ Afin de hiérarchiser les dangers identifiés, la matrice « enjeux - retour d'expérience » a été constituée en multipliant les deux scores attribués. Les résultats par danger, étape et filière sont fournis dans les tableaux des synthèses par filière.

⑤ Dans le cas de situations particulières (ex : épuration de l'H₂S, étape pouvant se produire en local confiné, ...) des scores de 0,5 ou 1 ont été ajoutés ou retranchés aux résultats « enjeux X retour d'expérience ». Ceux-ci sont expliqués dans les synthèses par filière.

- ⑥ Trois classes de niveaux de criticité ont ainsi été identifiées avec :
- les points critiques majeurs pour des notes supérieures ou égales à 6 (couleur rouge),
 - des points critiques modérés pour des notes variant de 3 à inférieures à 6 (couleur jaune),
 - et, des points critiques mineurs pour des notes inférieures à 3 (couleur verte).

Ces résultats sont présentés sur les diagrammes de fonctionnement en utilisant des logos représentatifs des dangers, un code couleur et une légende représentative des niveaux de criticité et des phases concernées (fonctionnement, maintenance et dysfonctionnement) (cf. Figure 4). La note représentant le niveau de criticité est uniquement indiquée dans les tableaux argumentaires associés aux diagrammes, conformément aux souhaits des membres du comité de suivi de l'étude RECORD.

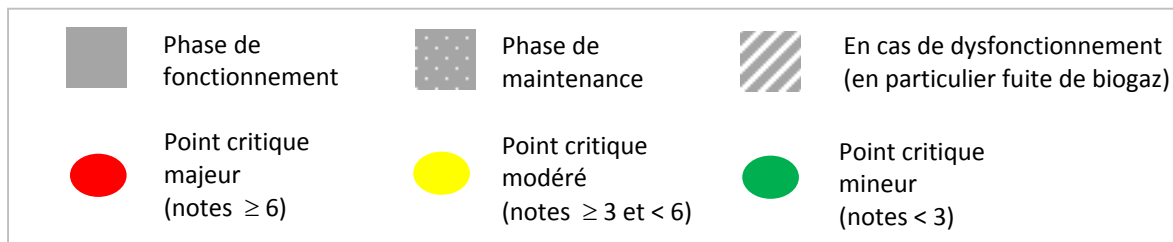


Figure 4 : Légende utilisée pour distinguer les niveaux de points critiques identifiés aux différentes étapes des filières de méthanisation, production, valorisation de biogaz pendant certaines phases spécifiques.

Pour rappel les diagrammes constitués ont pour objectif d'illustrer des points critiques vis-à-vis de la santé et la sécurité des opérateurs des filières de biogaz. Ils visent à alerter le lecteur sur l'importance de mettre en œuvre, au niveau de ces points critiques, les mesures de maîtrise des risques existantes et/ou d'approfondir les connaissances en réalisant des mesures pour évaluer les risques proprement dits.

Le contenu de l'étude et de ces diagrammes est global au niveau de chaque filière et ne peut être utilisé en l'état comme résultat de l'évaluation des risques professionnels localement au niveau d'une entreprise ou d'un site, ou comme le résultat d'une étude de dangers ICPE.

10. Synthèse des données par filière étudiée.

Cette section présente une synthèse par filière étudiée soit pour les filières de :

- méthanisation agricole,
- méthanisation de boues de STEP urbaines,
- méthanisation d'ordures ménagères,
- méthanisation industrielle,
- production de biogaz en ISDND.

Le plan de ces synthèses est le suivant :

- 10.1 Description de la filière en France (source : ATEE, Club Biogaz, 2011)**
- 10.2 Principaux textes / dispositifs réglementaires**
- 10.3 Données sur les ATMP (Accidents du Travail – Maladies Professionnelles)**
- 10.4 Données sur les accidents/incidents recensés**
- 10.5 Données sur les postes de travail**
- 10.6 Données sur la composition des substrats et digestats ; effets de la digestion sur les micropolluants inorganiques, organiques et microorganismes pathogènes**
 - 10.6.1 *Eléments traces métalliques et micropolluants organiques*
 - 10.6.2 *Microorganismes*
 - 10.6.3 *Zoom sur les dangers « inhalables » issus des substrats et digestats*
- 10.7 Données sur la composition chimique des biogaz**
- 10.8 Valeurs limites d'exposition professionnelles (VLEP) et valeurs toxicologiques de référence (VTR) de quelques substances**
- 10.9 Données sur la composition microbiologique des biogaz**
- 10.10 Diagramme de fonctionnement des installations / identification de points critiques pour la santé/sécurité des opérateurs**
- 10.11 Bibliographie citée dans cette synthèse**

Filière agricole de production et valorisation de biogaz

Description de la filière agricole en France (source : ATEE, Club Biogaz, 2011)

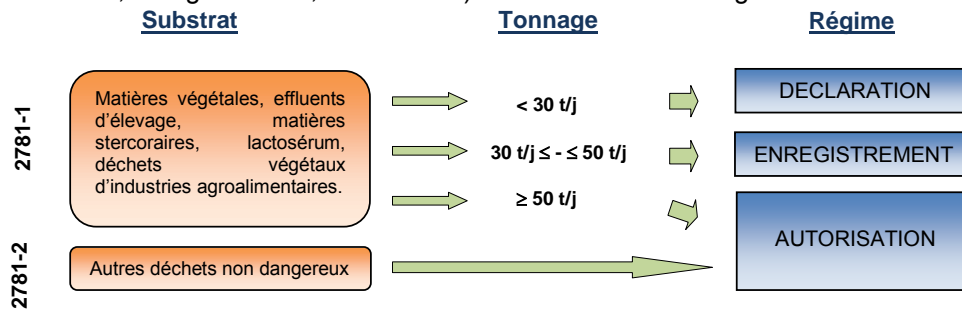
Deux types d'installations de traitement d'effluents agricoles sont distingués :

- des projets à la ferme : l'exploitation se fait par un agriculteur ou groupement d'agriculteurs,
- des projets centralisés / territoriaux, de taille plus conséquente exploités par des sociétés traitant les déchets de plusieurs structures agricoles et effluents provenant d'autres secteurs (coproduits agro-industriels, déchets de grandes surfaces ou collectivités, boues de stations d'épuration...).

Nombre d'installations en 2011	42 à la ferme - 7 centralisées 35 (non précisés) sont en cours de construction <i>A noter qu'en mars 2012, l'Institut de l'Elevage a recensé 138 unités opérationnelles dans le secteur agricole.</i>		
Traitement des intrants	Type de matériel	Nombre installations à la ferme (sur 26 ayant décrit procédés)	Nombre installations centralisées (sur 4 ayant décrit les procédés)
	Broyeur	3	2
	Presse	2	1
	Hygiénisation intrants*	3	3
	Dégrilleur / tamiseur	2	2
	Préchauffage entrants	4	1
	Fosse de pré-mélange	17	1
<i>* L'hygiénisation est mise en place lorsque les matières premières peuvent contenir des microorganismes pathogènes (déchets de grande surface et de restauration collective)</i>			
Technologie du digesteur	Caractéristiques digestion / installation	Installations à la ferme	Installations centralisées
	Voie Humide	41	7
	Voie Sèche*	1	0
	Digesteur Infiniment mélangé	100 %	100 %
	Agitation mécanique Recirculation du digestat	91 % (sur 85 % ayant répondu) 9 %	100 % (sur 71 % ayant répondu) 0 %
	Température de la digestion	1/40 utilise la digestion thermophile à la suite d'une phase mésophile Autres : mésophile	1 utilise une digestion psychrophile Autres : mésophile
Présence de gazomètre	La quasi-totalité des installations de méthanisation d'effluents agricoles sont équipées de gazomètre double membrane situés au-dessus du post-digesteur, parfois sur le digesteur.		
<i>* à noter toutefois que la digestion par voie sèche est amenée à se développer. Des méthaniseurs clé en main en conteneurs, utilisant la digestion sèche apparaissent sur le marché</i>			
Traitement du biogaz	11/39 procèdent à une déshumidification (canalisation enterrée, dessiccateur, sécheur frigorifique, pompe à chaleur) 36/39 procèdent à une désulfuration (11/16 par injection air – 2/16 tour de lavage – 1/16 filtre à charbon, 1/16 compresseur d'air, 1/16 aérateur d'aquarium : petite installation)		
Traitement du digestat	29/57 procèdent à une séparation des phases liquides et solides (centrifugeuse, presse à vis ou piston) Phase solide : séchage (nombre installations non connu) : sécheur à tapis, échangeur à plaque, compostage (1 ferme, 1 territoriale compostent) Phase solide toujours épandue sur exploitations agricoles Phase liquide : épandue ou utilisée pour diluer les matières entrantes ou traitée pour servir d'engrais (acidification, nitrification/dénitrification, osmose inverse)		
Stockage du digestat	Dans la majorité des cas : post digesteur		
Composition du biogaz	50 à 70 % de méthane (moyenne : 60 %) <i>Données issues de 33 installations ayant répondu</i>		
Valorisation		Installations à la ferme	Installations centralisées
	Chaleur uniquement Cogénération	1 41	1 6

Principaux textes / dispositifs réglementaires

Réglementation ICPE – 2 sous rubriques propres à la méthanisation en fonction des substrats traités existent. S'agissant des installations de méthanisation agricoles, la rubrique **2781-1** s'applique selon 3 régimes (déclaration, enregistrement, autorisation) en fonction des tonnages en substrats.



Concernant la combustion du biogaz, la rubrique **2910 C** peut aussi s'appliquer (si la puissance thermique maximale est supérieure à 0,1 MW) sous les trois régimes correspondants à ceux de la rubrique 2781-1.

Le stockage du biogaz est régi par la rubrique **1411** et soumis à déclaration ou autorisation selon les quantités. A noter que d'après l'ADEME (2012), le volume de stockage de biogaz est généralement inférieur au classement ICPE dans les installations de méthanisation agricoles.

« **Règlement (CE) N°1069/2009** du parlement Européen et du conseil du 21 octobre 2009 établissant des règles sanitaires applicables, à compter du 4 mars 2011, aux sous-produits animaux et produits dérivés non destinés à la consommation humaine » : ce texte fixe des règles sanitaires relatives aux matières entrantes, classées sous 3 catégories de sous-produits animaux (SPA), et à l'installation elle-même. Ainsi, certains SPA (catégorie 1) ne peuvent être méthanisés. Il impose la mise en place d'un agrément sanitaire.

L'article L311-1 du Code Rural, modifié par la **Loi de modernisation agricole du 27 juillet 2010**, offre une extension à la notion d'activité agricole : la méthanisation devient une activité agricole.

Le digestat produit peut être valorisé en agriculture pour sa valeur fertilisante. En France, sans traitement additionnel, les digestats sont considérés comme des déchets et non des produits. Ils peuvent être valorisés sur l'exploitation de production dans le cadre d'un plan d'épandage et à condition qu'ils ne présentent pas de risque. Pour rentrer dans une logique produit, les digestats doivent être compostés et peuvent ainsi être homologués ou répondre à la **norme NF U 44-051**⁸ définissant des seuils pour des microorganismes pathogènes, métaux, HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) et PCB (polychlorobiphényles).

Pour en savoir plus : Le cadre réglementaire et juridique des activités agricoles de méthanisation et de compostage (ADEME, 2012)

La **Santé Sécurité au Travail (SST)** des opérateurs agricoles ou forestiers est une démarche décrite dans la directive cadre européenne de 1986 et transcrite en droit français dans le Code du Travail (partie IV) et, pour certaines dispositions spécifiques aux professions du secteur agricole dans le Code Rural. Le Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt a pour mission de veiller à la santé et à la sécurité au travail des opérateurs agricoles ou forestiers. La MSA (Mutualité Sociale et Agricole) a en charge la mise en œuvre de la santé sécurité au travail auprès des salariés et exploitants agricoles.

Données sur les ATMP (Accidents du Travail – Maladies Professionnelles) des non salariés du secteur agricole (source : MSA, 2011)

Parmi les données disponibles à ce jour, la méthanisation n'est jamais mentionnée. Des contacts avec des sections locales de la MSA ont été pris : aucune information propre à cette activité n'a pu être recueillie.

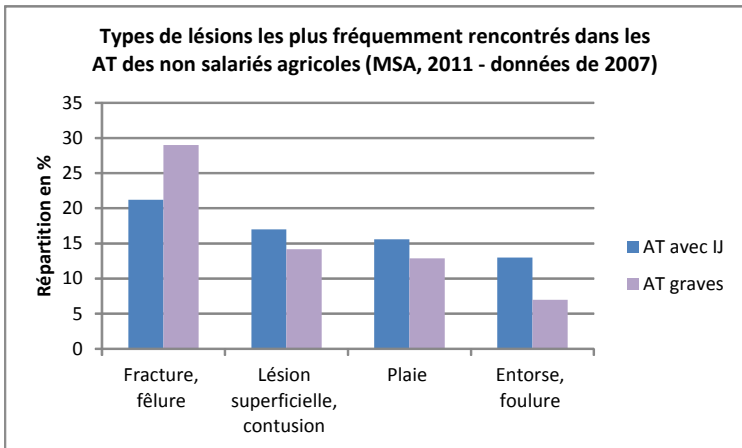
En 2007, près de 29 600 accidents du travail ont été recensés chez les non salariés du secteur agricole (sur 589 797 affiliés) dont 20 200 environ sont des AT ayant donné lieu à des indemnités journalières (IJ), près de 3000 sont des AT graves et 82 ont été mortels.

Les **activités de « chargement, déchargement, manutention, transport »** engendrent le plus grand nombre d'AT avec 10,7 % des AT avec IJ, 9,9 % des AT graves et 10,7 % des AT mortels. La construction, réparation d'installations, bâtiment est aussi à l'origine de 10,7 % d'AT graves.

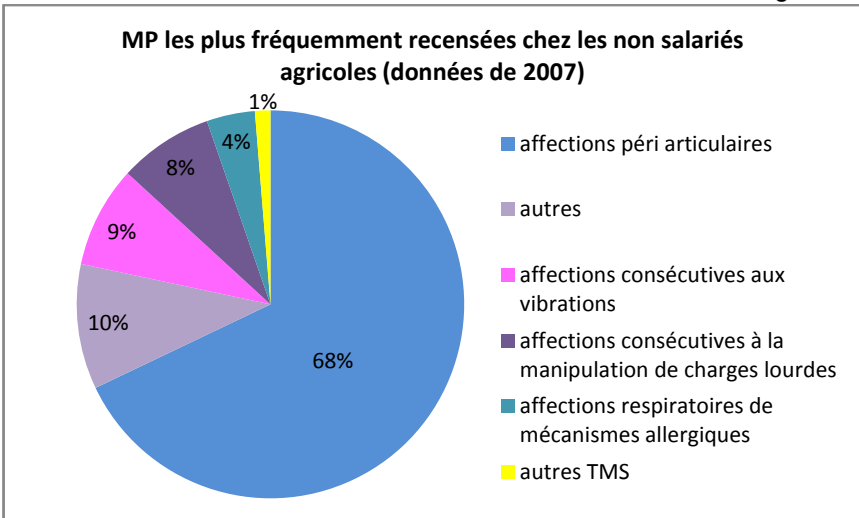
⁸ A noter qu'une autre norme est disponible : NFU 44-095 applicable aux composés à base de boues.

L'élément matériel le plus souvent impliqué dans des AT est représenté par les animaux. Viennent ensuite les sols extérieurs aux bâtiments. Les AT mortels sont plus largement liés aux « Tracteurs agricoles et tracteurs forestiers », « Eléments végétaux non transformés » et « Machines et appareils mobiles ».

Fractures, fêlures, lésions superficielles, contusions, plaies, entorses et foulures sont les types de lésions les plus fréquemment rencontrés (en général >10 % des AT avec IJ et AT graves).



En 2007, 1561 MP ont été recensées chez les non salariés agricoles. Les troubles musculo-squelettiques (TMS) sont les MP les plus fréquentes. Ils rassemblent plusieurs tableaux :



Les troubles musculo-squelettiques (TMS) sont les MP les plus fréquentes. Ils rassemblent plusieurs tableaux :

- affections dues aux vibrations / chocs d'outils ou de machines ;
- affections péri articulaires dues à des gestes et postures ;
- lésions chroniques des ménisques ;
- affections consécutives aux vibrations et,
- affections consécutives à la manipulation de charges lourdes.

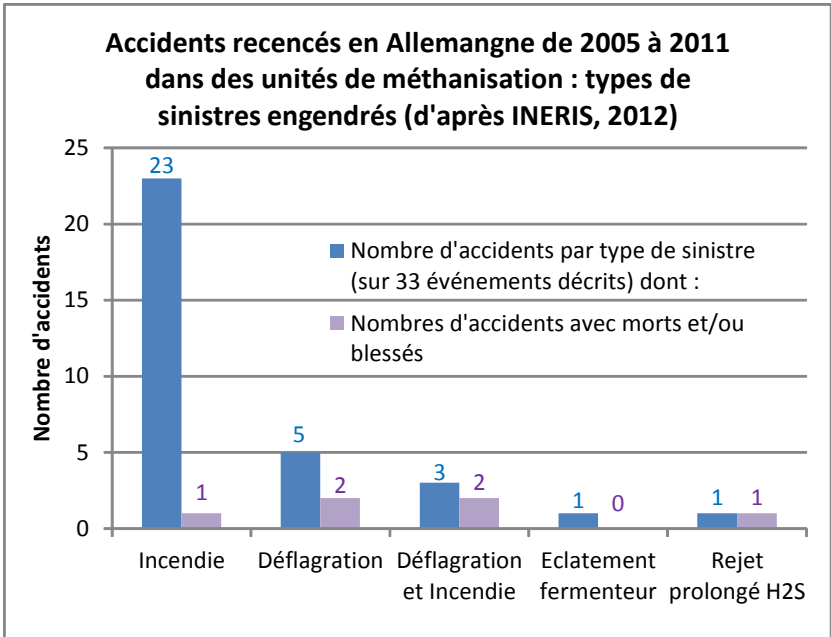
Données sur les accidents/incidents recensés dans les filières de méthanisation agricole

Données issues d'un retour d'expérience mené par l'INERIS (2012) :

L'INERIS a mené, en 2011 et 2012, une analyse sur l'accidentologie en France et en Allemagne des procédés de méthanisation, et de leurs exploitations. Ce retour d'expérience a mis en évidence la difficulté à recueillir des informations sur les incidents et accidents dans les deux pays.

Il apparaît cependant que certaines unités fonctionnelles (centrales de cogénération, systèmes d'injection des solides, pompes, tuyaux, vannes et agitateurs) sont particulièrement vulnérables entraînant des défaillances en termes de sécurité telles que des fuites ou la perte de confinement. Ces conclusions se rapportent à l'ensemble des filières de production de biogaz.

Sur 33 accidents survenus en Allemagne de 2005 à 2011 dans des installations de méthanisation (a priori principalement du secteur agricole mais non clairement précisé) et décrits par l'INERIS (2012), les sinistres recensés sont des incendies (23 cas), des déflagrations (5 cas), des déflagrations et incendies (3 cas), 1 éclatement de fermenteur et un rejet prolongé d'H₂S.



Les principales conséquences sont des dommages matériels mais dans certains cas, il y a eu des morts et/ou blessés. Le rejet prolongé d'H₂S (Usine de Rhadereistedt en 2005) a notamment engendré quatre morts, un blessé grave et dix pompiers blessés. La cause du sinistre était le mélange de déchets laitiers et animaux à faible pH et à 60 °C ayant provoqué une forte émanation d'H₂S, libéré en raison d'un couvercle ouvert dans la salle de réception, ventilée trop faiblement.

A noter que d'après la LSV (organisme d'assurance sociale allemand), 140 accidents en 2009 ont été recensés sur des installations produisant du biogaz en Allemagne (soit dans près de 3 % des installations) (rapporté par INERIS, 2012).

L'INERIS (2006, 2012) mentionne également les incidents suivants :

- débordement du méthaniseur (estimation de 3 à 4 cas en Allemagne par an),
- gel des soupapes du méthaniseur (recensés plusieurs fois sans précision du nombre), celles-ci n'étant donc plus en état de fonctionner. Ces soupapes constituent une mesure de maîtrise des risques,
- envol de la membrane souple d'un méthaniseur industriel (1 cas) : libération du biogaz stocké,
- surpression à l'intérieur du méthaniseur (1 cas en Allemagne, 1 cas en Espagne). Dans un cas, l'accumulation de matières plastiques a engendré la formation d'une couche étanche à la surface de la phase liquide ; la digestion s'est poursuivie sous celle-ci, ayant conduit à l'éclatement du méthaniseur.

Suite à ce retour d'expérience, les principaux phénomènes dangereux des filières de méthanisation à considérer ont été classés par l'INERIS, par ordre de priorité en terme de probabilité d'occurrence :

- les incendies,
- les explosions,
- l'émission imprévue de toxiques gazeux (H₂S) dans des zones confinées mal ventilées (avec risque d'intoxication humaine).

Autres bases de données :

La base EPICEA⁹ de l'INRS ne décrit, à ce jour, aucun accident / événement impliquant une installation de méthanisation agricole.

Depuis 2006, 15 accidents sont recensés à ce jour, dans la base de données ARIA¹⁰ du BARPI concernant des installations de méthanisation agricoles. Les résumés sont présentés ci-dessous.

Outre les cas d'incendie ou explosion pour lesquels les causes ne sont pas toujours déterminées mais probablement liés à des fuites de biogaz, un certain nombre de cas (6) concerne des fuites de fosses ou canalisations entraînant le déversement de lisiers ou digestats dont les conséquences sont principalement une contamination de l'environnement (ex : mortalité aquatique observée). Les causes sont des défaillances des systèmes de pompe ou vannes, la fissure d'une fosse, des actes de malveillance (2 cas suspectés).

Mot-clé : biogaz

A noter : les deux premiers descriptifs d'accident ci-dessous (les 2 derniers en date) sont attribués au secteur du « traitement et élimination des déchets », or il s'agit plutôt d'installations centralisées traitant des déchets issus de l'agriculture, l'agroalimentaire et des déchets de collectivités et de la distribution.

⁹ EPICEA est une base de données nationale gérée par l'INRS (Institut Nationale de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles) rassemblant plus de 18 000 cas d'accidents du travail survenus, depuis 1990, à des salariés du régime général de la Sécurité sociale. Ces accidents sont mortels, graves ou significatifs pour la prévention. <http://www.inrs.fr/accueil/produits/bdd/epicea.html> ; consulté le 02/10/2012

¹⁰ La base ARIA (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents) recense les incidents ou accidents qui ont, ou auraient, pu porter atteinte à la santé ou la sécurité publiques, l'agriculture, la nature et l'environnement. Elle est gérée par le BARPI (Bureau d'Analyse des risques et Pollutions Industriels) au sein de la Direction Générale de la Prévention des Risques du Ministère du développement durable. <http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/index.html> ; consulté le 02/10/2012



N°42076 - 22/04/2012 - FRANCE - 76 - FRESNOY-FOLNY

E38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux

Un feu se déclare à 11h45 sur le sécheur à tapis de boues de digestat d'une unité de méthanisation de 800 m² sur un site de valorisation de déchets organiques (fermentescibles ménagers, déchets verts, boues de STEP et sous-produits agricoles). L'alerte a été donnée à 11h30 par des automobilistes circulant à proximité du site. Les flammes se propagent à 2 cuves de 8 et 4 m³ d'acide sulfurique à 95% (H₂SO₄) qui se déversent dans leur rétention, puis au bâtiment adjacent de 1 000 m² accueillant le biofiltre. Les pompiers, intervenant avec 55 hommes et 3 engins, ne relèvent pas de pollution atmosphérique et éteignent l'incendie en 1 h avec 5 lances à eau. Le service de l'électricité a coupé l'alimentation du site dès le début de l'intervention et l'unité de cogénération alimentée par le biogaz est arrêtée. Une partie des eaux d'extinction s'est mélangée avec de l'acide autour des bâtiments sinistrés, mais le reste est récupéré dans le bassin d'extinction de 5 000 m³ et réutilisé malgré l'acidité du mélange (pH = 1). L'exploitant pompe ces effluents puis les neutralise avec de la craie. En raison des risques d'infiltration des eaux d'extinction dans les sols autour des bâtiments et malgré leurs couvertures argileuses, l'Agence Régionale de Santé (ARS) demande aux exploitants de captage d'eau renforcer leurs contrôles de qualité de l'eau. La membrane de la cuve de maturation de 1300 m³, à proximité du bâtiment biofiltre, a été percée et du biogaz s'échappe à l'air libre : faute d'alimentation électrique, celui-ci ne peut plus être pompé pour être valorisé ou brûlé à la torchère. Au cours de l'intervention, un pompier a été légèrement blessé par des projections d'acide. Le bâtiment de méthanisation est détruit sur 500 m². Le maire, la gendarmerie et l'inspection des installations classées se rendent sur place. Des mesures de toxicité dans l'air faites sous le vent par une cellule risque technologique (CRT) ne relèvent pas de danger. Aucune mesure de chômage technique n'est envisagée pour les 30 employés car seule l'activité de fabrication d'engrais azotés est arrêtée pour plusieurs mois.

La cause du sinistre n'est pas connue. Des travaux de maintenance avaient eu lieu la veille jusqu'à 19h30. Une ronde de surveillance le matin de l'accident n'avait relevé aucun dysfonctionnement. L'inspection demande l'évacuation des déchets (eaux d'extinction et boues de craie et d'acide) vers des filières spécialisées, la vidange progressive de la cuve de maturation produisant le biogaz, l'élimination de son digestat et une surveillance des nappes phréatiques autour du site au moyen des piézomètres existants. Plusieurs départs de feu sur les installations de stockage du biogaz s'étaient produits pendant les 10 jours précédents l'accident et le procédé de méthanisation souffrait régulièrement de dysfonctionnement depuis son démarrage 16 mois avant.



N°41701 - 28/01/2012 - FRANCE - 22 - SAINT-GILLES-DU-MENE

E38.2 - Traitement et élimination des déchets

A la suite d'une panne sur un capteur de niveau, un bac de stockage d'effluents organiques (lisiers de porc, boues de traitement d'industrie agroalimentaire) déborde, dans la matinée, dans une usine de méthanisation. Le produit ruisselle sur le bitume et se déverse dans le bassin d'orage dont les vannes sont restées ouvertes ; 50 m³ de matières organiques liquides polluent le FROMENE et la LIE. Le barrage de paille installé par les pompiers est inefficace en raison de la dilution du lisier dans l'eau. Les autorités interdisent toute activité aquatique. Les services préfectoraux et l'Agence Régionale de Santé (ARS) sont informés tout comme les autorités du Morbihan que la LIE traverse. La gendarmerie ne relève pas de mortalité piscicole. La concentration en ammonium (NH₄⁺) est comprise entre 0,08 et 0,12 mg/l dans l'après-midi. Une station de captage d'eau à 4 km en aval est mise à l'arrêt, l'approvisionnement des 9 600 abonnés est basculé sur un autre réseau. A 21 h, l'exploitant du captage mesure 20 mg/l de NH₄⁺. Le lendemain à 9 h, la concentration en NH₄⁺ est de 1 mg/l au niveau du captage et de 2mg/l au lieu-dit "Le Vaublanc". Une conférence de presse se déroule en fin d'après-midi.



N°40476 - 25/03/2011 - FRANCE - 59 - SOMAIN

A01.41 - Élevage de vaches laitières

Dans un élevage agricole venant d'être équipé d'une unité de méthanisation, la bâche recouvrant le post-digesteur se déchire, libérant un nuage malodorant de méthane et d'ammoniac.

L'accident découle d'une erreur de conception : le filet maintenant la géomembrane du post-digesteur n'assure pas son rôle. Le maître d'œuvre décide alors, en attendant de remplacer le filet par un plancher, de gonfler d'air la bâche qui se déchire. L'installation de combustion de biogaz du site n'étant pas encore reliée au réseau au moment de l'accident, le méthaniseur n'aurait pas dû être alimenté en lisier, ce qui aurait évité tout rejet.

A la suite de l'accident, un plancher remplace le filet de soutien de la bâche qui est également remplacée.



N°42341 - 28/06/2010 - ALLEMAGNE - 00 - DORFEN

A01.50 - Culture et élevage associés

Une pollution du VILS et de 2 ruisseaux affluents caractérisée par une odeur nauséabonde de lisier et une importante mortalité de poissons sur 6km est découverte vers 14h30 par un voisin d'une installation de méthanisation (biogaz agricole) située à 3 km. La soixantaine de pompiers mobilisée met en place des barrages de paille sur les cours d'eau ; les agriculteurs voisins aident à récupérer le lisier et à l'épandre dans les champs voisins. Des centaines de poissons morts sont récupérés ; la police de l'eau constate les dommages sur la faune et la flore et effectue une enquête. L'agriculteur aurait vidé le contenu d'une des deux grandes cuves de fermentation et versé le liquide dans une fosse de sable à environ 300 mètres de sa ferme. Puis une pompe automatique aurait déclenché le transvasement de la seconde cuve vers la première, plus petite, entraînant le débordement de 1 000 m³ de substrat dans un champs puis jusqu'au ruisseau. La fosse de sable ayant également contribué à la pollution est curée.








Une pollution d'un des ruisseau s'était déjà produite 2 mois plus tôt à quelques kilomètres sur une installation similaire, à cause d'une erreur technique.



N°42342 - 22/09/2008 - ALLEMAGNE - 00 - GEHLENBERG

A01.50 - Culture et élevage associés

Un incendie se déclare sur des fermenteurs (digesteurs) dans une installation de biogaz agricole. Une explosion aurait été entendue avant le feu. Les pompiers, en intervention sur une fuite d'huile à une centaine de mètres de l'exploitation, arrivent rapidement sur les lieux. A leur arrivée, 2 digesteurs étaient en feu et l'incendie menaçait un 3ème digesteur ainsi qu'un bâtiment adjacent. Grâce à un important renfort de pompiers, la propagation des flammes a été stoppée avant qu'elle atteignent les autres réservoirs. Aucun blessé n'est à déplorer, les dommages pourraient s'élever à 200 000 euros. L'incendie serait dû à des travaux de soudure.

- 
N°42317 - 15/08/2008 - ALLEMAGNE - 00 - LICHTENAU
A01.50 - Culture et élevage associés
 Sur le site de production de biogaz d'une ferme, une cuve de fermentation presque vide se remplit et déborde à la suite de la défaillance d'une pompe vers 7 h ; 3 à 5000 l de lisiers se déversent sur le sol. Construite après un précédent accident en janvier 2008 (ARIA 42315) durant lequel 100 fois plus de substrat de maïs s'était déversé, provoquant une grave atteinte de la flore et de la faune aquatiques, la digue de protection permet de récupérer tout le lisier répandu. Lors de leur intervention, les secours vérifieront et élargiront cet ouvrage. L'administration locale et la police effectuent des enquêtes ; l'établissement qui était en "stand-by" depuis janvier pour permettre la survie des micro-organismes est cette fois momentanément arrêté. Certaines dispositions imposées après le 1er sinistre n'étaient par ailleurs toujours pas opérationnelles : détection / affichage automatique d'une fuite, collecte et élimination sûres des eaux pluviales... Une défaillance de logiciel ou un sabotage pourrait être à l'origine de l'accident.
- 
N°42328 - 30/05/2008 - ALLEMAGNE - 00 - KLEINSACHSENHEIM
A01.13 - Culture de légumes, de melons, de racines et de tubercules
 Dans l'unité de production de biogaz d'une exploitation agricole (asperges et baies), 100 000 l de lisier s'écoulent d'une cuve de stockage de 5 000 m³ (résidu de méthanisation ?) ; des riverains donnent l'alerte vers 5 h. Le lisier s'est déversé jusqu'à 300 m au-delà de la cour du site, dans la rue et dans des champs. Les secours récupèrent 60 000 l de lisier dans un camion-citerne et nettoient la cour à grande eau. D'après l'exploitant, un acte de malveillance serait à l'origine du déversement car la pompe mise en marche manuellement se situe en hauteur. L'enquête de police n'a pas révélé de défaut technique.
- 
N°42324 - 14/05/2008 - ALLEMAGNE - 00 - SULZ AM NECKAR
A01.50 - Culture et élevage associés
 Dans un centre de production de biogaz dont la chaleur résiduelle est utilisée sur le réseau de chauffage urbain, une fuite enflammée de gaz se produit au niveau d'un réservoir couvert. Devant le risque d'explosion, l'exploitant ouvre manuellement une soupape pour soulager la surpression. Une défaillance technique sur le toit en aluminium serait à l'origine de l'accident. Les alarmes incendie du site se sont déclenchées, mais plusieurs soupapes de sécurité n'auraient pas fonctionné.
- 
N°42320 - 05/02/2008 - ALLEMAGNE - 00 - BAD SASSENDORF
A01.50 - Culture et élevage associés
 Dans une installation agricole, la défaillance d'un joint sur une vanne provoque le déversement de 1 600 m³ de substrat de fermentation de maïs d'une unité de production de biogaz. Le fermier déclenche l'alarme et appelle les pompiers vers 5h45 après avoir constaté l'écoulement du substrat chaud (50°C) dans la cour. Équipés de combinaisons et de protections respiratoires, les pompiers tentent d'arrêter la fuite en vain. Ils réalisent une levée de terre pour limiter la contamination de l'eau mais une partie du lisier se déverse dans un ruisseau se jetant dans l'AHSE, affluent de la LIPPE. Les autorités prélèvent des échantillons d'eau. Dans la journée, les secours récupèrent une partie du purin avec 7 réservoirs de 18 000 l ; celui-ci est épandu dans les champs voisins. Grâce à l'important débit des ruisseaux, la mortalité piscicole a pu être évitée. Sur demande des autorités, l'exploitant installe des murs de protection (rétention?). Un accident similaire se produira sur l'installation le 20 décembre 2011 à la suite d'une défaillance matérielle lors du chargement du fermenteur ; la rétention installée a permis de récupérer une grande partie des 1 500 m³ perdus.
- 
N°42315 - 15/01/2008 - ALLEMAGNE - 00 - LICHTENAU
A01.50 - Culture et élevage associés
 Dans la nuit, 400 000 l de lisiers se déversent par un tuyau de vidange dans la cour d'un site de production de biogaz à partir de maïs fermenté. L'effluent rejoint la BORN, affluent de l'ALTENAU qui se jette dans l'ALME. La faune et la flore aquatiques sont gravement atteintes. La canalisation impliquée est sécurisée et fermée. Sur place vers 9h20, les secours pompent le lisier écoulé et évacuent 60 kg de poissons morts. Les autorités demandent à l'exploitant de construire une digue de protection autour du site. Ces mêmes autorités relèveront par ailleurs une irrégularité en matière de permis de construire, une installation de ce type ne pouvant être exploitée que par un agriculteur. L'établissement dont l'exploitation est suspendue, est placé en "stand-by" pour permettre la survie des micro-organismes utilisés dans le procédé. L'accident résulte d'une erreur au niveau du contrôle / commande des installations. L'établissement sera victime d'un autre sinistre en août 2008 (ARIA 42317).
- 
N°42314 - 16/12/2007 - ALLEMAGNE - 00 - RIEDLINGEN
A01.50 - Culture et élevage associés
 Dans une zone agricole, un fermenteur de 22 m de haut et de 17 m de diamètre explose vers 4h dans une installation de production de biogaz mise en service 2 jours plus tôt. L'installation appartient à une association de 13 agriculteurs (projet de 3 millions de dollars). Le fermenteur, en cours de chauffage, contenait 800 m³ d'eau, 1 700 m³ de lisier de bovins et 1 600 m³ de substrat de fermentation en provenance d'une autre installation de biogaz. Les débris et le lisier sont projetés jusqu'à 200 m, 700 l de fuel se répandent sur le sol à la suite de la rupture d'une cuve. Aucune victime n'est à déplorer. L'intervention mobilise 75 pompiers, 12 agents d'un groupe d'intervention d'urgence et des policiers. Les pompiers récupèrent l'hydrocarbure et pompent le lisier qui sera épandu dans les champs. Le fermenteur et plusieurs machines sont détruits, des bâtiments proches ont également été atteints ; les dommages matériels sont évalués à 1,5 millions d'euros. Aucune pollution aquatique n'est relevée. Les causes et circonstances de l'accident ne sont pas connues. Une phase essai avait été lancée 48 h plus tôt et des réglages effectués par un électricien et un mécanicien avaient eu lieu la veille vers 19 h. Les dernières analyses du gaz du 13/12 ne présentaient aucune anomalie. Un témoin affirme avoir vu une boule de feu, d'autres sources évoquent une rupture hydraulique (erreur de dimensionnement lors de la construction).
- 
N°42316 - 19/10/2007 - SUISSE - 00 - PRATTELN
D35.11 - Production d'électricité
 Une explosion se produit vers 15 h lors de travaux de soudure réalisés dans le cadre d'une révision sur la presse d'une usine de méthanisation traitant jusqu'à 15 000 t/an de déchets verts, de déchets de cuisine des ménages et des restaurants, de déchets issus de l'industrie alimentaire et de l'entretien des espaces verts. Le site peut produire 1, 8 millions de mètres cubes de biogaz, soit 10 millions de kilowattheures. Aucun employé n'est blessé, mais le toit et la façade du bâtiment de compostage ont été endommagés.

- N°42322 - 27/03/2007 - AUTRICHE - 00 - SANKT MAGARETHEN AN DER RAAB**
 A01.50 - Culture et élevage associés
 Un dôme d'une cuve de stockage de biogaz de 2 000 m² d'une installation de méthanisation explose à 8h45. Un anneau métallique de 2 m de diamètre est projeté à 30 m, le souffle est ressenti à 100 m. Deux employés qui travaillaient derrière un mur de 4 m de haut à proximité sont indemnes. La police enquête sur l'accident. La cause de l'explosion n'est pas connue.
- N°42325 - 12/03/2007 - ALLEMAGNE - 00 - BABST**
 A01.41 - Élevage de vaches laitières
 Une explosion suivie d'un incendie se produit dans l'unité de méthanisation d'une ferme laitière à 7 h. Un employé éteint les flammes. Plusieurs fenêtres, le toit et l'électronique de commande sont endommagés. La police enquête. Une étincelle pourrait être à l'origine de l'inflammation du biogaz.
- N°42319 - 02/12/2006 - ALLEMAGNE - 00 - NATZUNGEN**
 A01.50 - Culture et élevage associés
 Un réservoir de lisier se fissure dans une usine de méthanisation et provoque la pollution de la rivière BEVER (affluent du WESER) ainsi qu'une mortalité aquatique. Le lit du cours d'eau est dragué sur 1 km. L'exploitant de l'usine de biogaz pompe le lisier déversé et érige des barrages de sable. La cause des fissures n'est pas connue. Le site devait commencer à produire de l'électricité dans le courant du mois.
- N°42321 - 22/10/2005 - ALLEMAGNE - 00 - TETENDORF**
 A01.50 - Culture et élevage associés
 Un feu se déclare vers minuit dans un silo de levure d'une installation de production de biogaz (capacité de production de 4,2 Mégawatt) mise en service depuis 9 mois. Les pompiers protègent les bâtiments et les conduites de gaz proches pour éviter la propagation du sinistre puis attaquent les flammes avec des lances à mousse, dont une sur échelle. Les opérations sont interrompues plusieurs fois pour analyser si la structure du silo peut supporter le surpoids lié aux moyens d'extinction. La cause de l'incendie n'est pas connue.
- Mot-clé : méthanisation (hors redondance avec précédente recherche)
- N°42318 - 29/01/2006 - ALLEMAGNE - 00 - LELBACH**
 A01.50 - Culture et élevage associés
 Dans une usine de méthanisation, des vibrations due à la rupture des fixations du système de chauffage d'un fermenteur font sauter les joints entourant les canalisations et provoquent une fuite de 300 m³ de lisier. Le milieu naturel n'est pas pollué, le sol étant gelé. Des agriculteurs évacuent le lisier. Les fixations du système de chauffage du second fermenteur du site sont renforcées par des boulons. Le concepteur de l'installation contrôle les autres unités qu'il a construit.

Données sur les postes de travail dans la filière méthanisation agricole

A noter : des informations sur les postes de travail et le temps passé ont été recherchées dans le but, d'évaluer l'exposition des opérateurs.

Il est aujourd'hui difficile d'évaluer le temps des exploitants à assurer le suivi et la maintenance des installations de méthanisation agricole.

Certaines maintenances sont de plus effectuées non pas par les exploitants eux-mêmes mais par les installateurs de moteurs ou constructeurs des unités de méthanisation.

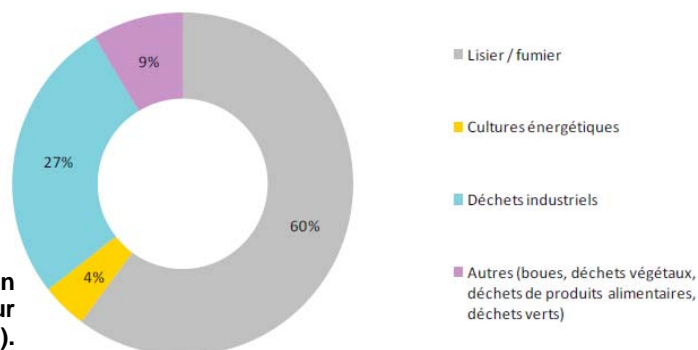
D'après quelques documents descriptifs d'installations agricoles, que cela soit en digestion humide ou en digestion sèche, la gestion des matières intrantes et digestats constituent *a priori* le poste le plus demandeur de temps.

	Quantités de substrats intrants	Production de biogaz	Main d'œuvre nécessaire
Digestion par voie humide			
Ferme du Faascht – Belgique	10 580 tonnes / an	2 020 000 m ³ /an	Temps de surveillance : 2H / jour Temps de maintenance : 3 H / jour Temps de gestion des matières : 8H / jour
Ferme de Mignéville - France	3 260 tonnes / an	784 000 m ³ /an	4 H / jour
Installation collective de Beckerich – Luxembourg	32 200 Tonnes / an	2 500 000 m ³ /an	Temps de surveillance : 2H / jour Temps de maintenance : 3 H / jour Temps de gestion des matières : 8H / jour
Digestion par voie sèche en batch			
Gaec du Bois Joly – France (ADEME, 2010 a)	1 045 tonnes /an	135 000 Nm ³ /an	Suivi quotidien : 11 à 12 minutes par jour (soit 71 h/an) Préparation et réception des substrats : en moyenne 1h30 par semaine Déchargement / chargement des digesteurs : 7H30 tous les 18 jours en moyenne (dont 3H30 pour déchargement et 4 H pour le chargement)

Données sur la composition des substrats et digestats des filières agricoles ; effets de la digestion sur les micropolluants inorganiques, organiques et microorganismes pathogènes

Les filières agricoles de méthanisation en France utilisent en majorité des lisiers et fumiers (à hauteur de 60 % des tonnages).

Les co-substrats traités sont des boues, déchets industriels, de végétaux, de produits alimentaires, déchets verts et, en petites proportions, des cultures énergétiques (Solagro cité par ADEME, 2010 b).



Proportions de substrats traités par les installations en fonctionnement en 2009 en France dans le secteur agricole (Solagro cité par ADEME, 2010).

Éléments traces métalliques et micropolluants organiques

Les déjections animales sont, d'après l'ADEME (2005) contaminées en ETM à des teneurs moyennes variant de 0,1 à 1,2 mg/kg MS pour le cadmium et de 90 à 919 mg/kg MS pour le zinc. Les sources d'ETM sont notamment les compléments alimentaires administrés aux animaux pouvant être enrichis en cuivre, zinc, les végétaux consommés contaminés via les sols, les retombées atmosphériques ou encore suite à l'utilisation d'engrais contenant des ETM. De manière plus ponctuelle, les déjections peuvent aussi contenir des molécules organiques tels que des médicaments, notamment antibiotiques et antiparasitaires utilisés en élevage.

Les autres produits agricoles ou co-produits traités dans des installations

Teneurs moyennes en matières sèches et organiques, éléments minéraux (N, P et K) et ETM des déjections animales (ADEME, 2005)

	Unité	Porcs		Bovins		Moutons & chèvres	Volailles	
		fumier	lisier	fumier	lisier	fumier	fumier	lisier
% MS	% MB	24	6	22	11	31	41	10
% MO	% MS	75	75	75	75	75	75	75
N	g NTK /kg MS	28	83	22	36	25	58	68
P	g P /kg MS	12	28	5,9	8,2	5,5	18	41
K	g K /kg MS	17	42	21	37	26	22	46
Cd	mg/kg MS	0,2 - 0,5	0,2 - 0,5	0,1 - 0,4	0,2 - 0,6	0,1 - 1,2	0,4 - 0,8	
Cr	mg/kg MS	2,4 - 18	2,4 - 18	0,4 - 2,6	2,6 - 15	2 - 12,8	4,1 - 24	
Cu	mg/kg MS	180 - 574	180 - 574	15 - 75	31 - 70	15 - 232	59 - 100	
Ni	mg/kg MS	3,2 - 17	3,2 - 17	1 - 14	3,3 - 14	0,4 - 14,9	4,9 - 17	
Pb	mg/kg MS	0,2 - 12	0,2 - 12	1,4 - 4,3	4,3 - 5,8	0,5 - 13,4	2,2 - 4	
Zn	mg/kg MS	387 - 919	403 - 919	63 - 175	132 - 750	90 - 435	403 - 556	

agricoles ou centralisées peuvent aussi contenir des produits phytosanitaires liés à leur utilisation sur les cultures. L'OFEV (2007) évoque aussi des contaminations en produits organiques tels que PCB, HAP, dioxines, BDE¹¹, principalement dans les zones urbaines, liés aux retombées atmosphériques.

Concentrations en ETM mesurés dans des digestats issus de la méthanisation de déjections animales (en mg/kg MS).

	vaches	cochons	non précisé	bovins	porcs
Pb	9,8	7,9	11,24	8,75	NR
Cr	9,3	11,2	12	10,13	NR
Cu	68,5	303	41	35,6	200
Ni	11,2	13,3	8,18	10,75	NR
Cd	0,6	0,8	0,35	1	NR
Hg	0,05	0,05	0,08	0,99	NR
Zn	377	1064	245	333	513
As	NR	NR	1,95	0,01	NR
Se	NR	NR	0,34	< LQ	NR
Sources	Hahn et Hofftede, 2010	AAMF, 2011		ADEME, 2011	

Les micropolluants inorganiques ne sont pas dégradés par les processus de fermentation anaérobie : ils se trouvent concentrés dans les digestats. En sortie de digesteur, les métaux sont effectivement accumulés dans la phase solide de l'effluent (Couturier *et al.*, 2000, ADEME, 2011). Par exemple, des niveaux variant de 0,6 à 1 mg/kg MS pour le cadmium et de 245 à plus de 1000 mg/kg MS en zinc sont mesurés dans des digestats de déjections animales.

Leur spéciation (et donc leur biodisponibilité et toxicité) peut toutefois évoluer au cours des processus mais reste peu documentée.

(NR : non recherché)

¹¹ PCB : Polychlorobiphényles ; HAP : hydrocarbures aromatiques polycycliques, BDE : bromodiphényléthers,

En présence d'autres déchets que les déjections animales, les concentrations en zinc notamment semblent plus faibles dans les digestats obtenus (ordre de la centaine de mg/kg MS contre 245 à 1000 mg/kg MS).

Concentrations en ETM mesurés dans des digestats issus de la méthanisation de différents déchets traités dans le cas d'installations du type centralisé (en mg/kg MS).

	Installations suisses (moyennes de 11 digestats) <i>Déchets verts et de cuisine (OFEV, 2007)</i>	Installations en France : <i>Déchets de jardins, biodéchets, sous-produits animaux (ADEME, 2011)</i>
Pb	45,9	5,11
Cr	19,6	9,8
Cu	47,3	40
Ni	12,8	7,62
Cd	0,1	0,11
Hg	< LQ	0,022
Zn	113,3	137,58

A noter que d'après les données collectées par RITTMO pour l'étude ADEME (2011), les teneurs en ETM dans les digestats issus des déchets agricoles et matières végétales, quelle que soit leur nature (brut, liquide, solide) sont, en grande majorité, inférieures aux limites de la norme NFU 44-051. Les quelques teneurs supérieures concernent le cuivre et le zinc et ont été observées sur des digestats de lisiers porcins et ou de substrats d'industries agroalimentaires en provenance de l'activité viticole.

S'agissant des micropolluants organiques, les teneurs relevées en HAP et PCB dans des digestats issus de déjections animales (ADEME, 2011) sont de l'ordre de quelques µg/kg MS. Elles sont toutes nettement inférieures aux seuils imposés par la norme NFU 44-051.

Concentrations en HAP et PCB dans des digestats agricoles français – seuils de la NFU 44051 – en µg/kg MS

	Résultats moyens d'analyses de digestats agricoles français (18 pour les HAP - 9 pour les PCB) (ADEME, 2011)	Seuils NFU 44-051
fluoranthène	8,48	4000
benzo(f)fluoranthène	8,44	2500
benzo(a)pyrène	8,415	1500
somme 7 PCB	70,72	non requis (800 par la NFU 44-095)
PCB 52	20,56	
PCB 138	70,78	

En Suisse des teneurs médianes en HAP totaux (*a priori* 16) et PCB totaux (*a priori* 7) de respectivement 4 207 et 31 µg/kg MS pour 13 digestats issus de digestion thermophile et de respectivement 2 314 et 10 µg/kg MS pour 3 digestats de digestion mésophile (déchets verts et de cuisine traités) ont été mesurées (OFEV, 2007). D'autres familles y ont été recherchées ; les teneurs sont variables :

- quelques ng de WHO TEQ¹²/ kg MS pour les DL –PCB, et de I-TEQ⁵ pour les PCDD/PCDF (médiane de 5 digestats),
- de 0,3 à 13,8 µg/kg MS par composé BDE (médiane de 5 digestats),
- 82 µg/kg MS de produits phytosanitaires (médiane de 7 digestats),
- jusque 1140 µg/kg MS de DEHP (moyenne de 2 digestats).

Dans l'étude de l'ADEME (2011), les données disponibles pour les digestats agricoles n'ont pas permis de déterminer l'impact des intrants ou des procédés sur les teneurs dans les digestats des polluants organiques. D'après Couturier *et al.* (2000), de manière générale, les composés organiques vont se trouver dégradés par les process en composés en général moins toxiques mais peuvent également être à l'origine de composés ayant des effets néfastes (H₂S notamment). Les auteurs ont résumé les éléments suivants concernant le devenir en méthanisation des micropolluants organiques :

- dégradabilité des composés organiques aliphatiques et des composés organiques monoaromatiques par voies biologiques et chimiques,
- dégradabilité potentielle de certains composés organiques poly-aromatiques par voie biologique (déhalogénéation réductrice) ou par voie chimique,
- faible dégradabilité de certains composés halogénés comme les PCBs et Dioxines et formation par voie biologique de composés en partie déhalogénés de toxicité différente des produits initiaux.
- formation de sous-produits instables aux effets probablement mutagènes et anti-thyroïdiens différents des effets mutagènes des molécules mères (molécules stables)
- en sortie de digesteur, il apparaît :
 - une concentration très faible des micro-polluants organiques dans la phase liquide malgré la présence possible de composés polyaromatiques adsorbés à de la matière dissoute,

¹² les WHO-TEQ et I-TEQ sont des unités d'équivalents toxiques définis par l'OMS

- des composés organiques poly-aromatiques adsorbés à la surface des molécules organiques dans la phase solide, à une concentration voisine de de la concentration initiale en entrée de digesteur ou sous forme de sous-produits de dégradation.

A noter que l'influence des médicaments, en particulier des antibiotiques utilisés dans l'élevage, sur les processus de méthanisation et sur le digestat produit a été étudiée. Les quantités d'antibiotiques trouvées dans les lisiers ont été parfois suffisantes (à partir de 100 mg d'oxytétracycline) pour diminuer jusqu'à 40 % la production de méthane (Gans *et al.*, 2010 rapportés par ADEME, 2011).

Microorganismes

Différentes espèces de bactéries, parasites et virus dont certains sont pathogènes pour l'Homme peuvent aussi être présents dans les déjections animales (cf. données de Colleran, 2000, par exemple). Le nombre et le types d'agents pathogènes présents dans les effluents d'élevages varient en fonction de l'espèce animale, du lieu géographique et de la composition physico-chimique de l'effluent.

Espèces de bactéries, de parasites et virus pathogènes présentes dans des effluents d'élevage au Danemark (Colleran, 2000)

Pathogen	Disease	Main susceptible host
<u>Bacteria</u>		
<i>Salmonella dublin</i>	Enteritis	Cattle
<i>Salmonella typhimurium</i>	Enteritis	Cattle, poultry, man
<i>Mycobacterium paratuberculosis</i>	Paratuberculosis, chronic enteritis	Cattle
Enteropathogenic <i>E. coli</i>	Colibruellosis, enteritis	Cattle, Pigs
<i>Treponema hydroenteriae</i>	Pig dysentery	Pigs
<i>Clostridium perfringens</i> type C	Necrotic enteritis	Pigs
<i>Erysipelotrix rhusiopathiae</i>	Erysipelas	Pigs
<i>Listeria monocytogenes</i>	Listeriosis, encephalitis, abortion, general infection	Sheep, cattle
<u>Parasites</u>		
<i>Ascaris suum</i>	Ascariasis, "liver spots"	Pigs
<i>Trichostrongylidae</i>	Gastrointestinal disorder, emaciation	Cattle
<i>Dictyocaulus viviparus</i>	Bronchitis, pneumonia, emaciation	Cattle
<u>Coccidia</u>		
<i>Fasciola hepatica</i>	Diarrhoea, Hepatitis	Cattle, pigs, poultry Cattle, sheep
<u>Viruses</u>		
Rotavirus	Calf diarrhoea	Cattle
Coronavirus	Calf diarrhoea	Cattle
Parvovirus	Abortion, fetal death	Pigs
Parvovirus	Plasmocytosis	Mink
Parvovirus	Panleukopenia	Mink

Des ordres de grandeur sont rapportés par Besson (2010) :

- Heinonen-Tanski (2006) a estimé que les effluent d'élevage bruts de bovins peuvent contenir 10^9 à 10^{10} UFC de pathogènes /g dont 10^8 UFC/g sont des bactéries,
- selon Watcharasukarn (2009), le lisier de bovin peut contenir 10^4 UFC/mL d'*Escherichia Coli*, 10^5 UFC/mL d'Entérocoques fécaux et 10 UFC/mL de *Clostridium perfringens*.
- selon Vanotti (2004), le lisier de porc peut contenir des concentrations d'environ 10^4 UFC /g de *Salmonella*, 10^6 UFC/g de Coliformes fécaux, 10^6 UFC/g d'Entérocoques.

A noter que de ces agents sont, pour la plupart, pathogènes par ingestion.

Dans l'étude ADEME (2011), des résultats de teneurs en Entérobactéries, Salmonelles, *Campylobacter*, Entérocoques, *Escherichia coli*, *Clostridium perfringens* et *Listeria* sur des digestats de 87 installations de méthanisation agricoles ont été recensés. Une influence claire de la qualité des intrants n'a pas pu être effectuée, les analyses de ces intrants étant rarement réalisées. Toutefois, une influence nette de l'utilisation de restes de repas comme co-substrat sur la présence d'Entérobactéries dans le digestat a pu être mise en évidence. A l'inverse, la présence d'un post-fermenteur a significativement baissé la teneur des digestats en Entérobactéries. Par ailleurs, toutes les installations avec des présences prouvées de Salmonelles traitaient des graisses ou des huiles alimentaires.

La digestion anaérobie est toutefois un procédé qui permet la réduction des concentrations en germes pathogènes, avec une efficacité beaucoup plus importante en conditions thermophiles qu'en conditions mésophiles (ADEME, 2011). La digestion mésophile avec un taux d'abattement en pathogènes de l'ordre de 80 % n'assure pas forcément une hygiénisation suffisante pour prévenir le développement ultérieur des microorganismes pathogènes lors du stockage. Une hygiénisation supplémentaire peut alors être apportée, si nécessaire, par un prétraitement ou un post traitement ad hoc (le compostage par exemple). Le stockage d'au minimum un mois des digestats liquides diminue aussi nettement les risques de présence de germes pathogènes. Les agents pathogènes les plus résistants sont les *Clostridium* et les *Bacillus cereus* qui

peuvent résister à la digestion thermophile (espèces sporulantes) ainsi que les *Enterovirus* et les *Parvovirus* qui résistent à la digestion mésophile (Couturier, 2002).

Pour rappel les installations de méthanisation agricole en France utilisent dans la grande majorité des cas une digestion mésophile.

NB : Ces valeurs de micropolluants et microorganismes dans les substrats et digestats sont fournies à titre indicatif mais ne sont :

- *ni représentatives de l'ensemble des matières entrantes et digestats, des variations étant liées aux type de substrats traités, mais aussi pour un même type de substrat dans le temps,*
- *ni représentatives de l'exposition potentielle des opérateurs via ces matières. A noter que, dans le cas d'évaluations de risques sanitaires (à des substances chimiques ou microorganismes), les voies d'exposition possibles sont l'ingestion, l'inhalation et le contact cutané.*

Cette dernière est souvent considérée comme négligeable au regard des autres voies (barrière cutanée), bien que certaines substances (ex : toluène) sont reconnues avoir une pénétration cutanée pouvant être importante. Cependant, moins de valeurs toxicologiques de référence sont disponibles pour cette voie et, en santé du travail, les valeurs limites ne concernent que la voie inhalation. De plus, dans les filières de méthanisation, la majorité des opérations est effectuée aux moyens de matériels ; les opérateurs n'entrent donc pas en contact direct avec les matières et, si cela devait être le cas, des moyens de protections (gants) peuvent être employés.

Concernant l'ingestion, s'agissant de travailleurs, il est peu probable que les matières en question soient ingérées volontairement. Un portage main-bouche est envisageable mais a priori il y a peu de manipulations directes : un lavage des mains est en tous les cas indispensable. L'exposition peut aussi se faire par ingestion de poussières. A titre d'exemple, un groupe d'experts a évalué les risques liés aux microorganismes pathogènes présents dans les boues d'épuration et a notamment considéré un scénario d'exposition de l'agriculteur épandant les boues et travaillant son champ. Selon ce scénario, sur une journée de 8H de travail, l'agriculteur, dans son tracteur ouvert (scénario majorant) peut ingérer 216 mg de poussières/jour (ADEME et al., 2007).

Par ailleurs, les travailleurs peuvent être exposés à des substances chimiques et microorganismes par inhalation. Une attention doit donc être portée aux dangers volatiles, aérosolisés ou adsorbés sur des particules inhalables, thoraciques ou alvéolaires¹³. Comme déjà indiqué, les valeurs limites d'exposition en santé du travail concernent cette voie inhalation.

Sur ces bases, il est donc possible de considérer qu'un opérateur d'une filière de méthanisation agricole peut être exposé à des dangers chimiques et microbiologiques, par inhalation ou ingestion de poussières, lors des étapes de gestion des matières (substrats et digestats épandus ou compostés puis épandus)

Zoom sur les dangers « inhalables » issus des substrats et digestats

A notre connaissance, aucune donnée se rapportant à des polluants émis par les substrats ou digestats traités dans les filières de méthanisation agricole ou se rapportant à des postes de travail de cette filière, n'est, à ce jour, disponible.

Les déjections animales ou co-produits traités dans les filières de méthanisation agricole peuvent cependant engendrer l'émission d'un certain nombre de composés volatiles (avant même la digestion en méthaniseur proprement dite) dont :

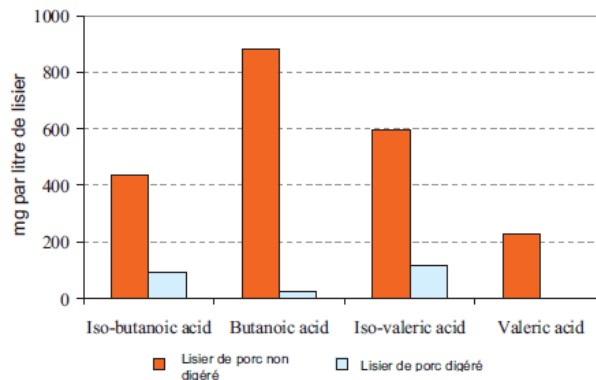
- l'**H₂S** qui peut être libéré en particulier en cas d'anoxie des fumiers / lisiers stockés qui pourraient commencer à fermenter. L'H₂S peut également se former rapidement en cas d'incompatibilité de certains substrats. C'est l'enseignement tiré de l'accident mortel qui s'est produit en 2005 en Allemagne. A noter cependant, que comme le souligne l'INERIS (2008) aucune donnée n'est disponible quant à ces incompatibilités potentielles. L'INERIS conseille en cas de doute de faire de tests de mélanges de substrats en laboratoire afin de vérifier si de l'H₂S est produit,
- des **composés malodorants** notamment émis par les déjections animales et en particulier le lisier de porcs. Dans les porcheries, les chercheurs ont identifié plus de 150 composés volatils émis par les lisiers, surfaces de plancher mouillées et animaux souillés. On y retrouve l'H₂S, l'**ammoniac**, le méthane et le CO₂ (caractéristiques des biogaz, le même phénomène que dans les digesteurs se déroulant) mais aussi des acides gras volatils (Lavoie et al., 2004).

Une ventilation adaptée est donc indispensable au niveau notamment des préfosses de mélange couramment rencontrées dans les filières de méthanisation agricole.

¹³ En santé au travail, les fractions de particules devant être contrôlées sont majoritairement les fractions inhalables et dans certains cas, les fractions thoraciques ou alvéolaires (INRS, 2007).

S'agissant des digestats, la majorité des composés volatils devrait avoir été détruite ou transférée dans le biogaz. Concernant les composés malodorants, dont notamment les acides gras volatils (AGV), une diminution est observée après méthanisation, les AGV étant en grande partie décomposés, car précurseurs dans les réactions de méthanisation (ADEME, 2011). A l'inverse, l'impact de la méthanisation sur les émissions d'ammoniac des effluents d'élevage serait modeste et est difficile à établir. L'augmentation des émissions (entre le substrat brut et le digestat) liée à la digestion est comprise entre 0 et 17 % (sur l'ensemble de la filière de la gestion des digestats entre le digesteur et l'intégration au sol) de l'azote ammoniacal apporté au sol. Ces émissions peuvent être considérablement réduites par la couverture des silos de stockage d'une part et par l'adoption de techniques d'épandage par pendillard d'autre part (ADEME, 2011).

Concentrations de 4 AGV dans un lisier digéré (digestat) et un lisier non digéré (Hansen., 2004 cité par ADEME, 2011)



Concernant les **bioaérosols** dominants dans les fermes, les espèces suivantes sont identifiées : *Aspergillus*, *Penicillium*, *Absidia*, *Rhizomucor*, *Fusarium*, *Wallemia*, *Curvularia* (Goyer et al., 2001). En présence de céréales en silo : on retrouve dans les bioaérosols dominants les espèces d'*Aspergillus*, *Eurotium*, *Penicillium*, *Absidia*, *Mucor* et *Rhizopus* ; pour les fruits et légumes : *Penicillium*, *Phomopsis*, *Diplodia*, *Botrytis*, *Geotrichum Monilia*, *Trichotecium*, *Fusarium*, *Alternaria*, *Aspergillus*, *Paecilomyces*.

Concentrations en bioaérosols dans certains milieux de travail (Goyer et al., 2001)

Milieu de travail	Bactéries totales (UFC/m ³) ^a	Bactéries Gram négatives (UFC/m ³)	Actinomycètes Thermophiles (UFC/m ³)	Moisissures (UFC/m ³)
Extérieur	10 ²	10 ¹	10 ¹	10 ²
Agriculture (normal)	10 ⁷	10 ³	10 ²	10 ³⁻⁴
Agriculture (foins moisiss)	10 ⁹	10 ³	10 ⁶	10 ⁶

Des concentrations en microorganismes et endotoxines ont été rapportées par Goyer et al. (2001) dans certaines ambiances de travail agricoles.

Les bactéries Gram négatives sont celles qui produisent les endotoxines.

Concentrations en endotoxines dans certains milieux de travail (Goyer et al., 2001)

ferme d'animaux à fourrure	ferme laitière	porcherie	poulailler	vidange de compost
1-1 950 ng/m ³	10-50 000 ng/m ³	1-75 000 ng/m ³	1-2 680 ng/m ³	6-30 ng/m ³

Aucune valeur limite professionnelle n'est disponible en France, pour les microorganismes et endotoxines.

Pour ces dernières, des valeurs

sont proposées en Allemagne (50 UE/m³) et aux Pays-Bas (200 UE/m³) (INRS, 2011) (1 ng/m³ = 1 UE/m³.)

A notre connaissance aucune étude relative aux bioaérosols potentiellement émis par des digestats n'est disponible.

Les informations recensées tendent à montrer que les activités nécessitant la manipulation des matières sont susceptibles de mettre en suspension des bioaérosols. Pour rappel, il semble que la gestion des matières intrantes et digestats constituent, dans le cadre d'une installation de méthanisation agricole, le poste le plus consommateur de temps. A noter aussi, que, selon les données de la MSA, 4 % des MP des non salariés agricoles sont représentées par des affections respiratoires de mécanisme allergique. Elles pourraient être liées à l'exposition à des bioaérosols. Aucune étude épidémiologique n'est disponible.

En résumé, les opérateurs agricoles semblent pouvoir être exposés à des émissions d'H₂S en particulier au niveau de fosses de stockage de fumiers / lisiers ainsi qu'à d'autres composés volatils malodorants (ammoniac et autres). La gestion des digestats en particulier lors de l'épandage pourrait aussi les exposer à des composés volatils ou adsorbés aux poussières inhalables et/ou ingérables.

Même si les effets potentiellement induits par l'exposition à des bioaérosols, ne sont pas documentés chez la population agricole, des niveaux relativement importants en microorganismes et endotoxines relevés dans des ambiances de travail de ce secteur laisse penser que des troubles pourraient survenir.

Données sur la composition chimique des biogaz des filières agricoles

Comme déjà indiqué, 33 installations agricoles françaises ont transmis la composition de leur biogaz produit en terme de concentration en **méthane CH₄** (ATEE, Club Biogaz, 2011). Le CH₄ varie de 50 à 70 % (moyenne 60 %). Le méthane est un gaz inflammable qui, s'il se retrouve en mélange stœchiométrique dans

l'air, peut exploser en cas de source d'ignition. L'autre composé majoritaire du biogaz est le **dioxyde de carbone CO₂** quant à lui inerte (ses concentrations varient de 25 à 45 % d'après l'INERIS, 2008).

D'après l'INERIS (2008), la LIE - limite inférieure d'explosivité se situe autour de 5 % v/v et la LSE - limite supérieure d'explosivité varie de 15 % pour du méthane pur à, 11,4 % v/v, si le méthane n'est présent dans le biogaz qu'à une proportion de 50 %.

LIE et LSE pour différentes compositions de biogaz en terme de mélange CH₄ - CO₂ (INERIS, 2008).

CH ₄ - CO ₂ (%v/v)	LIE (%v/vCH ₄)	LSE (%v/vCH ₄)
100 - 0	5	15
60 - 40	5,1	12,4
55 - 45	5,1	11,9
50 - 50	5,3	11,4

D'autres composés sont présents à l'état de traces dans le biogaz mais, sont suffisamment peu abondants pour n'avoir qu'une influence négligeable sur les caractéristiques d'explosivité du mélange biogaz/air. En revanche ces divers composés peuvent présenter une certaine toxicité.

Peu d'études ont été réalisées mais il semble que, par rapport aux biogaz d'autres filières, les biogaz agricoles sont potentiellement plus concentrés en **ammoniac**. En général ces concentrations en NH₃ sont < 0,1 mg/m³ (tout biogaz confondu) mais peuvent parfois excéder 1 à 1,5 mg/m³. Une concentration de 150 mg/m³ a déjà été mesurée en présence de déjections de volailles (Doublein et Steinhauser, 2011).

Concentrations en H₂S mesurées dans des biogaz issus de la méthanisation de lisiers bovins et porcins (INERIS, 2008).

Type de matières entrantes	Sans traitement (mg/m ³)	Avec traitement à l'O ₂ (mg/m ³)
Lisier bovin	Entre 800 et 2000	< 100
Lisier porcin	Entre 4000 et 8000	< 100

Les concentrations en **H₂S**, gaz pouvant être mortel en quelques minutes (963 mg/m³ pendant 10 minutes) du biogaz brut sont également généralement plus élevées en particulier en présence de lisiers porcins. Les traitements de désulfuration largement répandus permettent toutefois d'atteindre des teneurs inférieures à 100 mg/m³ (INERIS, 2008).

A l'inverse, s'agissant des divers composés organiques tels que les organohalogénés, hydrocarbures aromatiques, aldéhydes, alcanes, alcools, cétones, esters, alcènes, composés soufrés, éthers, déjà mis en évidence dans des biogaz (en particulier bruts), les concentrations en éléments en traces dans le biogaz agricole sont extrêmement faibles (concentration < 1 % v/v) comparativement à ceux d'autres filières (ISDND, boues d'épuration). Les composés en traces les plus susceptibles d'être présents sont les mercaptans et les terpènes (issus des déchets verts) (AFSSET, 2008).

Composition d'un biogaz issus d'un élevage de porcs en composés benzéniques, solvants et HAP (INERIS, 2002)

Substances	Teneur (mg/m ³)
Benzène	<0.17
Toluène	<0.21
Ethylbenzene	<0.24
Xylenes	<0.23
dichlorobenzène	<0.33
dichlorométhane	<0.08
dichloroéthylène	<0.006
trichloroéthylène	35.2
tétrachloroéthylène	14.8
fréons	9.8
Cl ⁻	25.0
F ⁻	22.5
S	2000

Substances	Blanc du site	Teneur (µg/m ³)
Naphtalène	0.0346	1.220
Acénaphthylène	0.059	1.118
Acénaphthène	<0.0234	<0.0254
Fluorène	<0.0117	0.0142
Phénanthrène	0.029	0.1520
Anthracène	0.050	0.142
Fluoranthène	0.051	0.0417
Pyrène	<0.0585	<0.0635
Benzo-a-Anthracène	<0.007	<0.0076
Chrysène	<0.0047	0.0341
Benzo-b-Fluoranthène	<0.012	<0.0127
Benzo-k-Fluoranthène	<0.0005	<0.0005
Benzo-a-Pyrène	<0.0047	<0.0051
Dibenzo-a,h-Anthracène	<0.007	<0.0076
Benzo-g,h,i,Perylène	<0.014	<0.0153
Indéno-1,2,3,c,d-Perylène	<0.0468	<0.0508

Les résultats de Rasi et al. (2007), confirment ces observations. Les concentrations totales en **composés organiques volatiles** reportées dans leur étude pour du biogaz d'origine agricole sont de 5 à 8 mg/m³. A titre de comparaison, ces concentrations varient de 45 à 176 mg/m³ et de 13 à 268 mg/m³ dans des biogaz issus respectivement de station d'épuration urbaine (STEP) et de centre de stockage des déchets (étude en Finlande). Les principaux composés présents dans le biogaz agricole sont des composés soufrés réduits tandis que dans les autres biogaz, il s'agit principalement d'**hydrocarbures aliphatiques et aromatiques**

Les teneurs en métaux sont également faibles. Seul le cuivre, le chrome et le manganèse ont été quantifiés dans le biogaz de la porcherie étudié par l'INERIS (2002) à des valeurs de 1,3 - 8,1 et 2,2 µg/m³ respectivement. Les autres ETM (Cd, Ti, As, Se, Sb, Co, Sn) n'ont pas été quantifiés (valeurs de < 0,3 à < 2,8 µg/m³).

Valeurs limites d'exposition professionnelles (VLEP) et valeurs toxicologiques de référence (VTR) de quelques substances

Les VLEP disponibles pour les composés mesurés dans le biogaz notamment issu de méthanisation agricole sont présentées à titre indicatif et afin de les comparer aux valeurs mesurées dans le biogaz. Il faut toutefois noter **qu'un opérateur ne sera jamais exposé à une atmosphère composée de 100 % de biogaz**. Si tel était le cas, l'asphyxie par absence d'oxygène interviendrait avant tout effet toxique des substances. Rappelons également que la méthanisation se déroule en système clos. Les opérateurs ne devraient pas être exposés à des dangers du biogaz en fonctionnement normal. Des expositions sont potentielles lors d'un dysfonctionnement, fuite notamment dans un local confiné ou éventuellement lors d'opération de maintenance au cours desquelles une courte exposition à une petite quantité de biogaz pourrait être possible.

Les valeurs rencontrées dans le biogaz sont, pour la plupart, inférieures (voire largement inférieures) aux valeurs limites professionnelles disponibles, sauf pour :

- le chrome quantifié à une valeur de 8,1 µg/m³ et en considérant la VME du Cr VI, soit 1 µg/m³. Toutefois, il est probable que la concentration mesurée par l'INERIS (2002) correspond à du Cr total,
- l'ammoniaque ayant une VME de 7 mg/m³ alors qu'une valeur de 150 mg/m³ a déjà été mesurée (Deublein et Steinhauser, 2011), cependant les valeurs n'excèdent en général pas 1 à 1,5 mg/m³,
- l'H₂S pour lequel la VME est de 7 mg/m³. Dans le biogaz non épuré des valeurs jusque 8 000 mg/m³ ont déjà été mesurées. Pour un tel biogaz, il suffirait d'environ 0,09 % de biogaz dilué dans une atmosphère. Ce scénario semble plausible. Cependant comme déjà souligné, la désulfuration est en France largement mise en œuvre, notamment par injection d'air dans les digesteurs. Les teneurs en H₂S du biogaz sont donc *a priori* largement plus faibles. L'INERIS (2008) indique des valeurs inférieures à 100 mg/m³, ce qui reste plus élevé que la VME. Pour atteindre celle-ci, l'atmosphère devrait contenir environ 7 % de biogaz. L'AFSSET (2008) indique quant à elle une limite de détection de l'H₂S à 0,0002 mg/m³ qui n'aurait pas été atteinte dans un biogaz épuré d'une décharge, le biogaz brut en contenant 610 mg/m³.

Au vu de ces éléments on ne peut que recommander l'emploi de détecteur en continu de l'H₂S dans les lieux confinés et de détecteur portatif individuel lors de la maintenance par exemple des préfosse et digesteurs. Cependant, comme le souligne l'INERIS (2008), la détection du méthane pourrait suffire (au moins dans les locaux où des risques de fuite de biogaz sont possibles) à se prémunir contre les effets de l'H₂S. En effet, la détection du méthane doit permettre de rester en dessous de 25 % de sa LIE, ce qui pour un biogaz avec une concentration de 100 mg/m³ d'H₂S, correspond à une teneur de 1,7 ppm d'H₂S dans l'atmosphère (soit environ 2,4 mg/m³). Cette teneur est inférieure aux VME et VLCP respectivement fixées à 7 et 14 mg/m³ (soit 5 et 10 ppm). L'INERIS souligne cependant que cette démarche n'est valable que si la désulfuration est efficace et que les teneurs en H₂S sont bien maintenues < 100 mg/m³ dans le biogaz.

Valeurs limites professionnelles disponibles pour des composés mesurés dans le biogaz (INRS, 2012 a) – en mg/m³

Composés organiques	VME ¹⁴	VLCT ¹⁵	Composés inorganiques	VME ¹²	VLCT ¹³	Autres	VME ¹²	VLCT ¹³
benzène	3,25	/	Pb métallique	0,1		H ₂ S	7	14
toluène	76,8	384	Cd et composés	0,05	/	CO ₂	9000	/
éthylbenzène	88,4	442	Dioxyde de Ti, en Ti	10	/	Ammoniac	7	14
xylènes	221	442	trioxyde de di As, en As	0,2	/	Poussières totales	10	
dichlorobenzène (1,2)	122	306	hexafluorure de Se	0,2	/	Poussières alvéolaires	5	
dichlorobenzène (1,4)	4,5	306	Cu (fumées)	0,2	/			
dichlorométhane	178	356	Cu (poussières)	1	2			
dichloroéthylène (1,1)	20	/	Cr (Chrome VI)	0,001	0,005			
trichloréthylène	405	1080	Chrome inorganique	2				
tétrachloréthylène	138	275	Mn (fumées)	1	/			
naphtalène	50	/						
benzo(a)pyrène		0,150 *						

En noir gras, valeurs réglementaires contraignantes - En bleu gras, valeurs réglementaires indicatives – en noir, valeurs indicatives ;
* valeur recommandée par la CNAM (pas de VLEP fixée).

Cases en rosé : substances CMR avérées, assimilées ou possibles

¹⁴ VME : Valeurs moyennes d'exposition correspondant à des valeurs limites sur 8 H d'exposition

¹⁵ VLCT : valeurs limites court terme destinées à protéger des pics d'exposition.

Pour compléter la réflexion, concernant les composés parfois présents dans les digestats agricoles et, considérant un agriculteur pouvant être exposé *via* ingestion de poussières lorsqu'il les épand et travaille son champs (scénario déterminé dans l'étude de l'ADEME *et al.*, 2007), les valeurs toxicologiques de référence (orale - chronique¹⁶) des métaux, HAP et PCB quantifiés sont fournies ci-dessous à titre indicatif.

Même selon un scénario semble-t-il très majorant (*tracteur ouvert : ingestion de 216 mg/j de poussières*¹⁷ ; – *considération que l'agriculteur réalise le travail de son champs sur lequel a été épandu le digestat tous les jours, ...*), les concentrations limites en composés étudiés ne devant pas être dépassées dans les poussières ingérées par l'agriculteur pour qu'aucun effet chronique à seuil ou sans seuil soit à craindre, sont, très largement supérieures aux teneurs mesurées et aux seuils des normes NFU, au moins pour les HAP et métaux. Elles sont plus proches pour les PCB mais au moins 19 fois supérieures aux valeurs déjà mesurées.

VTR chroniques par voie orale des composés HAP, PCB et métaux quantifiés dans des digestats – évaluation des concentrations limites ne devant pas être dépassées pour qu'aucun effet pour l'agriculteur exposé ne soit à craindre.

	VTR orales chroniques en mg/kg/j		Doses journalières maximales pour un opérateur de 70 kg en mg/j		Concentrations limites ne devant pas être dépassées dans les poussières ingérées par l'agriculteur épandant un digestat et travaillant son champs - en mg/kg MS		Rappel des valeurs quantifiées (ADEME, 2011) / seuils des normes NFU 44-015 ou NFU 44-095 en mg/kg MS
	effet avec seuil (ES)	effet sans seuil (SS)	ES	SS	ES	SS	
fluoranthène	0,04	ND	2,8	-	12 963	-	0,0085 / 4
benzo(b) fluoranthène	ND	1,2	-	84	-	388889	0,0084 / 2,5
benzo(a) pyrène	ND	7,3	-	511	-	2365741	0,0084 / 1,5
PCB	ND	0,00001	-	0,0007	-	3,24	0,071 / 0,8
As	0,0003	1,5	0,021	105	97	486111	1,95 / 18
Cd	0,0005	ND	0,035		162		1 / 3
Cr (VTR du Cr VI)	0,003	ND	0,21		972		12 / 120
Cu	0,14	ND	9,8		45370		303/ 300
Hg	0,0003	ND	0,021		97		0,99/ 2
Ni	0,005	ND	0,35		1620		13,3 / 60
Pb	0,0036	0,0085	0,252	0,595	1167	2755	46/ 180
Se	0,005	NC	0,35		1620		0,34 / 12
Zn	0,3	ND	21		97222		1064 / 600

Données sur la composition microbiologique des biogaz

En fonction des intrants, la composition microbiologique du biogaz varie. Toutefois, la composition de la flore des biogaz n'est, en proportion, pas la même que celle du digesteur dont il est issu (AFSSET, 2008).

En effet, même si le biogaz apparaît être un vecteur capable de transporter n'importe laquelle des espèces microbiennes présentes dans la source (les densités de micro-organismes sont généralement de l'ordre de 10^6 à 10^7 cellules procaryotes/m³ et 10^4 cellules d'eucaryotes/m³), l'aérosolisation est variable en fonction des espèces (Moletta, 2006, Moletta *et al.*, 2008 et 2010) :

- certaines sont préférentiellement aérosolisées (ex : *Staphylococcus spp.*, *Propionibacterium acnes*, phylums des *alphaproteobacteria*, *betaproteobacteria*, *gammaproteobacteria*) (aérosolisation active),
- certaines sont préférentiellement non-aérosolisées (phylums des *Deltaproteobacteria*, *Spirochaetes*, *Thermotogae*, *Chloroflexi* et groupes sulfato-réducteurs) (non-aérosolisation active),

Les auteurs évoquent aussi un comportement d'aérosolisation passive qui peut conduire n'importe lequel des groupes de micro-organismes présents dans la source à se retrouver dans l'aérosol (ex : phylums des *Actinobacteria*, *Firmicutes* et *Bacteroidetes*).

¹⁶ Les VTR chroniques ont été sélectionnées, elles sont plus faibles que les valeurs aiguës et permettent de se placer dans un scénario majorant. De plus lorsque plusieurs VTR étaient disponibles, la plus faible a été sélectionnée.

¹⁷ Tracteur fermé, les experts estiment que la quantité de poussières ingérées diminue à 12 mg/j (ADEME *et al.*, 2007).

Par ailleurs, comme déjà évoqué, la digestion et les prétraitements notamment appliqués aux sous-produits animaux¹⁸ (SPA) permettent la réduction de certains microorganismes pathogènes.

A noter qu'aucune étude n'a été menée sur la flore microbiologique des biogaz agricoles.

Vinneras et Nordin (2007) ont étudié la flore de biogaz issus de stations d'épurations. Ils ont conclu que le risque microbiologique lié à l'utilisation du biogaz valorisé était probablement insignifiant. Les risques liés au contact avec le gaz brut et les eaux condensées sont probablement plus élevés. Cependant les systèmes étant généralement fermés, les auteurs rapportent que, selon les professionnels, les travailleurs sont rarement exposés. *A noter que dans cette étude, une des sources de microorganisme dans le biogaz était l'eau usée utilisée pour désulfurer le biogaz.*

Diagramme de fonctionnement des installations de méthanisation agricole / identification de points critiques pour la santé / sécurité des opérateurs

Des diagrammes de fonctionnement d'une filière agricole à la ferme et d'une filière agricole centralisée sont présentés ci-après. Ils illustrent les principales étapes de ces filières. Ils sont représentatifs des installations les plus répandues en France (d'après les données de l'ATEE, Club Biogaz, 2011).

Sur ces diagrammes, les points critiques pour les opérateurs vis-à-vis de différents dangers identifiés sont représentés aux moyens de logos illustratifs et d'un code couleur représentatif d'un niveau de criticité.

En effet, une hiérarchisation des points critiques pour les opérateurs des filières biogaz a été proposée. Elle est fondée sur la base d'une méthodologie dans laquelle des niveaux de criticité sont définis en croisant :

- des niveaux d'enjeu (en terme de conséquences) et,
- des niveaux de retour d'expérience (l'évènement a-t-il déjà été décrit, est-il probable ou non, ... ?).

Pour chacun de ces niveaux, des scores ont été attribués : plus le score est élevé, plus le niveau est élevé c'est-à-dire par exemple, plus l'évènement peut avoir des conséquences importantes.

Dans le cadre de cette étude, nous avons arbitrairement considéré 3 niveaux d'enjeu et 3 niveaux de retour d'expérience : niveau faible – score 1 / niveau modéré – score 2 / niveau fort – score 3. La matrice suivante a ainsi été élaborée :

niveaux de retour d'expérience / niveaux d'enjeu	Elevé- 3	Moyen -2	Faible - 1
Important - 3	3 x 3 = 9	3 x 2 = 6	3 x 1 = 3
Modéré - 2	2 x 3 = 6	2 x 2 = 4	2 x 1 = 2
Faible - 1	1 x 3 = 3	1 x 2 = 2	1 x 1 = 1

Dans le cas de situations particulières, des scores en général de 0,5, voire 1 peuvent ensuite avoir été ajoutés ou retranchés aux résultats de criticité « Enjeux x Retour d'expérience ».

Trois niveaux de points critiques sont ainsi identifiés :

- les points critiques majeurs avec des notes supérieures ou égales à 6 (couleur rouge),
- des points critiques modérés avec des notes variant de 3 à inférieures à 6 (couleur jaune),
- des points critiques mineurs avec des notes inférieures à 3 (couleur verte).

Les différents éléments rapportés dans cette synthèse ont permis de proposer des niveaux d'enjeu et des niveaux de retour d'expérience, selon des critères propres à chacun des dangers et, explicités dans le tableau argumentaire associé au diagramme. Ce tableau argumentaire est indissociable du diagramme.

A noter que les données étant différentes pour les dangers étudiés, cela introduit un certain biais, notamment si l'on souhaite les comparer entre eux. Par ailleurs dans certains cas (dangers, filières étudiées), les données sont rares voire inexistantes, ce qui peut aussi introduire un biais par rapport aux cas où des données sont disponibles.

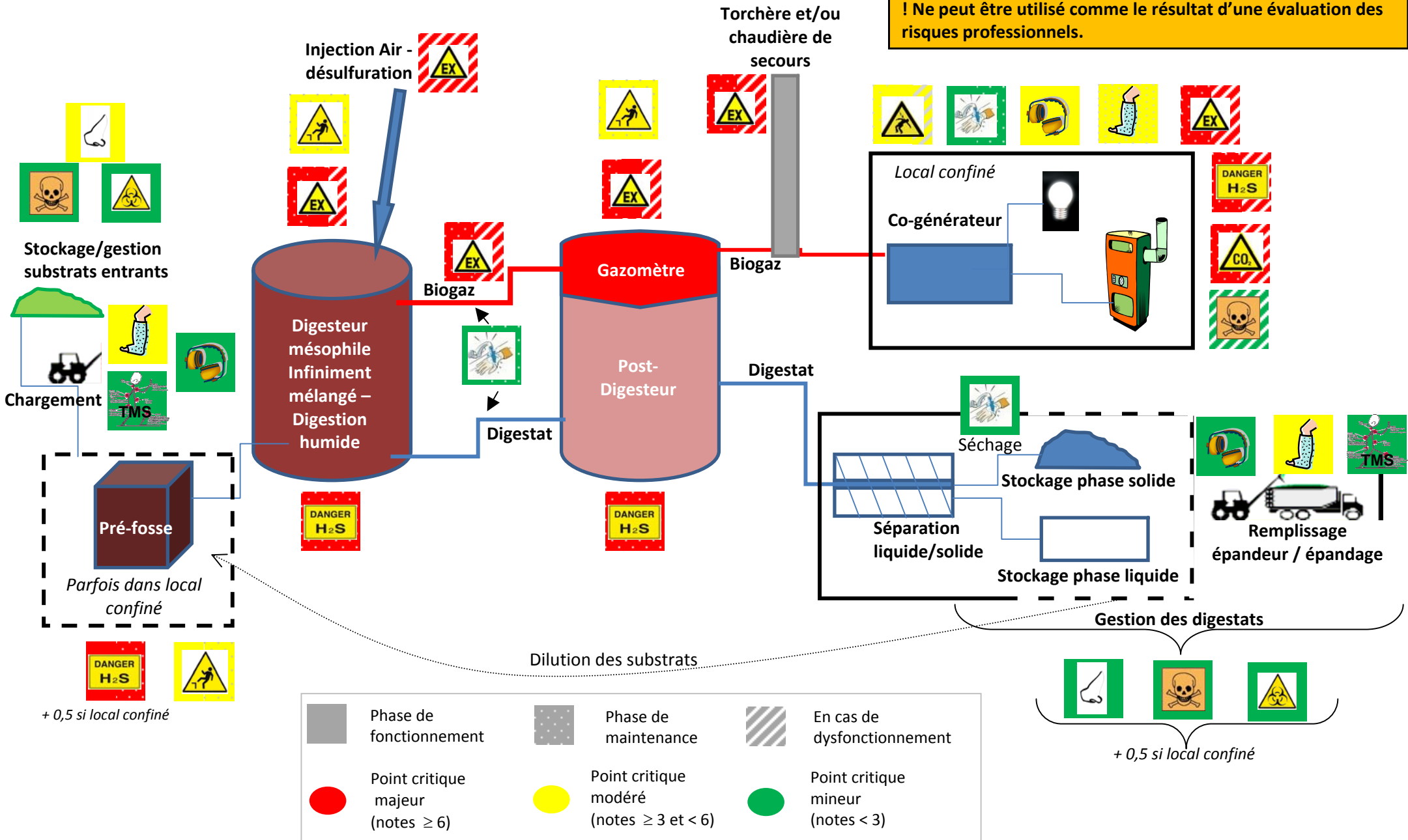
Pour plus de détails sur la méthodologie, se reporter en section 9 du rapport.

Remarque importante : le contenu de cette synthèse, de ces diagrammes et du tableau ne peut être utilisé en l'état par une entreprise ou un site comme le résultat d'une analyse des risques professionnels. Il s'agit uniquement d'une sensibilisation des acteurs, et lecteurs sur des points critiques des filières de production, valorisation de biogaz, en termes de santé et sécurité des opérateurs. Ces points critiques constituent des alertes sur des points au niveau desquels il convient de mettre en œuvre les mesures de maîtrise des risques existantes et ou d'approfondir les données en réalisant des évaluations de risques plus détaillées.

¹⁸ les SPA de catégorie 2 et de catégorie 3 doivent être respectivement stérilisés à 133 °C pendant 20 minutes ou pasteurisés à 70 °C pendant 60 minutes avant d'être méthanisés. Des exceptions sont cependant possibles (ex : pour le lisier). Les SPA de catégorie 1 ne peuvent être méthanisés.

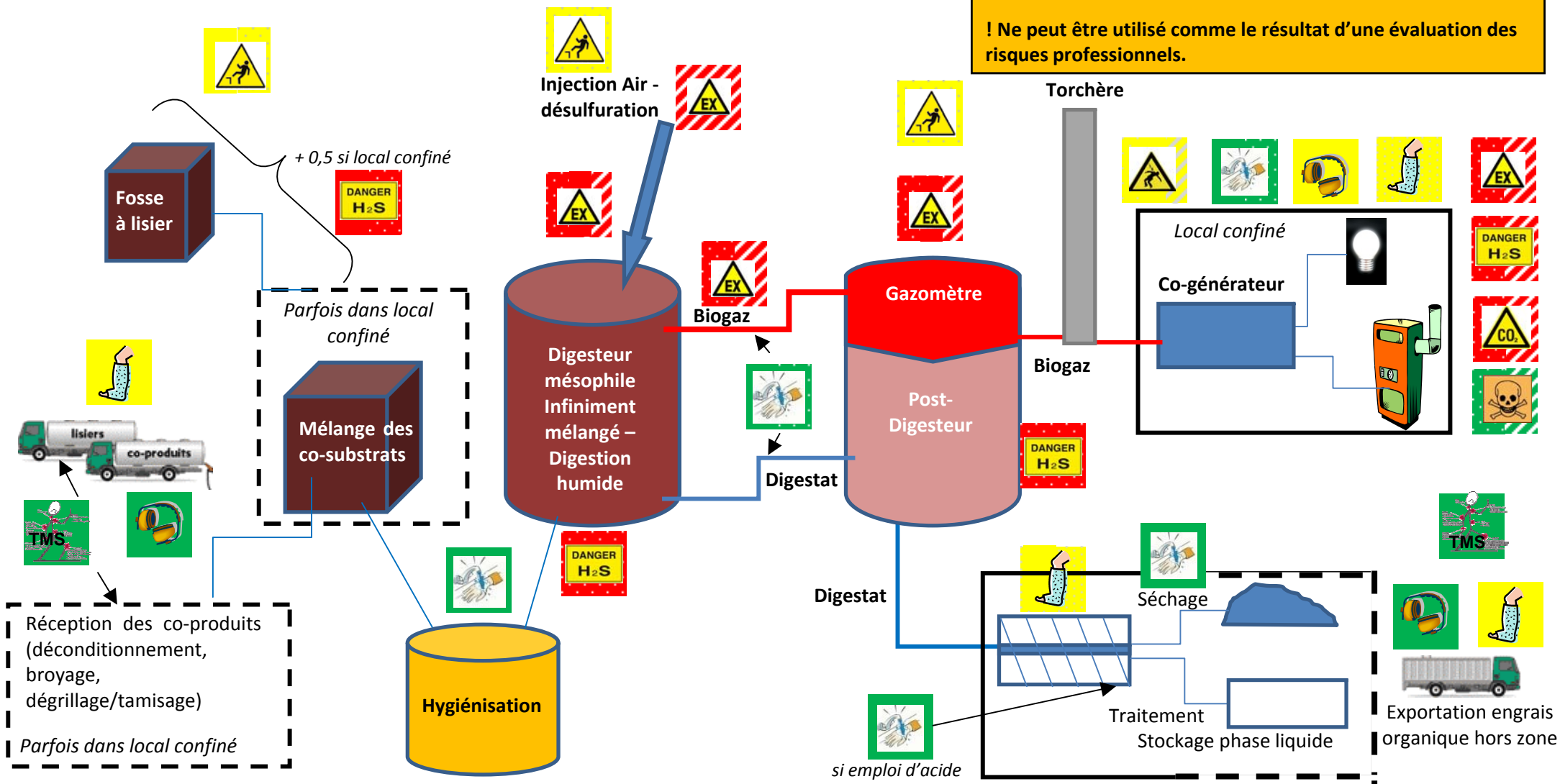
Filière agricole à la ferme

Diagramme indissociable du tableau argumentaire ci-après.
 ! Ne peut être utilisé comme le résultat d'une évaluation des risques professionnels.



Filière agricole centralisée

Diagramme indissociable du tableau argumentaire ci-après.
 ! Ne peut être utilisé comme le résultat d'une évaluation des risques professionnels.












Réception des co-produits (déconditionnement, broyage, dégrillage/tamisage)
 Parfois dans local confiné



+ 0,5 si local confiné



	Phase de fonctionnement		Phase de maintenance		En cas de dysfonctionnement
	Point critique majeur (notes ≥ 6)		Point critique modéré (notes ≥ 3 et < 6)		Point critique mineur (notes < 3)

+ 0,5 si local confiné

Points critiques identifiés	Lieux / étapes	Phases	Niveaux d'enjeux (E)	Niveaux de retour d'expérience (R)	Résultats E X R	Situations particulières	Principales mesures de maîtrises / autres commentaires
Risque électrique 	Local de cogénération / armoire électrique – raccordement au réseau EDF	Mise en service Maintenance Dys-fonctionnement	3 - D'après l'INRS (2012 b), des accidents graves, notamment mortels peuvent survenir.	1 - D'après l'INRS (2012 b), ces accidents sont de plus en plus rares (toutes professions confondues, 10 morts / an par électrocution)	3 x 1 = 3 		Habilitations Normes
Risque d'explosion d'une ATEX, inflammation de gaz 	Local confiné où arrivée de biogaz (local de cogénération) Digesteur / post-digesteur / gazomètre / torchère (soupapes) Brides / raccords / pots de purges canalisations	Dys-fonctionnement (fuite) / Maintenance (ex : purges) / Fonctionnement du digesteur : en phase démarrage / arrêt	3 - L'explosion d'une ATEX engendre de nombreux dégâts et potentiellement des morts. Les incendies ou feux torches en particulier lié à des fuites de gaz peuvent aussi être dévastateurs (INERIS, 2008).	3 – Même si certains cas d'accidents étaient liés à des négligences et même si les règles de sécurité ont été améliorées au cours des années, de tels accidents, y compris dans des installations agricoles, ont déjà été recensés, les incendies étant les sinistres les plus fréquents. (Sources : base ARIA et INERIS, 2012).	3 x 3 = 9 	+ 0,5 dans local confiné - 0,5 au niveau des raccords canalisations (volume ATEX moins important)	Identifications des zones ATEX Formation, mesures de sécurité (soupapes détecteurs de CH ₄ , ventilation) Appareils dédiés zonages ATEX
	Digesteur / post-digesteur / gazomètre (soupapes)	Dys-fonctionnement du système de désulfuration par injection d'air	Idem ci-dessus	2 – Aucun retour d'expérience ne mentionne un dysfonctionnement ou mauvais réglage pouvant entraîner la formation d'une ATEX. Cependant cela est un scénario possible.	3 x 2 = 6 	+ 0,5 dans local confiné	
Risque blessures / chutes 	Utilisation de tracteurs, de machines, d'outils Endroits où des chutes en particulier de hauteur sont possibles (ex : bord préfosse)	Fonctionnement Maintenance	1 - Même si ces accidents du travail peuvent avoir une gravité très variable, les plus fréquents sont peu graves donnant droit éventuellement à des indemnités journalières.	3 – Ce type d'accidents de travail est le plus fréquent. Ces AT sont notamment liés à des éléments matériel (exemple lors d'opérations de maintenance) et, pour les activités agricoles, lors des opérations de chargements / déchargements (MSA, 2011)	1 x 3 = 3 	+ 0,5 en cas maintenance	Règles de sécurité (ex : barrières, utilisations de cordes) et de conception des locaux
Brûlures 	Chauffage substrats, Canalisations non enterrées Local cogénération Séchages des digestats / emploi acide	Fonctionnement Maintenance (ex : sur moteur)	1 – La gravité de ces brûlures (hors incendies) est considérée comme faible (proportion du corps touchée faible (ex : mains))	1 – Aucune information quant aux brûlures n'est disponible. Toutefois leur nombre est probablement faible	1 x 1 = 1 	+ 0,5 si digestion thermophile au niveau canalisation + 0,5 en cas maintenance	Règles de bon sens et de sécurité, repérage canalisations, calorifugeage

Points critiques identifiés	Lieux / étapes	Phases	Niveaux d'enjeux (E)	Niveaux de retour d'expérience (R)	Résultats E X R	Situations particulières	Principales mesures de maîtrises /autres commentaires
Intoxication aiguës à l'H ₂ S 	Préfosse mélange Digesteur Local confiné	de → Fonctionnement / Maintenance → Maintenance → Dys-fonctionnement (fuite, non efficacité de la désulfuration)	3 – L'exposition à l'H ₂ S peut être très rapidement mortelle.	3 – Evénement déjà décrit dans une unité de méthanisation et dans de nombreux autres cas même si non liés à des filières de production de biogaz 3 - Les concentrations possibles dans les biogaz bruts sont parfois très élevées (8 000 mg/m ³) au regard des VLEP (VME = 7 mg/m ³)	3 X 3 = 9 	+ 0,5 en cas de maintenance + 0,5 si lisiers de porcins traités - 1 si désulfuration + 0,5 quand mélange de substrats risquant d'être incompatibles	Règles de sécurités : détecteur gaz, H ₂ S, ventilation, formation Penser à vérifier l'efficacité du traitement de désulfuration
Anoxie liée au remplacement de l'O ₂ par d'autres gaz tel que le CO ₂ 	Local confiné	Dys-fonctionnement (fuite) Maintenance (ex : purges)	3 – L'anoxie peut conduire à la mort rapide.	2 – Concentrations en CO ₂ plus fortes qu'en H ₂ S mais rapport des « concentrations maximales relevées dans biogaz / VME » plus élevé pour l'H ₂ S (> 1000) que pour le CO ₂ (90).	3 X 2 = 6 	+ 0,5 en cas de maintenance	Détecteur gaz (CH ₄) doit permettre d'éviter toute fuite prolongée
Intoxications chroniques à des substances chimiques autres qu'H ₂ S par inhalation de biogaz 	Local confiné	Dys-fonctionnement (fuite) Maintenance (ex : purges)	3 – Les pathologies liées à des expositions chroniques à des substances en question (notamment CMR) peuvent être graves (cancers) et entraîner la mort.	1 – Les concentrations déjà mesurées dans les biogaz sont largement inférieures aux VLEP. Un opérateur ne sera de plus, jamais exposé à une atmosphère composée de 100 % de biogaz et de manière chronique. L'exposition au biogaz est donc probablement très faible même si elle peut <i>a priori</i> arriver de manière répétée lors par exemple des opérations de purges.	3 x 1 = 3 	- 0,5 pour les installations agricoles pour lesquelles les substrats et les biogaz sont potentiellement moins contaminés en traces de divers micropolluants notamment CMR.	Peu de résultats disponibles. il serait pertinent de réévaluer les conclusions à mesures de l'obtention de nouveaux résultats
Intoxications par ingestion/ inhalation de poussières 	Gestion des matières (substrats / digestats) avec aérosolisation de poussières	Fonctionnement Maintenance (lavages)	3 – idem ci-dessus	1 – Même avec l'exemple d'un scénario semble-t-il très majorant, il semble peu probable que les valeurs toxicologiques de référence soient dépassées. Les seuils de la norme NFU 44-051 permettent <i>a priori</i> d'être sécuritaire pour les polluants concernés.	3 x 1 = 3 	+ 0,5 pour les opérateurs de tri, déconditionnement le cas échéant (à l'instar de la filière ordures ménagères)	Idem ci-dessus Règles de sécurité (ex : tracteur fermé)

Points critiques identifiés	Lieux / étapes	Phases	Niveaux d'enjeux (E)	Niveaux de retour d'expérience (R)	Résultats E X R	Situations particulières	Principales mesures de maîtrises /autres commentaires
Risque microbiologique (infection, allergie, inflammation) 	Gestion des matières (substrats, digestats)	Fonctionnement / Maintenance (lavages)	2 - Des pathologies de gravités différentes peuvent survenir, cependant les majeures sont sans doute des pathologies courtes et traitables (ex : diarrhées). Des allergies, inflammations peuvent aussi survenir (notamment liées à l'exposition à des bioaérosols).	1 – Par absence de donnée - Aucune donnée épidémiologique ou rapportée de l'Allemagne par exemple n'est disponible. Certaines MP des non salariés agricoles sont des affections respiratoires de mécanismes allergiques. Les fermes sont des lieux propices à certains bioaérosols. Les déjections animales et autres substrats sont contaminées par un certain nombre de microorganismes pathogènes par ingestion.	2 x 1 = 2 	+ 0,5 si des substrats contenant des fortes concentrations en Entérobactéries ou Salmonelles sont traités (déchets de repas, huiles alimentaires) + 0,5 pour les opérateurs de tri, déconditionnement le cas échéant (à l'instar de la filière ordures ménagères) - 0,5 pour les digestats par rapport aux substrats (réduction des pathogènes) - 0,5 si hygiénisation des entrants / hygiénisation post-méthanisation ou digestion thermophile + 0,5 en milieu confiné + 1 si compostage (cf. filières boues de STEP / ordures ménagères)	Règlementation relatives aux sous-produits animaux Seuils de la norme NFU 44-015 Bonnes pratiques d'hygiène
	Exposition au Biogaz Exposition aux condensats des canalisations	Dys-fonctionnement / Maintenance	2 – idem précédent. Cependant la flore du digestat n'est pas représentative de celle du biogaz – peu d'éléments sur celle-ci.	0 – Les concentrations dans les biogaz semblent relativement faibles et de l'ordre de la contamination de l'air ambiant. D'après l'état actuel des connaissances, les opérateurs ne devraient pas être exposés à des doses importantes pouvant engendrer des pathologies.	2 x 0 = 0	+ 0,5 si utilisation d'eau contaminée pour la désulfuration par lavage, + 0,5 si présence identifiée / possible de bactéries <i>Legionella</i> pathogène par inhalation dans les substrats	Très peu de résultats disponibles. A réévaluer à mesures de l'obtention de nouveaux résultats

Points critiques identifiés	Lieux / étapes	Phases	Niveaux d'enjeux (E)	Niveaux de retour d'expérience (R)	Résultats E X R	Situations particulières	Principales mesures de maîtrises /autres commentaires
TMS  Risques liés aux postures, vibrations, port de charges	Gestion des matières (substrats et digestats) (utilisation de tracteurs)	Fonctionnement	1 – Ces troubles même s'ils peuvent être très perturbants au quotidien sont cependant considérés comme de faible gravité.	2 – Les TMS sont les maladies professionnelles les plus fréquentes des non salariés agricoles. Les MP sont toutefois moins nombreuses que les AT (1561 MP contre environ 29 600 AT en 2007) (MSA, 2011).	1 x 2 = 2 	+ 0,5 pour les opérateurs de tri, déconditionnement le cas échéant (à l'instar de la filière ordures ménagères)	Amélioration du confort des appareils, Règles à respecter
Bruits 	Utilisation de tracteurs pour la gestion des matières Local de cogénération (chaudière / moteur)	Fonctionnement	1 – Même si les impacts sur la santé liés au bruit sont souvent sous-estimés, on peut cependant considérer qu'ils sont généralement de faible gravité	2 – Aucune donnée disponible mais les moteurs des véhicules engendrent automatiquement du bruit, celui-ci n'étant cependant, pas forcément nuisible, d'autant plus si les règles constructeurs sont respectées. 3 – Dans les locaux de valorisation, les niveaux déjà enregistrés (cas d'une autre filière) sont élevés (95 à 110 dB(A))	1 x 2 = 2 ou 1 x 3 = 3 	+ 0,5 dans le cas des installations centralisées (nécessité d'apporter tous les substrats et envoi hors du site des digestats)	Règles : tracteur fermé, isolation phonique du local de cogénération, port de protections auditives
Odeurs 	Stockage des substrats Stockage/épandage des digestats	Fonctionnement	1 – Les odeurs même si elles peuvent être incommodantes sont considérées comme des nuisances de faible gravité. <i>A noter, qu'en particulier, pour des riverains, les nuisances olfactives peuvent cependant avoir des conséquences psychologiques non négligeables</i>	3 - Peu de données sont disponibles mais la plupart des matières traitées en méthanisation émette par nature des composés malodorants (dégradation de la matière organique). Le biogaz, quant à lui, en système clos n'engendre pas en fonctionnement normal de nuisances olfactives. (en cas de dysfonctionnement d'autres points critiques que les odeurs sont nous semble-t-il à privilégier donc non retenu comme critique vis-à-vis des odeurs)	1 x 3 = 3 	- 1 pour les digestats par rapport aux substrats : la méthanisation réduit les odeurs sauf en cas de traitements de matières particulières telles que les déjections de volailles (risque de fortes concentrations en NH ₄) + 1 si compostage (cf. filières boues de STEP / ordures ménagères)	Règles de bonnes pratiques : Ventilation, techniques d'épandage

Bibliographie citée dans cette synthèse

- AAMF. 2011. Synthèse des analyses de digestat de AAMF. Présentation au Colloque Biogaz Europe 25-26 octobre 2011.
- ADEME. 2005. Impacts environnementaux de la gestion biologique des déchets. Bilan des connaissances. 331 p.
- ADEME. 2010 a. Suivi expérimental de l'installation de méthanisation du GAEC du Bois Joly. Bilan global - Rapport définitif. Etude réalisée par Biomasse Normandie et. APESA. 119 p.
- ADEME. 2010 b. Etude de marché de la méthanisation et des valorisations du biogaz. Etude réalisée par le cabinet Ernst & Young. 142 p
- ADEME. 2011. Qualité agronomique et sanitaire des digestats. Etude réalisée par RITTMO. 250 p
- ADEME. 2012. Le cadre réglementaire et juridique des activités agricoles de méthanisation et de compostage. Étude réalisée pour le compte par l'APESA, BIOMASSE NORMANDIE et RITTMO et révisée par le Club biogaz. 83 p
- ADEME, SYPREA, Les Entreprises de l'Eau, INERIS. 2007. Evaluation des risques sanitaires des filières d'épandage des boues des stations d'épurations. Base scientifique de l'évaluation des risques sanitaires liés aux agents pathogènes. 172 p.
- AFSSET. 2008. Risques sanitaires du biogaz : Evaluation des risques sanitaires liés à l'injection de biogaz dans le réseau de gaz naturel, Rapport d'expertise collective « Groupe de travail Biogaz », Saisine Afsset n°« 2006/010 », 174 p.
- Agricométhane, année non précisé. L'installation de biométhanisation de la ferme du Faascht – Belgique. Analyse technique. 6 p.
- ATEE, Club Biogaz. 2011. État des lieux de la filière méthanisation en France, 61 p.
- BESSION M. 2010. La méthanisation en zones AOC Savoyardes. Connaissance et maîtrise des aspects sanitaires liés à l'épandage de digestat. Rapport de stage Hygiénisation. 37 p.
- COUTURIER C. 2002. Effets de la digestion anaérobie sur les micropolluants et germes pathogènes. SOLAGRO. 5 p
- COUTURIER C., GALTIER L.; POUJEC P , BRUGERE H. ; MARACHE L., KAEMMERER M. 2000. Etat des connaissances sur le devenir des germes pathogènes et des micropolluants au cours de la méthanisation des déchets et sous-produits organiques, rapport ADEME n° 98-93-024, 100 p.
- DEUBLEIN D., STEINHAUSER A. 2011. Biogas from waste and renewable resources: an introduction, 2nd revision and expanded edition, John WILEY and Sons, 578 p.
- GOYER N., LAVOIE J., LAZURE L., MARCHAND G. 2001. Les bioaérosols en milieu de travail : guide d'évaluation, de contrôle et de prévention. Etudes et Recherches. Guide technique. IRSST. 72 p.
- HAHN H., HOFFSTEDE U. 2010. Final assessment report on residual materials. Projet BIOGASMAX. 251 p.
- LAVOIE J., MASSE D., CROTEAU F., MASSE L. 2004. Évaluation de l'impact des additifs de lisier sur l'exposition des travailleurs et l'atténuation des odeurs. Etudes et Recherches – IRSST (Institut de Recherche Robert Sauvé en Santé et en Sécurité du Travail). 41 p.
- INERIS. 2012. Retour d'expérience relatif aux procédés de méthanisation et à leurs exploitations. EAT DRA DRC- 93 - Opération A. 148 p.
- INERIS. 2002. Caractérisation des biogaz: Bibliographie, Mesures sur site, 31 p.

INERIS. 2006. Etude comparative des dangers et des risques liés au biogaz et au gaz naturel, rapport N° 46032, 34 pages.

INERIS. 2008. Etude des risques liés à l'utilisation des méthaniseurs agricoles, Rapport d'étude n° DRA-07-88414-10586B réalisé pour le Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables, 91 p

INRS, 2011. Endotoxines en milieu de travail. II. Exposition, risques, prévention. Dossier médico-technique. 19 p.

INRS. 2012. a) Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France. ED 984. Aide-mémoire Technique. 32 p

Institut de l'élevage. 2012. La méthanisation dans la filière laitière. Départements Techniques d'Elevage et qualité. Service Bâtiment-Environnement. Compte rendu 00 12 33 011.

MOLETTA M. 2006. Caractérisation de la diversité microbienne aéroportée des biogaz. Déchets-revue francophone d'écologie industrielle – cahier spécial du n° 44. pp 18-20.

MOLETTA M. WERY N., DELGENES JP., GODON JJ. 2008. Water Science & Technology. Vol 57, n°4. pp 595-599.

MOLETTA-DENAT M., BRU-ADAN V., DELGENES JP., HAMLIN J., WERY N., GODON JJ. 2010. Selective microbial aerosolization in biogas demonstrated by quantitative PCR. Bioresource Technology. Vol 101. pp 7252-7257.

MSA. Direction des Etudes des Répertoires et des Statistiques. 2011 Accidents du travail et maladies professionnelles des non-salariés agricoles 2005-2007. Données nationales. 105 p.

OFEV : Office fédéral de l'environnement suisse. 2007. Document « Compost et digestat en Suisse » Étude n° 1 : Micropolluants organiques dans le compost et le digestat ; Étude n° 2 : Influences des composts et des digestats sur l'environnement, la fertilité des sols et la santé des plantes. 126 p.

RASI S. VEIJANEN A., RINTALA J. 2007. Trace compounds of biogas from different biogas production plants. Energy, n° 32. pp 1375–1380.

VINNERAS B. NORDIN A. 2007. Microbiological community in biogas systems and evaluation of microbial risks from gas usage. Energie - wasser-praxis 12/2007 – DVGW Jahresrevue. pp 50-53.

Sites internet, bases de données :

Base de données EPICEA de l'INRS. <http://www.inrs.fr/accueil/produits/bdd/epicea.html> ; consulté le 02/10/2012.

Base de données ARIA du BARPI <http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/> ; consulté le 02/10/2012.

<http://www.agricomethane.eu/> ; consulté le 08/10/2012.

INRS, 2012, b) article « Electricité » <http://www.inrs.fr/accueil/risques/phenomene-physique/electricite.html> ; consulté le 08/10/2012.

Filière « Méthanisation de boues de STEP urbaines - production et valorisation de biogaz »

Description de la filière boues de STEP en France (ATEE, Club Biogaz, 2011)

Nombre d'installations en 2011	60 installations traitent majoritairement des effluents urbains (quelques-unes traitent, en faible proportion, également des effluents industriels). 4 sont en construction.		
Intrants	Les boues méthanisées dépendent des stations et de leur configuration. La méthanisation est le plus fréquemment réalisée sur des boues mixtes, soit sur le mélange : <ul style="list-style-type: none"> - de boues primaires très chargées en matières organiques biodégradables, soit les plus aptes à la méthanisation et, - de boues biologiques dont l'aptitude à la méthanisation dépend de leur âge et de leur charge organique. Les stations reçoivent également d'autres résidus de l'assainissement (graisses, matières de vidanges) susceptibles d'être méthanisés. (Solagro, 2001).		
Technologie du digesteur	Digesteur infiniment mélangé	100 % des installations	
	Technique de brassage : Réinjection de biogaz dans les digesteurs Agitation mécanique Recirculation des boues	60 % 30 % 10 % <i>(Données issues de 20 installations ayant répondu)</i>	
	Température de la digestion	1/35 utilise la digestion thermophile. Les autres (34/35) utilisent la digestion mésophile.	
	Présence de gazomètre	42 / 43 sont équipés d'un gazomètre dont : <ul style="list-style-type: none"> - 24 gazomètre à cloche et, - 18 à membrane souple 	
Traitement du biogaz	7/22 procèdent à une déshumidification (refroidisseur, sécheur à bande, ou purgeurs). 5/22 procèdent à une désulfuration (filtre à charbon actif, injection de chlorure ferrique en amont du digesteur, ou tour de lavage à l'eau). 2/22 procèdent à un traitement des siloxanes.		
Traitement du digestat	18/24 procèdent à une séparation des phases liquides et solides (13 par centrifugeuse, 2 par séchage, 1 combine les 2 techniques) 9/24 comportent un équipement de traitement des boues digérées (5 par chaulage, 1 par addition de polymère, 1 par aération) 14 stations compostent les boues digérées 7 stations épandent sur des exploitations agricoles sans compostage		
Stockage du digestat	Dans la majorité des cas : post digesteur		
Composition du biogaz	55 à 80 % de méthane (moyenne : 65 % environ) <i>Données issues de 25 installations ayant répondu</i>		
Valorisation	Chaleur uniquement	45	
	Cogénération	14	
	Biométhane carburant	1	

Principaux textes / dispositifs réglementaires

Règlementation ICPE – Sont concernées par la rubrique 2781 (-1 et -2), les installations de méthanisation de déchets non dangereux ou matière végétale brute, **à l'exclusion des installations de méthanisation d'eaux usées ou de boues d'épuration urbaines lorsqu'elles sont méthanisées sur leur site de production.**

Les stations d'épuration (STEP) en fonction de l'origine des eaux usées traitées peuvent être soumises aux rubriques 2750 – Stations d'épuration collective d'eaux résiduaires industrielles ; 2751 – Station d'épuration collective de déjection animale ; 2752 – Station d'épuration mixte.

Une STEP traitant strictement des rejets urbains n'est pas soumise à ces rubriques ICPE. Cependant elle peut l'être aux rubriques : **2910 B** - Installation de combustion (ici, du biogaz) ; **1411** - Gazomètres et réservoirs de gaz comprimés renfermant des gaz inflammables ; **1413** – Gaz naturel ou biogaz, sous pression (installations de remplissage de réservoirs alimentant des moteurs, ou autres appareils, de véhicules ou engins de transport fonctionnant au gaz naturel ou biogaz).

Le digestat de boues méthanisées produit peut être valorisé en agriculture pour sa valeur fertilisante. En France, sans traitement additionnel, les digestats sont considérés comme des déchets et non des produits.

Ils peuvent être cependant épandus dans le cadre d'un plan d'épandage et sous réserve de respecter les seuils réglementaires correspondant (arrêté du 08/01/98¹⁹ modifié le 03/06/98). Pour rentrer dans une logique produit, les digestats doivent être compostés et peuvent ainsi être homologués ou répondre à la **norme NFU 44-095**²⁰ applicable aux composés à base de boues, définissant des seuils pour des microorganismes pathogènes, métaux, HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques) et PCB (Polychlorobiphényles).

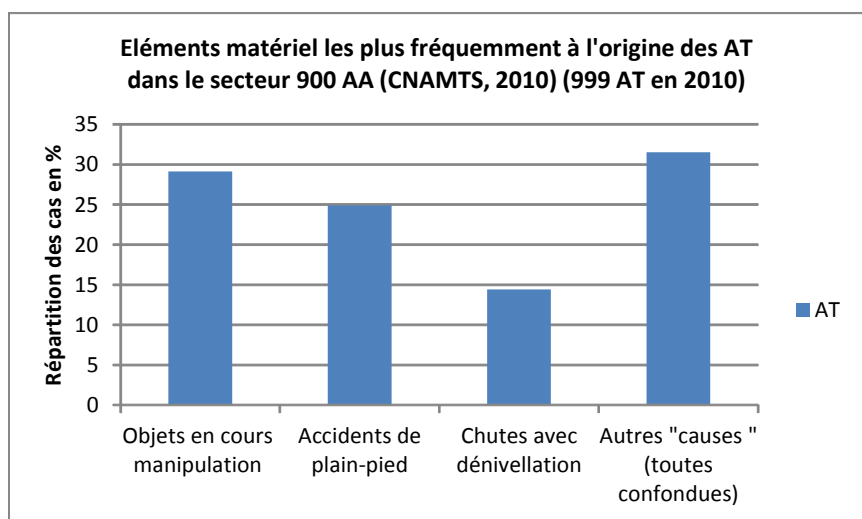
Concernant la santé des salariés des stations d'épuration, elle relève du régime général et est donc suivie par la Caisse Nationale de l'Assurance Maladie des Travailleurs Salariés (CNAMTS). Celle-ci coordonne les organismes du réseau des branches maladie et accidents du travail - maladies professionnelles, soit les caisses primaires d'assurance maladie (CPAM) et caisses d'assurance retraite et de la santé au travail (CARSAT, ex CRAM). La CNAMTS élabore des statistiques par secteur d'activité ou code CTN. Elle dispose notamment de données pour le secteur « autres services d'assainissements – code 900 AA » incluant probablement le traitement des eaux usées.

Données sur les ATMP (Accidents du Travail – Maladies Professionnelles) du secteur « autres services d'assainissements - 900 AA » (Source : CNAMTS, 2010)

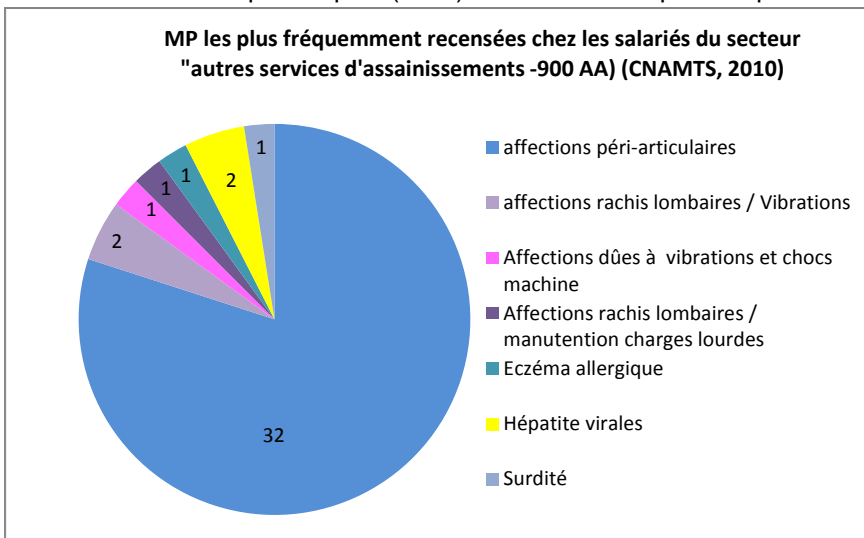
Parmi les données disponibles à ce jour, la production de biogaz n'est jamais mentionnée.

En 2010, 999 accidents du travail ont été recensés chez les salariés du secteur « autres services d'assainissements - 900 AA » (sur 17 584 salariés).

Les principales causes sont : des objets en cours de manipulation (291 cas), des accidents de plain-pied (249 cas) et des chutes avec dénivellation (144 cas). Douleurs / lumbagos, contusions et plaies sont les types de lésions les plus fréquemment rencontrés (dans plus de 10 % des AT).



En 2010, 40 maladies professionnelles ont aussi été recensées chez les salariés du secteur 900AA. Les troubles musculo-squelettiques (TMS) sont les MP les plus fréquentes. Ils rassemblent plusieurs tableaux :



- affections péri articulaires dues à des gestes et postures (32 cas),
- affections dues aux vibrations / chocs d'outils ou de machines (1 cas),
- affections consécutives aux vibrations (2 cas),
- affections consécutives à la manipulation de charges lourdes (1 cas),
- lésions chroniques des ménisques (0 cas),

A noter que deux cas de MP hépatites virales ont été déclarés en 2010.

¹⁹ Arrêté du 08/01/98 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n° 97-1133 du 08/12/97 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées.

²⁰ Une autre norme est disponible : NFU 44-015 applicable aux déchets organiques issus de l'agriculture, l'élevage, l'industrie, alimentaire, la restauration et l'entretien des espaces verts.

Données sur les accidents / incidents recensés dans les filières de méthanisation de boues de STEP urbaines

Données issues d'un retour d'expérience mené par l'INERIS (2012) :

L'INERIS a mené, en 2011 et 2012, une analyse sur l'accidentologie en France et en Allemagne des procédés de méthanisation, et de leurs exploitations. Ce retour d'expérience a mis en évidence la difficulté à recueillir des informations sur les incidents et accidents dans les deux pays.

Il apparaît cependant que certaines unités fonctionnelles (centrales de cogénération, systèmes d'injection des solides, pompes, tuyaux, vannes et agitateurs) sont particulièrement vulnérables entraînant des défaillances en termes de sécurité telles que des fuites ou la perte de confinement. Ces conclusions se rapportent à l'ensemble des filières de production de biogaz.

Dans le cadre de l'étude conduite par l'INERIS, le SIAAP et un autre industriel, exploitants de stations d'épuration, ont fourni des retours d'expérience relative à l'accidentologie liée à la méthanisation des boues.

Les causes des incidents répertoriés sont, pour le premier :

- la corrosion / déboitement de tuyauterie (5 cas),
- la rupture de canalisations enterrées lors de terrassement (2 cas),
- l'impact de la foudre (2 cas),
- le défaut du stockage du biogaz, entrée d'air et fuite (3 cas) : 1 délutage et 2 entrée air.

Le second recueil mentionne 12 événements recensés en 2011 dont 11 ayant conduit à l'émission de biogaz, dû à :

- des fuites en différents points, à savoir, au niveau :
 - o d'une bride d'une vanne manuelle en amont de la torchère,
 - o de gardes hydrauliques des filtres à l'aspiration des compresseurs,
 - o d'un raccord de tête de manomètre,
 - o d'une torchère à l'arrêt,
 - o d'un raccord fileté,
 - o d'une canne de brassage de digesteur,
- l'ouverture des soupapes de sécurité des digesteurs. Cinq événements sont décrits dont :
 - o un suite à une fuite d'air comprimé pilotant les vannes de sécurité du réseau biogaz (et donc montée en pression des digesteurs),
 - o un suite à des problèmes de pression d'air pilotant les vannes de sécurité du réseau biogaz,
 - o un suite au déclenchement accidentel de l'arrêt d'urgence de l'automate de sécurité ayant aussi conduit à la montée en pression des digesteurs,
 - o un suite à une chute de pression des dômes des digesteurs détectée par des sondes, déconnexion de la mauvaise sonde par le personnel et donc mise en sécurité de l'installation par l'automate d'où ensuite montée en pression des digesteurs et ouvertures des soupapes,
 - o des pannes répétées d'un automate de sécurité entraînant le dégazage aux soupapes.

Il est également mentionné une détérioration de l'isolant réfractaire de la torchère.

A noter qu'au cours de ces événements, aucune victime ou blessé n'a été à déplorer. Des réparations et mesures de prévention ont été mises en place par l'exploitant. Les fuites sont en général repérées lors des visites, ronde de routine ou opérations de maintenance.

L'INERIS (2006, 2012) mentionne également les incidents suivants :

- débordement du méthaniseur (estimation de 3 à 4 cas en Allemagne par an),
- gel des soupapes du méthaniseur (recensés plusieurs fois sans précision du nombre), celles-ci n'étant donc plus en état de fonctionner,
- envol de la membrane souple d'un méthaniseur industriel (1 cas) : libération du biogaz stocké,
- suppression à l'intérieur du méthaniseur (1 cas en Allemagne, 1 cas en Espagne). Dans un cas, l'accumulation de matières plastiques a engendré la formation d'une couche étanche à la surface de la phase liquide ; la digestion s'est poursuivie sous celle-ci, ayant conduit à l'éclatement du méthaniseur.

Suite à ce retour d'expérience, les principaux phénomènes dangereux des filières de méthanisation (toutes confondues semble-t-il) à considérer ont été classés par l'INERIS, par ordre de priorité en terme de probabilité d'occurrence :

- les incendies,
- les explosions,
- l'émission imprévue de toxiques gazeux (H₂S) dans des zones confinées mal ventilées (avec risque d'intoxication humaine).

Autres bases de données :


La base EPICEA²¹ de l'INRS ne décrit, à ce jour, aucun accident/événement impliquant une installation de méthanisation de boues urbaines.


Depuis 1992, dans la base de données ARIA²² du BARPI, 7 accidents en STEP produisant du biogaz sont recensés actuellement. Deux ne concernent pas directement l'activité de méthanisation de la station (les deux derniers ci-dessous).


Parmi les 5 autres accidents recensés, :

- deux sont liés à des dysfonctionnements de vannes ou appareils ayant entraîné des rejets de biogaz à l'atmosphère au niveau de gazomètre ou de la sphère (déclutage),
- deux ont entraîné explosion et/ou feu torche. L'un est lié à un déboitement de canalisation et une fuite de biogaz dans un local confiné (dysfonctionnement), un autre est survenu lors de travaux de maintenance du fermenteur. Ces deux accidents ont entraîné des victimes,
- pour le dernier, au moment de la remise en route de l'installation de méthanisation, une dépression de la sphère liée à une vidange trop rapide de l'eau engendre des dégâts matériels (déformation de la sphère notamment).

Mot-clé : biogaz

 **N°42038 - 04/03/2012 - FRANCE - 78 - ACHERES**
 E37.00 - Collecte et traitement des eaux usées
 A 19h27, un défaut sur une vanne de maillage provoque l'arrêt automatique du ventilateur du réseau d'extraction du biogaz depuis le gazomètre d'une station d'épuration urbaine. Les agents de maintenance ne réussissent pas à résoudre rapidement ce défaut bloquant et le gazomètre (sphère) monte en pression (débit entrant supérieur à débit sortant). La cote maximale étant atteinte, l'exploitant commence à dégazer (décluter) à l'atmosphère le biogaz (gaz inflammable composé de 65 % de CH₃, 34 % de CO₂ et diverses impuretés dont du H₂S à 50 ppm). Le défaut de la vanne étant réparé au bout de 1 h, un 2ème défaut bloquant (défaut de mesure) apparaît sur l'automate, ce qui oblige l'exploitant à prolonger le déclutage pendant 1h30, le temps de faire intervenir un automaticien extérieur. Le transfert de biogaz reprend vers 22 h, mettant fin au déclutage ; 2 275 m³ de biogaz, soit 2,3 t sont relâchées à l'atmosphère. Un périmètre de sécurité est mis en place autour de l'unité biogaz pendant le déclutage. Le vent qui souffle ce jour-là permet de diluer le biogaz rejeté, réduisant ainsi la zone des dangers.
 Le défaut de mesure apparaissant dans l'automate quand le niveau de biogaz dépasse 8 m dans le gazomètre est supprimé, la programmation de tous les modes de fonctionnement de l'automate est vérifiée et les modifications nécessaires à la suppression des défauts bloquants identifiés sont apportées. Un accident similaire s'était produit 2 ans avant (ARIA 38485).

 **N°38485 - 23/03/2010 - FRANCE - 78 - MAISONS-LAFFITTE**
 E37.00 - Collecte et traitement des eaux usées
 Dans une installation de production de biogaz classée seveso seuil bas, un déclutage se produit à 1h15 au niveau d'un gazomètre. Le déclutage est un dégagement de biogaz au niveau d'un gazomètre dû à un déséquilibre entre ses débits entrant et sortant. Lorsque la capacité maximale du gazomètre est atteinte, le biogaz s'échappe par la garde hydraulique de l'ouvrage. Le phénomène peut être anticipé par suivi du niveau. Le jour de l'accident, une défaillance matérielle (problème de connectique) sur la fin de course d'une vanne neutralise l'automatisme gérant les configurations d'exploitation, bloquant ainsi les possibilités de transfert ou de torchage du biogaz. Le biogaz non extrait du gazomètre est alors dégazé.
 Ne pouvant agir à distance, l'exploitant se rend sur place pour actionner manuellement le jeu de vannes du réseau de transfert afin de rétablir la situation. L'une d'elle étant « dure » à manoeuvrer, plusieurs minutes d'intervention sous ARI sont nécessaires. Le « retour à la normale » a lieu 25 minutes plus tard ; 600 kg de biogaz sont émis (composition 65% de méthane, 34 % de CO₂, impuretés dont H₂S à 50 ppm). Aucune conséquence n'a été perçue en dehors de l'établissement.
 Cet incident révèle la fragilité des dispositifs de fins de course. L'exploitant décide de les modifier pour les fiabiliser et d'allonger leur plage de détection. Les vannes « dures » seront remplacées afin de les rendre plus aisées à manoeuvrer manuellement en cas de besoin.

 **N°36621 - 03/06/2009 - FRANCE - 78 - ACHERES**
 E37.00 - Collecte et traitement des eaux usées
 Dans une station d'épuration, une sphère de biogaz est mise en dépression lors de la remise en service de celle-ci suite à un arrêt pour un contrôle réglementaire. L'opération débute vers 13h30 et se déroule correctement jusqu'à la manœuvre des vannes : l'agent qui effectue l'ouverture de la vanne VGC 3690 (vanne déquillib à l'atmosphère) pense que celle-ci est déjà ouverte (pas d'indicateur sur le réducteur de la position de la vanne). Il procède donc à l'ouverture totale de la vanne VGC 3691 (vidange de leau de remplissage de la sphère) et progressivement à l'ouverture de la vanne motorisée VGC 3679 (arrivée de biogaz). Après une dizaine de minutes, la vidange de leau (vanne supérieure fermée) provoque un vide puis la mise en dépression de la sphère, entraînant la déformation de 4 éléments de l'hémisphère supérieur et de la calotte supérieure. La sphère est ensuite isolée en gaz par la remise en place des queues de poêle sur les conduites de gaz arrivées et départ. Le complément en eau de la sphère est réalisé à 15h30. L'installation est en sécurité.
 Le coût des dommages est de 400 000 euros portant sur le contrôle complet des soudures, la réparation des parties endommagées et le contrôle de requalification avant remise en service.

²¹ EPICEA est une base de données nationale gérée par l'INRS (Institut Nationale de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles) rassemblant plus de 18 000 cas d'accidents du travail survenus, depuis 1990, à des salariés du régime général de la Sécurité sociale. Ces accidents sont mortels, graves ou significatifs pour la prévention. <http://www.inrs.fr/accueil/produits/bdd/epicea.html> ; consulté le 02/10/2012

²² La base ARIA (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents) recense les incidents ou accidents qui ont, ou auraient, pu porter atteinte à la santé ou la sécurité publiques, l'agriculture, la nature et l'environnement. Elle est gérée par le BARPI (Bureau d'Analyse des risques et Pollutions Industriels) au sein de la Direction Générale de la Prévention des Risques du Ministère du développement durable. <http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/index.html> ; consulté le 02/10/2012

N°34251 - 18/02/2008 - FRANCE - 94 - VALENTON
E37.00 - Collecte et traitement des eaux usées
 Après déboîtement d'un manchon de raccordement sur une canalisation de biogaz au niveau du refoulement des compresseurs, une explosion se produit dans le local des compresseurs d'une station d'épuration des eaux usées provoquant un feu torche à 11h40. L'alimentation en énergie est coupée, un périmètre de sécurité est mis en place et 2 employés, légèrement blessés et irrités par l'émanation des gaz, sont transportés à l'hôpital. Les pompiers éteignent l'incendie après 2 h d'intervention, puis effectuent des mesures d'explosivité.
 La salle des compresseurs est détruite et la chaufferie voisine abritant les 3 chaudières mixtes fonctionnant au biogaz est gravement endommagée. Les chaudières qui sont hors d'usage, sont cependant indispensables pour la digestion des boues (maintien à 37 °C des ouvrages). Grâce au maillage du réseau d'alimentation des usines de traitement de la région, les 2/3 des effluents habituellement traités par le site (soit 400 000 m³/j) sont dirigés vers 2 autres usines. Une chaudière provisoire de 3 MW (soumise à déclaration) et fonctionnant au fioul est mise en place pour traiter jusqu'à 200 000 m³/jour. Tout déversement d'eaux polluées en milieu naturel est ainsi évité. L'exploitant diffuse un communiqué de presse.
 L'une des chaudières de 4 MW est réhabilitée pour fonctionnement au gaz naturel dans un délai de 15 jours ; une tierce expertise est réalisée avant remise en service de l'installation et retour à un fonctionnement normal de l'usine (600 000 m³/j traités). La 2ème chaudière détruite par l'accident sera réhabilitée pour fonctionner au gaz naturel dans un délai de 6 à 8 semaines.
 Après analyse de l'accident, les recommandations suivantes sont émises et diffusées à l'ensemble du groupe industriel :
 - les réseaux de biogaz doivent être conçus et construits selon la réglementation relative à la Directive des Equipements sous Pression ; en particulier, les canalisations doivent être soudées et raccordées par des brides et les manchons de raccordement sont à proscrire.
 - il convient d'asservir l'arrêt des compresseurs à la mesure de la chute de pression dans la canalisation de biogaz au refoulement de ceux-ci.

N°11345 - 12/03/1997 - ITALIE - 00 - PESCHIERA DEL GARDA
E37.00 - Collecte et traitement des eaux usées
 Dans une station d'épuration communale des eaux usées, une explosion se produit au cours de travaux de réparation dans un silo en béton de fermentation et de production de biogaz. Des résidus gazeux et des opérations de soudage seraient à l'origine du sinistre. Deux ouvriers sont projetés à l'extérieur et sont tués, un troisième tombe au fond de l'édifice et est sérieusement blessé. Le toit du silo est soufflé.

Mot-clé : méthanisation (hors redondance avec précédente recherche)

N°38141 - 23/04/2010 - FRANCE - 42 - LA FOUILLOUSE
E37.00 - Collecte et traitement des eaux usées
 Dans un four d'incinération de boues de station d'épuration en redémarrage, une détonation se produit à 7h45 lors de sa montée en température.
 La partie post-combustion du four, vide au moment de l'incident, se décale de son logement et ne repose plus sur ses pieds, des conduites ont bougé et l'armoire d'alimentation du brûleur est arrachée. Un technicien déclenche l'arrêt d'urgence des 2 fours de la station et ferme la vanne générale d'arrivée de gaz. Un périmètre de sécurité est matérialisé. L'électricité n'est pas coupée pour garder les informations contenues dans les automates. La municipalité et l'inspection sont informées. L'inspection se rend sur place le 30 avril. A cette date il n'y a pas de causes déterminées à l'origine de la détonation. Des scellés sont posés et des expertises sont effectuées.
 Les boues contenues dans le silo d'alimentation et qui devaient être traitées dans le four seront analysées ; une surveillance particulière est mise en place en attente de l'échantillonnage pour éviter toute fermentation. Le reste sera composté sur un autre site.
 Le redémarrage des installations est conditionné à un rapport d'accident et à la mise en place des mesures correctives pour éviter un accident similaire. L'exploitant devra également remettre à jour l'étude de dangers de l'installation de valorisation des boues pour tenir compte de sa connexité avec une installation de méthanisation et de la proximité d'une autoroute.

N°7750 - 03/02/1992 - FRANCE - 59 - BIERNE
E37.00 - Collecte et traitement des eaux usées
 Un dysfonctionnement de la station d'épuration installée dans la zone d'activité, provoque une coloration ocre des eaux du canal de BERGUES sur 1 km. Deux industriels dont les effluents sont traités par la station sont soupçonnés d'être à l'origine de ces problèmes. La mise à l'arrêt d'une installation de méthanisation surcharge les procédés d'épuration en place mais n'explique pas les phénomènes de moussage constatés sur les ouvrages et perturbant la décantation des boues. Des contrôles sont effectués chez les industriels notamment en ce qui concerne l'utilisation éventuelle de produits antibactériens. Une arrêté préfectoral de mise en demeure est adressée à l'une des sociétés vis à vis de ses rejets en MES et de la salinité de son effluent.

Données sur les postes de travail dans la filière méthanisation des boues de STEP

A noter : des informations sur les postes de travail et le temps passé sont recherchées dans le but d'évaluer l'exposition des opérateurs.

Aucune information détaillée n'a pu être recueillie sur les postes de travail et le temps nécessaire aux exploitants pour assurer le suivi et la maintenance des installations de méthanisation en station d'épuration.

Des visites, rondes de routine sont cependant effectuées quotidiennement. Dans certains cas, des opérations telles que des purges de circuits sont réalisées 2 à 3 fois par jour et ne durent que quelques minutes (communication personnelle).

A noter qu'en 2013, des données devraient être disponibles suite à l'appel d'offre lancé par l'ADEME en 2011 concernant le suivi technique, économique, environnemental et social d'installations de méthanisation à la ferme, centralisées, industrielles et en station d'épuration.

Données sur la composition des substrats et digestats des filières de méthanisation en STEP urbaines ; effets de la digestion anaérobie sur les micropolluants inorganiques, organiques et microorganismes pathogènes

Éléments traces métalliques (ETM) et micropolluants organiques dans les substrats et digestats

Le rapport de l'ADEME (2005) fournit des données de composition moyenne des boues d'épuration urbaines. Les ordres de grandeurs moyens des concentrations en ETM dans les boues urbaines sont :

- de 1,6 à 3,1 mg/kg MS pour le cadmium, le mercure et le sélénium,
- de 25 à 83 mg/kg MS pour le nickel, le chrome et le plomb,
- de 287 à 293 mg/kg MS pour le cuivre et,
- de 614 à 813 mg/kg MS pour le zinc.

Sources : ① AGHTM (2002) ; ② Wolf Environnement et al. (2001) ; ③ SYPREA (2004)

Teneurs moyennes en matières sèches et organiques, éléments minéraux (N, P et K), ETM et composés organiques des boues d'épuration urbaines françaises (ADEME, 2005).

	Unité	Moyenne	Médiane	Coefficient de variation	Nombre échantillons	Maxi	Mini
MS	% MB						
MO	g / kg MS	② 592	② 635	② 28%	② 6 568	② 970	② 20
N total	g NTK / kg MS	② 49,6	② 51,5	② 44%	② 6 550	② 211,7	② 0,55
N-NH ₄	g N-NH ₄ / kg MS						
P total	g P / kg MS	② 39	② 39	② 53%	② 6 573	② 257	② 0,07
K total	g K / kg MS	② 15,8	② 9,9	② 186%	② 6 572	② 464	② 0,35
Ca	g Ca / kg MS	② 81	② 48	② 88%	② 6 320	② 434	② 0,64
As	mg / kg MS						
Cd	mg / kg MS	① 2,6 ② 1,6 ③ 1,56	② 1,2	② 76% ③ 167%	① 60 ② 4 218	① 14 ② 50	① < 4 ② 0,04
Cr	mg / kg MS	① 49 ② 41,2	② 27,1	② 170%	① 60 ② 4 186	① 176 ② 1 505	① 11 ② 0,5
Cu	mg / kg MS	① 293 ② 287	② 239	② 87%	① 60 ② 4 307	① 652 ② 6 366	① 90 ② 2,5
Hg	mg / kg MS	① 2,2 ② 1,7 ③ 1,97	② 1,2	② 112% ③ 46%	① 60 ② 4 272	① 12,5 ② 46,2	① 1 ② 0,01
Ni	mg / kg MS	① 28 ② 24,8	② 19,6	② 111%	① 60 ② 4 209	① 190 ② 769	① 5 ② 0,5
Pb	mg / kg MS	① 67,5 ② 83,3 ③ 59	② 51,8	② 255% ③ 87%	① 60 ② 4 212	① 250 ② 8 802	① 10 ② 0,75
Se	mg / kg MS	② 3,1	② 2,5	② 123%	② 853	② 53,6	② 0,03
Zn	mg / kg MS	① 813 ② 630 ③ 614	② 523	② 83% ③ 51%	① 60 ② 4 288	① 6 790 ② 8 112	① 160 ② 2,5
11 HAP	mg / kg MS	① 2,3			① 60	① 11,7	① 0,55
Fluoranthène	mg / kg MS	① 0,36 ② 0,8 ③ 0,34	② 0,5	② 150% ③ 132%	① 60 ② 1 909	② 25,6	② 0,005
Benzo(b)-fluoranthène	mg / kg MS	① 0,21 ② 0,5 ③ 0,35	② 0,25	② 140% ③ 117%	① 60 ② 1 909	② 9,2	② 0,005
Benzo(a)pyrène	mg / kg MS	① 0,2 ② 0,25 ③ 0,25	② 0,15	② 200% ③ 116%	① 60 ② 2 049	② 9,7	② 0,005
7 PCB	mg / kg MS	① 0,12 ② 0,38 ③ 0,17	② 0,2	② 142% ③ 106%	① 60 ② 2 039	① 0,98 ② 12,85	① 0,07 ② 0,007
LAS	mg / kg MS	① 2 018			① 60	① 16 710	① 100
NPE	mg / kg MS	① 145			① 60	① 963	① 7,5
DEHP	mg / kg MS	① 42,2			① 60	① 359	① 10
AOX	mg / kg MS	① 314			① 60	① 1 800	① 50
Dioxines	ng I-TEQ / kg MS	① 11			① 60	① 99	① 0,3

Les boues urbaines sont aussi contaminées en divers composés organiques tels que HAP et PCB à des teneurs moyennes respectives de 2,3 mg/kg MS (pour 11 HAP) et de 0,12 à 0,38 mg/kg MS (pour 7 PCB).

Des composés tels que LAS, NPE, DEHP, AOX et dioxines sont également mis en évidence mais aussi, des composés pharmaceutiques organoétains, ... (ex : programme AMPERE).

LAS : Alkyl Sulfates Linéaires ;
NPE : nonylphenols éthoxylates ;
DEHP : diéthylhexylphtalate ;
AOX : Adsorbable Organic Halogen

Les micropolluants inorganiques ne sont pas dégradés par les processus de fermentation anaérobie : ils se trouvent concentrés dans les digestats. En sortie de digesteur, les métaux sont effectivement accumulés dans la phase solide de l'effluent (Couturier et al., 2000 , ADEME 2011). Leur spéciation (et donc leur biodisponibilité et toxicité) peut toutefois évoluer au cours des processus mais reste peu documentée.

Par exemple, des niveaux variant de 0,1 à 1,96 mg/kg MS pour le cadmium et de 211 à plus de 930 mg/kg MS en zinc sont mesurés dans des digestats de boues d'épuration urbaines (Hahn et Hoffstede, 2010 et ADEME, 2011).

A noter que les digestats pour lesquels les teneurs sont présentées ci-contre ne sont pas issus des boues pour lesquelles les valeurs moyennes sont fournies par l'ADEME (2005) et présentées en page précédente. Les niveaux sont cependant comparables.

Concentrations en ETM mesurés dans des digestats issus de la méthanisation de boues de stations urbaines (en mg/kg MS).

	STEP suédoise	STEP suédoise	STEP suisse	STEP françaises *	Seuils
Cd	1	0,1	1,1	2	3
Cr	23	8,1	115	43,7	120
Cu	380	31,5	290	422,6	300
Hg	0,87	0,05	0,8	1,7	2
Ni	25	16	51	30,3	60
Pb	32	1,8	77	78,4	180
Zn	620	210,9	843	931,2	600
sources	Hahn et Hoffstede, 2010			ADEME, 2011	NFU

* valeurs moyennes (base d'une trentaine d'échantillons en général)

D'après l'étude ADEME (2011), les teneurs en ETM dans les digestats issus de boues de station d'épuration urbaines sont en général plus élevées que celles mesurées dans les autres digestats mais, sont :

- toujours conformes aux seuils de la réglementation régissant les plans d'épandages des déchets de boues (arrêté du 8 janvier 1998),
- en moyenne inférieures aux seuils de la NFU 44-095 à l'exception du cuivre et du zinc. Sur la trentaine de digestats de boues étudiés, seules 5 seraient conformes à l'ensemble des seuils.

S'agissant des micropolluants organiques, quelques travaux rapportés par l'ADEME (2011) ont démontré un potentiel de biodégradation des HAP, nonylphénols et PCB présents dans les boues urbaines lors de la méthanisation. Cependant le nombre de données est encore limité et les résultats parfois contradictoires. De façon générale, les teneurs en ces molécules dans les digestats semblent plus influencées par les teneurs initiales dans les boues que par le métabolisme, la température de méthanisation ou la biodisponibilité des molécules.

Concentrations en HAP et PCB dans des digestats de boues d'épuration urbaines françaises – seuils de la NFU 44-095 – en µg/kg MS (ADEME, 2011).

	Résultats d'analyses de 24 ou 22 digestats de boues d'épuration urbaines en µg/kg MS		seuils NFU 44-095
	moyenne	maximum	
fluoranthène	466	1630	4000
benzo(b)fluoranthène	271,7	970	2500
benzo(a)pyrène	228,3	770	1500
7 PCB	216	880	800

Les teneurs relevées en HAP et PCB dans des digestats issus de boues d'épuration urbaines françaises (ADEME, 2011) varient en moyenne de 216 à 466 µg/kg MS. Elles sont en général inférieures aux seuils imposés par la norme NFU 44-095. Une valeur dépasse le seuil de 800 µg/kg MS en PCB.

D'après Couturier *et al.* (2000), de manière générale, les composés organiques vont se trouver dégradés par les process en composés en général moins toxiques mais peuvent également être à l'origine de composés ayant des effets néfastes (H₂S notamment). Les auteurs ont résumé les éléments suivants concernant le devenir en méthanisation des micropolluants organiques :

- dégradabilité des composés organiques aliphatiques et des composés organiques monoaromatiques par voies biologiques et chimiques,
- dégradabilité potentielle de certains composés organiques poly-aromatiques par voie biologique (déhalogénéation réductrice) ou par voie chimique,
- faible dégradabilité de certains composés halogénés comme les PCBs et Dioxines et formation par voie biologique de composés en partie déhalogénés de toxicité différente des produits initiaux.
- formation de sous-produits instables aux effets probablement mutagènes et anti-thyroïdiens différents des effets mutagènes des molécules mères (molécules stables)
- en sortie de digesteur, il apparaît :
 - une concentration très faible des micropolluants organiques dans la phase liquide malgré la présence possible de composés polyaromatiques adsorbés à de la matière dissoute,
 - des composés organiques poly-aromatiques adsorbés à la surface des molécules organiques dans la phase solide, à une concentration voisine de de la concentration initiale en entrée de digesteur ou sous forme de sous-produits de dégradation.

A notre connaissance, aucune étude n'est disponible à ce jour pour évaluer l'éventuelle influence de la présence de composés pharmaceutiques tels que des antibiotiques dans les boues urbaines, sur les processus de méthanisation. Gans *et al.* (2010, rapportés par ADEME, 2011) ont étudié ce sujet à partir de lisiers et, ont montré, que les quantités d'antibiotiques observées ont été parfois suffisantes (à partir de 100 mg/kg MS d'oxytétracycline) pour diminuer (jusqu'à 40 %) la production de méthane.

Microorganismes présents dans les substrats et digestats

Un rapport de l'ADEME *et al.*, datant de 2007 fournit un bilan des agents pathogènes pouvant être retrouvés dans les boues traitées et non traitées issues du traitement des eaux usées urbaines. Le tableau ci-dessous indique les agents pathogènes pour l'Homme isolés de boues urbaines.

Espèces de microorganismes pathogènes isolées de boues urbaines (EC, 2001 et Dumontet *et al.*, 2001 rapportés par ADEME *et al.*, 2007).

BACTERIES	VIRUS	HELMINTHES	PROTOZOAIRES	CHAMPIGNONS	LEVURES
<i>Salmonella spp.</i>	Poliovirus	<i>Ascaris lumbricoïdes</i>	<i>Giardia lamblia</i>	<i>Aspergillus spp.</i>	<i>Candida spp.</i>
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Coxsackievirus	<i>Trichuris sp.</i>	<i>Cyclospora cayetensis</i>	<i>Phialophora richardsii</i>	<i>Trichosporon</i>
<i>Listeria monocytogenes</i>	Echovirus	<i>Hymenolepis sp.</i>	<i>Entamoeba histolytica</i>	<i>Geotrichum candidum</i>	<i>Cryptococcus neoformans</i>
<i>Campylobacter spp.</i>	Parvovirus	<i>Taenia saginata</i>	<i>Toxoplasma gondii</i>	<i>Tricophyton spp.</i>	
<i>Clostridium botulinum</i>	Adenovirus	<i>Toxocara (canis et cati)</i>	<i>Sarcocystis spp.</i>	<i>Epidermophyton spp.</i>	
<i>Clostridium perfringens</i>	Reovirus	<i>Diphyllobothrium latum</i>	<i>Cryptosporidium parvum</i>		
<i>Shigella spp.</i>	Virus de l'hépatite A, C et E	<i>Echinococcus granulosus</i>	<i>Encephalitozoon intestinalis</i>		
<i>Mycobacterium spp.</i>	Rotavirus	<i>Ancylostoma duodenale</i>	<i>Vittaforma corneae</i>		
<i>Staphylococcus (souches coagulase positives)</i>	Astrovirus	<i>Necator americanus</i>			
<i>Streptococcus (souches beta hémolytiques)</i>	Calicivirus				
<i>Escherichia coli (souches entéropathogènes)</i>	Coronavirus				
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Norwalk-like calicivirus				
<i>Bacillus anthracis</i>	Virus adénoassociés				
<i>Vibrio spp.</i>	Virus Influenza				
<i>Leptospira spp.</i>	Polyomavirus (JC et BK)				
<i>Aeromonas mobiles</i>					
<i>Arcobacter spp.</i>					
<i>Bruceella spp.</i>					

Agent pathogène	Concentrations (en poids humide) dans les boues urbaines
<i>Salmonella</i>	10 ² -10 ³ g ⁻¹
Entérovirus	10 ² -10 ⁴ g ⁻¹
<i>Giardia</i>	10 ² -10 ³ g ⁻¹
<i>Ascaris</i>	10 ² -10 ³ g ⁻¹
<i>Toxocara</i>	10-10 ² g ⁻¹
<i>Taenia</i>	5 g ⁻¹

Ordres de grandeur des concentrations de certains agents pathogènes dans les boues urbaines (EC, 2001 rapporté par ADEME *et al.*, 2007).

En effet, les agents pathogènes des eaux usées se concentrent dans les boues lors des procédés de traitements des effluents, soit par décantation directe, soit par adsorption aux matières en suspension. La charge en agents pathogènes est très variable et dépend de : la nature des activités raccordées à la station (strictement domestiques et/ou industrielles), la taille de la population humaine et/ou animale raccordée au réseau et leur état de santé, le type de réseau, mais aussi les méthodologies de prélèvements / analyses. Un rapport européen datant de 2001 (EC, 2001) indique des ordres de grandeurs pour quelques microorganismes pathogènes dans les boues urbaines.

Aucune donnée en microorganismes quantifiés n'est disponible dans les digestats de boues urbaines. De façon générale, la digestion anaérobie est toutefois un procédé qui permet la réduction des concentrations en germes pathogènes, avec une efficacité beaucoup plus importante en conditions thermophiles qu'en conditions mésophiles (ADEME, 2011). La digestion mésophile avec un taux d'abattement en pathogènes de l'ordre de 80 % n'assure pas forcément une hygiénisation suffisante pour prévenir le développement ultérieur des microorganismes pathogènes lors du stockage. Une hygiénisation supplémentaire peut alors être apportée, si nécessaire, par un prétraitement ou un post traitement ad hoc (le compostage par exemple). Le stockage d'au minimum un mois des digestats liquides diminue aussi nettement les risques de présence de germes pathogènes.

Les agents pathogènes les plus résistants sont les *Clostridium* et les *Bacillus cereus* qui peuvent subsister à la digestion thermophile (espèces sporulantes) ainsi que les *Enterovirus* et les *Parvovirus* qui résistent à la digestion mésophile (Couturier, 2002).

Il peut être souligné que les boues digérées nécessitent 30 % de chaux en moins que les boues aérobies pour obtenir le même effet réducteur sur les bactéries (ADEME, 2011).

Le cas échéant, les STEP françaises méthanisent leurs boues pour la plupart en conditions mésophiles.

Par ailleurs la norme NFU 44-095 définit des seuils pour des indicateurs de contaminations et agents pathogènes, variables selon la destination du produit.

Seuils en microorganismes de la norme NFU 44-095.

		Cultures maraîchères	Toutes autres cultures
Agents indicateurs de traitement :	<i>Escherichia coli</i>	10 ³ /g MB	10 ⁴ /g MB
	<i>Clostridium perfringens</i>	10 ² /g MB	10 ³ /g MB
	Entérocoques	10 ⁵ /g MB	10 ⁵ /g MB
Agents pathogènes :	Œufs d'helminthes viables, <i>Listeria monocytogenes</i> et <i>Salmonella</i>	Absence dans 25 g MB	Absence dans 1 g MB

NB : Ces valeurs de micropolluants et microorganismes dans les substrats et digestats sont fournies à titre indicatif mais ne sont :

- *ni représentatives de l'ensemble des matières entrantes et digestats, des variations étant liées aux type de substrats traités, mais aussi pour un même type de substrat dans le temps,*

- *ni représentatives de l'exposition potentielle des opérateurs via ces matières. A noter que, dans le cas d'évaluations de risques sanitaires (à des substances chimiques ou microorganismes), les voies d'exposition étudiées sont l'ingestion, l'inhalation et le contact cutané.*

Cette dernière est souvent considérée comme négligeable au regard des autres voies (barrière cutanée), bien que certaines substances (ex : toluène) sont reconnues avoir une pénétration cutanée pouvant être importante. Cependant, moins de valeurs toxicologiques de référence sont disponibles pour cette voie et, en santé du travail, les valeurs limites ne concernent que la voie inhalation. De plus, dans les filières de méthanisation, la majorité des opérations est effectuée aux moyens de matériels ; les opérateurs n'entrent donc pas en contact direct avec les matières et, si cela devait être le cas, des moyens de protections (gants, combinaisons) sont employés.

Concernant l'ingestion, s'agissant de travailleurs, il est peu probable que les matières en question soient ingérées volontairement. Un portage main-bouche est envisageable mais a priori il y a peu de manipulations directes : un lavage des mains est en tous les cas indispensable. L'exposition peut aussi se faire par ingestion de poussières. A titre d'exemple, un groupe d'experts a évalué les risques liés aux microorganismes pathogènes présents dans les boues d'épuration et a notamment considéré un scénario d'exposition de l'agriculteur épandant les boues et travaillant son champ. Selon ce scénario, sur une journée de 8H de travail, l'agriculteur, dans son tracteur ouvert (scénario majorant) peut ingérer 216 mg de poussières/jour (ADEME et al., 2007).

Par ailleurs, les travailleurs peuvent être exposés à des substances chimiques et microorganismes par inhalation. Une attention doit donc être portée aux dangers volatiles, aérosolisés ou adsorbés sur des particules inhalables, thoraciques ou alvéolaires²³. Comme déjà indiqué, les valeurs limites d'exposition en santé du travail concernent cette voie inhalation.

Sur ces bases, il est donc possible de considérer qu'un opérateur d'une filière de méthanisation en STEP urbaines peut être exposé à des dangers chimiques et microbiologiques, par inhalation ou ingestion de poussières, lors des étapes de gestion des matières (substrats et digestats)

Dangers « inhalables » issus des substrats et digestats

Même si peu de données (en particulier d'ambiances de travail) sont disponibles, des **composés volatiles** peuvent être émis par les boues issues du traitement des eaux usées. Solagro (2001) évoque un abattement par la méthanisation de 48 à 64 % des matières volatiles des boues.

Le risque chimique en STEP provient d'après l'INRS (2012, c) :

- de l'utilisation de produits chimiques de produits chimiques pour le traitement des effluents (chlore, chaux, chlorure ferrique, soude...), et aux dégagements de gaz générés, mais aussi,
- des dégagements de gaz de fermentation des matières organiques (CH₄ ou H₂S pour les plus dangereux), probablement donc en particulier en zones mortes où des boues peuvent se retrouver en anaérobiose,
- de la présence de polluants dans les eaux usées et les boues d'épuration ou de curage (solvants des colles, résines, peintures, métaux lourds...).

S'agissant des **odeurs**, Debrieu (2004), indique que les composés soufrés sont responsables en STEP de 80 à 90 % des odeurs. Une fois digérées, les boues sont peu fermentescibles et sont beaucoup moins malodorantes que des boues fraîches, même après stockage (Solagro, 2001).

Une autre problématique identifiée concerne le compostage des boues et l'émission **d'ammoniac**. Des résultats de mesure d'ammoniac sont disponibles pour le compostage de boues urbaines non méthanisées (INRS, 2010). Des valeurs élevées, supérieures à la VME fixée à 10 ppm (7 mg/m³), ont été mesurées en ambiances de travail de centres compostant principalement des boues urbaines avec procédé classique de fermentation par aération forcée au sol et retournement par chargeuse. Dans une usine entièrement close (C), la concentration moyenne en ambiance de travail était de 58,3 ppm. Des concentrations supérieures à la VME mais en général plus faibles (moyenne = 12,5 ppm) ont été observées dans une usine de même configuration (H), traitant des volumes de boues plus importants mais où les portes de la zone de fermentation avaient été ouvertes.

²³ En santé au travail, les fractions de particules devant être contrôlées sont majoritairement les fractions inhalables et dans certains cas, les fractions thoraciques ou alvéolaires (INRS, 2007).

Aucune donnée n'est disponible pour des boues digérées, mais, la méthanisation engendrant la transformation de l'azote en azote ammoniacal, il est possible que des teneurs en ammoniac encore plus élevées puissent être mesurées lors du compostage de boues méthanisées.

Concentrations en ammoniac mesurées dans des centres de compostages de divers déchets (INRS, 2010).

Entreprise	Déchet principal	Ammoniac : concentration en ppm															
		Ambiance tous points				Ambiance fermentation				Cabines engins				Prélèvements individuels			
		n (n>VME)	Moy	Max	Écart type	n (n>VME)	Moy	Max	Écart type	n (n>VME)	Moy	Max	Écart type	n (n>VME)	Moy	Max	Écart type
A hiver	DV	3*	< 1	< 1													
A été	DV	3*	< 1	< 1													
B hiver	boues	3*	2,6	6,0													
B été	boues	3*	6,2	12,1													
C	boues	10 (10)	58,29	81,60	17,11	6 (6)	65,40	81,60	9,80	4 (2)	26,90	51,60	26,84	7 (3) cabine	22,44	48,60	19,74
D	bio-déchets	20	2,08	4,61	1,17	12	2,30	4,61	1,26	5	1,98	3,69	1,02				
E	DV + boues	26	3,55	7,54	2,60	18	5,06	7,54	1,55	4	0,63	0,77	0,10				
F	OMR	26	0,18	0,59	0,13	8	0,24	0,59	0,16	4	0,09	0,13	0,03				
G	OMR	28	0,06	0,11	0,01	19	0,06	0,08	0,01	4	0,11	0,18	0,05				
H	boues	34 (19)	12,47	39,50	7,32	34 (19)	12,47	39,50	7,32	12 (3)	8,67	13,01	3,25	5 (1)	8,29	20,18	2,54
I	DV	35	1,59	6,00	1,64	20	1,62	6,00	1,74	15	0,16	0,29	0,07				
J	digestat OMR	40 (32)	27,58	51,21	12,68	30 (30)	34,20	51,21	5,76	5 (3)	14,6	24,3	7,1	11 (8) cabine	15,8	30,0	8,2

* Mesurages réalisés sur une durée moyenne de 6 à 7 heures par appareil à lecture directe

DV : déchets verts ; OMR : Ordures Ménagères Résiduelles

Plateformes C et J entièrement closes ; les autres disposent de bâtiments fermés, halls mi-clos et aires de stockage à l'air libre. En général hormis dans le cas des usines C et J, les bâtiments et halls ne sont que très rarement fermés : en périodes de travail, en général au moins une porte est ouverte.

A noter que d'après l'INRS (2010), la conduite des engins (chargeuse sur pneus, mélangeuses, retourneur d'andain, ...) représentent environ 80 % du temps de travail des opérateurs des centres de compostage. Les cabines des engins sont équipées de filtres mais la plupart du temps inefficaces vis-à-vis de l'ammoniac.

Des analyses d'H₂S ont également été réalisées en des points de l'usine H compostant des boues, les valeurs obtenues étaient faibles (en général < 0,1 mg/m³ alors que la VME est fixée à 7 mg/m³) (INRS, 2010).

Concernant les **bioaérosols** dans des milieux de travail, Goyer *et al.* (2001) indiquent que les bioaérosols dominants pour le traitement des eaux usées sont *Aspergillus*, *Penicillium*, *Cladosporium*.

Les auteurs rapportent des niveaux de concentrations en bactéries totales, bactéries gram négatives, actinomycètes thermophiles, moisissures et endotoxines présentées dans le tableau ci-contre.

Concentrations de bioaérosols mesurés dans des ambiances de travail (Goyer *et al.*, 2001).

		Extérieur	Centre d'épuration des eaux usées
bactéries totales	en UfC/m ³	10 ²	10 ⁴
bactéries Gram négatives		10 ¹	10 ⁴
actinomycètes thermophiles		10 ²	10 ⁰
moisissures	en UE/m ³	10 ³	10 ³
endotoxines		Np	<1-410

np : non précisé

Aucune valeur limite professionnelle n'est disponible en France pour les microorganismes et endotoxines. Pour ces dernières des valeurs sont proposées en Allemagne (50 UE/m³) et aux Pays-Bas (200 UE/m³) (INRS, 2011) (1 ng/m³ = 1 UE/m³.)

Quelques **études épidémiologiques** concernant les professionnels exposés aux boues pendant la production et l'épandage ont été menées, ainsi que concernant les travailleurs de stations d'épuration urbaines exposés aux eaux usées. Ainsi, d'après l'ADEME *et al.*, (2007), ces études épidémiologiques en STEP mêmes, si elles sont parfois contradictoires, apportent des preuves limitées d'infections et symptômes d'irritation et d'allergies. Les agents pathogènes mis en causes sont les endotoxines, les parasites, les virus et les champignons. A noter qu'une étude dans une STEP industrielle a également mis en évidence des cas de fièvre Pontiac résultant de l'exposition à des Légionnelles (pendant des travaux sur un décanteur). Parmi les travaux ayant porté sur l'exposition aux boues, certains n'ont détecté aucun effet significatif sur les personnes, d'autres ont rapporté des infections virales (hépatite A chez des agriculteurs épandant les boues, les précautions minimales de protection n'ayant toutefois pas été observées) et, des symptômes gastro-intestinaux en lien avec une exposition à des bactéries entériques, (chez des techniciens manipulant des boues mais celles-ci ne satisfaisaient pas les seuils réglementaires en vigueur aux Etats-Unis).

Des **études épidémiologiques** ont aussi été réalisées dans des centres de **compostage**. A noter que les polluants émis lors du compostage sont de deux ordres (ORS, 2010). Il s'agit :

- de substances chimiques. Durant le compostage divers gaz peuvent effectivement être émis et sont fonction des conditions d'aération, de l'étape de traitement et de la nature des déchets traités : principalement CO₂, N₂O, composés soufrés et ammoniac comme déjà évoqué, et en moindre quantité, composés organiques volatils non méthaniques,
- de microorganismes dont :
 - o des organismes pathogènes d'origine fécale présents dans les produits de départ en particulier les boues,
 - o d'organismes allergisants ou pathogènes se développant durant le compostage : c'est surtout le cas des actinomycètes thermophiles et des champignons,
 - o de toxines et allergènes libérés par les agents constituants des bactéries (endotoxines) et les champignons parfois métabolites secondaires (mycotoxines).

Dans le rapport ORS (2010), il est fait mention de 9 études de synthèse portant sur les effets sanitaires du personnel des plateformes de compostage. Le groupe d'experts ayant élaboré ce rapport ORS (2010) a ainsi jugé selon la méthodologie mise en œuvre et explicitée dans le document, qu'un niveau de preuve convaincant peut être attribué au lien entre l'exposition à des bioaérosols des travailleurs en plateformes de compostage et l'apparition de troubles respiratoires aigus. Concernant les troubles respiratoires chroniques, les données sont insuffisantes pour pouvoir conclure.

S'agissant des troubles dermatologiques gastro-intestinaux et oculaires, ils jugent possible l'association entre l'exposition des travailleurs et ces effets. Pour les autres pathologies étudiées (cancers, troubles du développement fœtal et autres symptômes divers), aucune donnée n'est disponible.

A noter aussi qu'en 2010 selon les données de la CNAMTS, deux cas d'hépatites virales ont été reconnues MP chez des salariés du secteur « autres services d'assainissements ». Il n'est cependant pas précisé s'il s'agit de cas dans le secteur spécifique du traitement des eaux usées.

A notre connaissance aucune étude relative aux bioaérosols potentiellement émis par des digestats n'est disponible. En revanche, pour rappel, même en conditions mésophiles, les digestats de boues devraient contenir des charges en microorganismes pathogènes plus faibles que les boues non méthanisées.

Les activités préalables à la méthanisation des boues et susceptibles de générer des bioaérosols représentent donc probablement des zones où des risques microbiologiques peuvent exister. Après la méthanisation, même si aucune donnée ne le confirme à ce jour, le risque est probablement réduit. Le compostage reste cependant une activité qui pourrait engendrer des troubles sanitaires chez les professionnels notamment liés aux bioaérosols générés durant cette phase.

Il faut ainsi souligner l'importance de respecter les précautions minimales (gants, vêtements de protection, cabines avec média filtrants, aération) en particulier lors des manipulations de matières, ou lors par exemple d'opération de maintenance, réparation, lavage.

Niveaux de preuves attribués, par les experts ayant élaboré le rapport ORS (2010), aux liens entre exposition des professionnels des centres de compostage et des effets sanitaires.

Pathologies	Niveau de preuve Professionnels
Cancers	Pas de données
Troubles du développement fœtal	Pas de données
Troubles respiratoires aigus	Convaincant
Troubles respiratoires chroniques	Conclusion impossible
Symptômes divers/subjectifs	Pas de données
Troubles dermatologiques	Possible
Troubles gastro-intestinaux	Possible
Troubles oculaires	Possible

Données sur la composition chimique des biogaz des filières de méthanisation de boues urbaines

Comme déjà indiqué, d'après les données issues de 25 installations en France, la concentration en **méthane CH₄** du biogaz produit en STEP varie de 55 à 80 % (moyenne 65 % environ) (ATEE, Club Biogaz, 2011) (50 à 74% d'après INERIS, 2008). Le méthane est un gaz inflammable qui, s'il se retrouve en mélange stœchiométrique dans l'air, peut exploser en cas de source d'ignition.

L'autre composé majoritaire du biogaz est le **dioxyde de carbone CO₂** quant à lui inerte (ses concentrations varient de 25 à 49 % d'après l'INERIS, 2008).

D'après l'INERIS (2008), la LIE - limite inférieure d'explosivité se situe autour de 5 % v/v et la LSE - limite supérieure d'explosivité varie de 15 % pour du méthane pur à 11,4 % /v, si le méthane n'est présent dans le biogaz qu'à une proportion de 50 %.

LIE et LSE pour différentes compositions de biogaz en terme de mélange CH ₄ – CO ₂ (INERIS, 2008).	CH ₄ - CO ₂ (%v/%v)	LIE (%v/vCH ₄)	LSE (%v/vCH ₄)
100 - 0		5	15
60 - 40		5,1	12,4
55 - 45		5,1	11,9
50 - 50		5,3	11,4

D'autres composés sont présents à l'état de **traces** dans le biogaz. Ils sont suffisamment peu abondants pour n'avoir qu'une influence négligeable sur les caractéristiques d'**explosivité** du mélange biogaz/air. En revanche ces divers composés peuvent présenter une certaine toxicité.

Quelques études compilant des données de teneurs ont été réalisées mais elles ne sont pas toutes comparables en termes de composés recherchés et limites de quantification appliquées.

D'après Rasi *et al.* (2007), la concentration totale en **composés organiques volatiles** dans le biogaz produit en STEP varie de 45 à 176 mg/m³. A titre de comparaison les concentrations sont plus faibles dans le biogaz issu d'installations agricoles (5 à 8 mg/m³) et relativement comparables dans le biogaz produit en centre d'enfouissement de déchets (13 à 268 mg/m³). Les auteurs indiquent également qu'en STEP et CET, les composés volatils majoritairement mis en évidence dans le biogaz sont des **hydrocarbures aliphatiques et aromatiques**. En CET, plus de composés aromatiques et halogénés qu'en STEP sont observés. Pour l'installation agricole, les composés volatiles du biogaz sont principalement des **composés soufrés réduits** et quelques hydrocarbures aliphatiques et aromatiques.

Concernant l'**H₂S**, gaz pouvant être mortel en quelques minutes à fortes concentrations (963 mg/m³ pendant 10 minutes), les données disponibles dans le biogaz de STEP montrent des variations allant de < 0,14 à 88 mg/m³ selon Rasi *et al.* (2007 et 2009), jusque 7 500 mg/m³ selon l'INERIS (2002), de 25 à 3 200 mg/m³ selon l'AFSSET (2008), de 14 à 4 220 mg/m³ selon l'INERIS (2009). Les données de Rasi *et al.* (2007, 2009) concernent des STEP ayant des procédés de désulfuration alors que les autres valeurs se rapportent à du biogaz brut non épuré. A ce jour pour rappel, en France, la désulfuration est peu répandue en STEP (5 usines sur 22 ayant répondu d'après l'ATEE, Club Biogaz, 2011).

Parmi les données disponibles pour des STEP françaises relatives aux concentrations des divers micropolluants, (AFSSET, 2008 ; INERIS, 2009), les composés quantifiés dans le biogaz d'au moins un site et, les teneurs mesurées sont indiqués ci-dessous. Lorsqu'ils l'étaient dans plusieurs cas, la valeur maximale est reportée.

Concentrations en micropolluants organiques et inorganiques déjà mesurées dans du biogaz issu de la méthanisation de boues urbaines en France (d'après AFSSET, 2008 et INERIS, 2009) (valeurs maximales reportées).

Hydrocarbures aliphatiques	en µg/m³	Métaux	en µg/m³
Butane	60	Cd	0,007
Hexane	172	As	30
Hexane, 2-méthyl	230	Sb	60
Hexane, 3-méthyl	280	Cu	4,5
Décane	21000	Co	0,6
Octane	2100	Cr	120
Nonane	6700	Sn	0,017
Undécane	12000	Mn	6,2
Butane, 2methyl	70	Ni	6,5
Octane, 3 methyl	20	Pb	7,8
Pentane	540	Te	3
Pentane, 3 méthyl	180	Hg	4,4
Pentane, 2 methyl	860	Bi	1,1
Heptane	650	Hydrocarbures cycliques	en µg/m³
Dodecane	3700	Cyclohexane	59
Hexadecane	11400	Cyclopentane	110
Tridécane	140	Cyclohexane, méthyl	130
Hydrocarbures aromatiques monocycliques	en mg/m³	Cyclopentane, méthyl	47
Benzène	0,2	Composés halogénés	en mg/m³
Toluène	23,8	Ethylène, 1,2 dichloro (cis)	1,1
Toluène, isopropyl	18,4	Ethylène, trichloro	120
Benzène, Ethyl	6,3	Ethylène, tetrachloro	74
Xylènes (m/p+o)	0,8	Ethylène, chloro (chlorure de vinyl)	0,41
m-Xylène	0,67	Benzène, chloro	4,2
o-Xylène	0,25	HAP	en µg/m³
Benzène, isopropyl (cumène)	0,077	somme HAP (C11H20)	660
Benzène, 1,3,5 triméthyl	0,33	Naphtalène	33
Benzène 1,2,3 triméthyl	0,16	Acénaphtylène	4,6
Benzène, 1,2,4 triméthyl	0,73	Acénaphène	0,33
benzène para-méthyl isopropyl	0,764	Fluorène	0,38
Benzène, 1ethyl 2methyl ou 2 éthyl toluène	0,19	Phénanthrène	0,27
Benzène, 1 ethyl 4methyl ou 4 éthyltoluène	0,497	Anthracène	0,56
Benzène, propyl	0,077	Fluoranthène	0,055
		Chrysène	0,026

A noter que deux sites ont fait l'objet de mesures d'ammoniac dans le biogaz produit. Les valeurs sont inférieures à 0,2 mg/m³.

Des **composés organiques de silicium** (COVSi) dont les siloxanes sont aussi présents dans les biogaz issus de la méthanisation des boues urbaines et produit en CET (concentrations respectives de 1,5 à 10,6 et 0,7 à 4,0 mg/m³). Dans le biogaz agricole, leurs teneurs restent inférieures à 0,4 mg/m³ (Rasi *et al.*, 2007). Ces composés sont issus de la dégradation des silicones utilisées dans de nombreux produits de consommation courante (ex : cosmétiques). Selon Ohannessain (2008), les silicones ne posent pas de problème de santé publique mais constitue un frein majeur à la valorisation du biogaz. En effet, quand le biogaz est brûlé pour produire de l'électricité, les siloxanes se transforment en dioxyde de silicium (SiO₂), qui peut se déposer sur les différents équipements en contact avec le gaz brûlé, sous forme de dépôt blanchâtre apparenté à de la céramique. La présence de siloxanes dans le biogaz provoque des dégâts considérables sur les équipements de production d'électricité (moteurs, microturbines, piles à combustible...) et ainsi une baisse des performances (Record, 2009).

Ces COVSi ne constituent donc *a priori* pas un danger direct pour les opérateurs des filières mais peuvent constituer un danger indirect lié à la dégradation progressive du matériel des filières (maintenance nécessaire). Des systèmes d'épuration sont de plus en plus mis en œuvre pour éliminer ces composés du biogaz.

Valeurs limites d'exposition professionnelles (VLEP) et valeurs toxicologiques de référence (VTR) de substances observées dans les biogaz et/ou les digestats de boues de STEP

Les VLEP disponibles pour les composés mesurés dans le biogaz issu de la méthanisation de boues de STEP urbaines sont présentées à titre indicatif (*cf.* tableau ci-après) et, afin de les comparer aux valeurs mesurées dans le biogaz. Il faut toutefois noter qu'un opérateur ne sera jamais exposé à une atmosphère composée de 100 % de biogaz. Si tel était le cas, l'asphyxie par absence d'oxygène interviendrait avant tout effet toxique des substances. Rappelons également que la méthanisation se déroule en système clos. Les opérateurs ne devraient pas être exposés à des dangers du biogaz en fonctionnement normal. Des expositions sont potentielles lors d'un dysfonctionnement, fuite notamment dans un local confiné ou éventuellement lors d'opérations de maintenance (ex : purges de réseau) au cours desquelles une courte exposition à une petite quantité de biogaz pourrait être possible.

Les valeurs rencontrées dans le biogaz sont, pour la plupart, inférieures (voire largement inférieures *cf.* tableau page précédente) aux valeurs limites professionnelles disponibles, sauf pour :

- le chrome quantifié à une valeur de 120 µg/m³ et en considérant la VME du Cr VI, soit 1 µg/m³. Toutefois, il est probable que la concentration reportée par l'AFSSET (2008) et mesurée par l'INERIS (2002) correspond à du Cr total,
- l'H₂S pour lequel la VME est de 7 mg/m³. Dans le biogaz non épuré des valeurs jusque 7 500 mg/m³ ont déjà été mesurées. Pour un tel biogaz, il suffirait d'environ 0,09 % de biogaz dilué dans une atmosphère. Ce scénario semble plausible, d'autant plus qu'en France la désulfuration du biogaz de STEP est peu répandue en STEP.

Au vu de ces éléments on ne peut que recommander l'emploi de détecteur en continu de l'H₂S dans les lieux confinés et de détecteur portatif individuel lors de la maintenance par exemple des bassins et digesteurs ou encore lors de purges de réseau. Le biogaz n'étant pas épuré en H₂S, la détection du méthane à une teneur correspondant à 25 % de la LIE n'est pas suffisante pour se prémunir contre les effets de l'H₂S. Cette démarche serait valable si les teneurs du biogaz en H₂S étaient maintenues inférieures à 100 mg/m³ (INERIS, 2008).

Pour compléter la réflexion, concernant les composés parfois présents dans les digestats de boues méthanisées et, considérant un agriculteur pouvant être exposé *via* ingestion de poussières lorsqu'il les épand et travaille son champs (scénario déterminé dans l'étude de l'ADEME *et al.*, 2007), les valeurs toxicologiques de référence (orale - chronique²⁴) des métaux, HAP et PCB quantifiés sont fournies ci-dessous à titre indicatif.

Même selon un scénario semble-t-il très majorant (*tracteur ouvert : ingestion de 216 mg/j de poussières²⁵ ; – considération que l'agriculteur réalise le travail de son champs sur lequel a été épandu le digestat tous les jours, ...*), les concentrations limites en composés étudiés ne devant pas être dépassées dans les poussières ingérées par l'agriculteur pour qu'aucun effet chronique à seuil ou sans seuil soit à craindre, sont, très largement supérieures aux teneurs mesurées et aux seuils des normes NFU, au moins pour les HAP et métaux. Elles sont plus proches pour les PCB (environ 4 fois supérieures aux valeurs déjà mesurées) (*cf.* tableau ci-après).

²⁴ Les VTR chroniques ont été sélectionnées, elles sont plus faibles que les valeurs aiguës et permettent de se placer dans un scénario majorant. De plus lorsque plusieurs VTR étaient disponibles, la plus faible a été sélectionnée.

²⁵ Tracteur fermé, les experts estiment que la quantité de poussières ingérées diminue à 12 mg/j (ADEME *et al.*, 2007).

Valeurs limites professionnelles disponibles pour des composés mesurés dans le biogaz (INRS, 2012 a) – en mg/m³

Composés organiques	VME ²⁶	VLCT ²⁷	Composés inorganiques	VME ²⁴	VLCT ²⁵	Autres	VME ²⁴	VLCT ²⁵
benzène	3,25	/	Pb métallique	0,1		H ₂ S	7	14
toluène	76,8	384	Cd et composés	0,05	/	CO ₂	9000	/
éthylbenzène	88,4	442	dioxyde de Ti, en Ti	10	/	Ammoniac	7	14
xylènes (somme ou o, m, p)	221	442	trioxyde d'As, en As	0,2	/	Poussières totales	10	/
benzène (1,3,5 -1,2,3 - 1,2,4 triméthyl -)	100	250	Ni (métal)	1	/	Poussières alvéolaires	5	/
dichlorobenzène (1,2)	122	306	hexafluorure de Se	0,2	/			
dichlorobenzène (1,4)	4,5	306	Cu (fumées)	0,2	/			
dichlorométhane	178	356	Cu (poussières)	1	2			
dichloroéthylène	20	/	Cr (Chrome VI)	0,001	0,005			
trichloréthylène	405	1080	Cr inorganique (II / III)	2	/			
tétrachloréthylène	138	275	Mn (fumées)	1	/			
Ethylène, chloro	2,59	/	Hg (composés alkylés), en Hg	0,01	/			
Benzène, chloro	23	70	bismuth (tellurure de, dopé au Se), en Bi	5	/			
butane	1900	/						
nonane	1050	/						
octane	1450	/						
heptane	1168	2085						
pentane	3000	/						
naphtalène	50	/						
benzo(a)pyrène	0,150 *							
cyclohexane	700	1300						
cyclopentane	1720	/						
cyclohexane, méthyl	1600	/						

En noir gras, valeurs réglementaires contraignantes

En bleu gras, valeurs réglementaires indicatives

En noir, valeurs indicatives ;

** valeur recommandée par la CNAM (pas de VLEP fixée).*

Cases en rosé : substances CMR avérées, assimilées ou possibles

VTR chroniques par voie orale des composés HAP, PCB et métaux quantifiés dans des digestats – évaluation des concentrations limites ne devant pas être dépassées pour qu'aucun effet pour l'agriculteur exposé ne soit à craindre.

	VTR orales chroniques en mg/kg/j		Doses journalières maximales pour un opérateur de 70 kg en mg/j		Concentrations limites ne devant pas être dépassées dans les poussières ingérées par l'agriculteur épandant un digestat et travaillant son champs - en mg/kg MS		Valeurs maximales (moyennes) quantifiées (Hahn et Hoffstede, 2010 ; ADEME, 2011) / seuils des normes NFU 44015 ou NFU 44095 en mg/kg MS
	effet avec seuil (ES)	effet sans seuil (SS)					
			ES	SS	ES	SS	
fluoranthène	0,04	ND	2,8	-	12 963	-	1,630 (moy : 0,466)/ 4
benzo(b) fluoranthène	ND	1,2	-	84	-	388889	0,970 (moy : 0,272) / 2,5
benzo(a)pyrène	ND	7,3	-	511	-	2365741	0,770 (moy : 0,228)/ 1,5
PCB	ND	0,00001	-	0,0007	-	3,24	0,880 (moy : 0,216) / 0,8
As	0,0003	1,5	0,021	105	97	486111	NR / 18
Cd	0,0005	ND	0,035		162		5 (moy : 1,96) / 3
Cr (VTR du Cr VI)	0,003	ND	0,21		972		115 (moy : 43,7)/ 120
Cu	0,14	ND	9,8		45370		786 (moy :423)/ 300
Hg	0,0003	ND	0,021		97		2,79 (moy : 1,65)/ 2
Ni	0,005	ND	0,35		1620		115 (moy : 30,3) / 60
Pb	0,0036	0,0085	0,252	0,595	1167	2755	242 (moy : 78)/ 180
Se	0,005	NC	0,35		1620		0,34 / 12
Zn	0,3	ND	21		97222		2164 (moy : 931) / 600

²⁶ VME : Valeur moyenne d'exposition correspondant à des valeurs limites sur 8 H d'exposition

²⁷ VLCT : valeur limite court terme destinée à protéger des pics d'exposition.

Données sur la composition microbiologique des biogaz

En fonction des intrants, la composition microbiologique du biogaz varie. Toutefois, la composition de la flore des biogaz n'est, en proportion, pas la même que celle du digesteur dont il est issu (AFSSET, 2008).

En effet, même si le biogaz apparaît être un vecteur capable de transporter n'importe laquelle des espèces microbiennes présentes dans la source (les densités de micro-organismes sont généralement de l'ordre de 10^6 à 10^7 cellules procaryotes/m³ et 10^4 cellules d'eucaryotes/m³), l'aérosolisation est variable en fonction des espèces (Moletta, 2006, Moletta *et al.*, 2008 et 2010) :

- certaines sont préférentiellement aérosolisées (ex : *Staphylococcus spp.*, *Propionibacterium acnes*, phylums des *alphaproteobacteria*, *betaproteobacteria*, *gammaproteobacteria*) (aérosolisation active),
- certaines sont préférentiellement non-aérosolisées (phylums des *Deltaproteobacteria*, *Spirochaetes*, *Thermotogae*, *Chloroflexi* et groupes sulfato-réducteurs) (non-aérosolisation active),

Les auteurs évoquent aussi un comportement d'aérosolisation passive qui peut conduire n'importe lequel des groupes de micro-organismes présents dans la source à se retrouver dans l'aérosol (ex : phylums des *Actinobacteria*, *Firmicutes* et *Bacteroidetes*).

Vinneras et Nordin (2007) ont étudié la flore de biogaz issus de stations d'épurations. Ils ont conclu que le risque microbiologique lié à l'utilisation du biogaz valorisé était probablement insignifiant. Les risques liés au contact avec le gaz brut et les eaux condensées sont probablement plus élevés. Cependant les systèmes étant généralement fermés, les auteurs rapportent que, selon les professionnels, les travailleurs sont rarement exposés. *A noter que dans cette étude, une des sources de microorganisme dans le biogaz était l'eau usée utilisée pour désulfurer le biogaz.*

Diagramme de fonctionnement des installations de méthanisation de boues de STEP urbaines / identification de points critiques pour la santé/sécurité des opérateurs

Un diagramme de fonctionnement d'une STEP méthanisant ses boues est présenté ci-après. Il illustre les principales étapes de cette filière. Il est représentatif des installations les plus répandues en France (d'après les données de l'ATEE, Club Biogaz, 2011).

Sur ce diagramme, les points critiques pour les opérateurs vis-à-vis de différents dangers identifiés sont représentés aux moyens de logos illustratifs et d'un code couleur représentatif d'un niveau de criticité.

En effet, une hiérarchisation des points critiques pour les opérateurs des filières biogaz a été proposée. Elle est fondée sur la base d'une méthodologie dans laquelle des niveaux de criticité sont définis en croisant :

- des niveaux d'enjeux (en terme de conséquences) et,
- des niveaux de retour d'expérience (l'évènement a-t-il déjà été décrit, est-il probable ou non, ... ?).

Pour chacun de ces niveaux, des scores ont été attribués : plus le score est élevé, plus le niveau est élevé c'est-à-dire par exemple, plus l'évènement peut avoir des conséquences importantes.

Dans le cadre de cette étude, nous avons arbitrairement considéré 3 niveaux d'enjeux et 3 niveaux de retour d'expérience : niveau faible – score 1 / niveau modéré – score 2 / niveau fort – score 3.

La matrice suivante a ainsi été élaborée :

niveaux de retour d'expérience	Elevé- 3	Moyen -2	Faible - 1
niveaux d'enjeux			
Important - 3	3 x 3 = 9	3 x 2 = 6	3 x 1 = 3
Modéré - 2	2 x 3 = 6	2 x 2 = 4	2 x 1 = 2
Faible - 1	1 x 3 = 3	1 x 2 = 2	1 x 1 = 1

Dans le cas de situations particulières, des scores en général de 0,5, voire 1 peuvent ensuite avoir été ajoutés ou retranchés aux résultats de criticité « Enjeux x Retour d'expérience ».

Trois niveaux de points critiques sont ainsi identifiés :

- les points critiques majeurs avec des notes supérieures ou égales à 6 (couleur rouge),
- des points critiques modérés avec des notes variant de 3 à inférieures à 6 (couleur jaune),
- des points critiques mineurs avec des notes inférieures à 3 (couleur verte).

Les différents éléments rapportés dans cette synthèse ont permis de proposer des niveaux d'enjeux et des niveaux de retour d'expérience, selon des critères propres à chacun des dangers et, explicités dans le tableau argumentaire associé au diagramme. Ce tableau argumentaire est indissociable du diagramme.

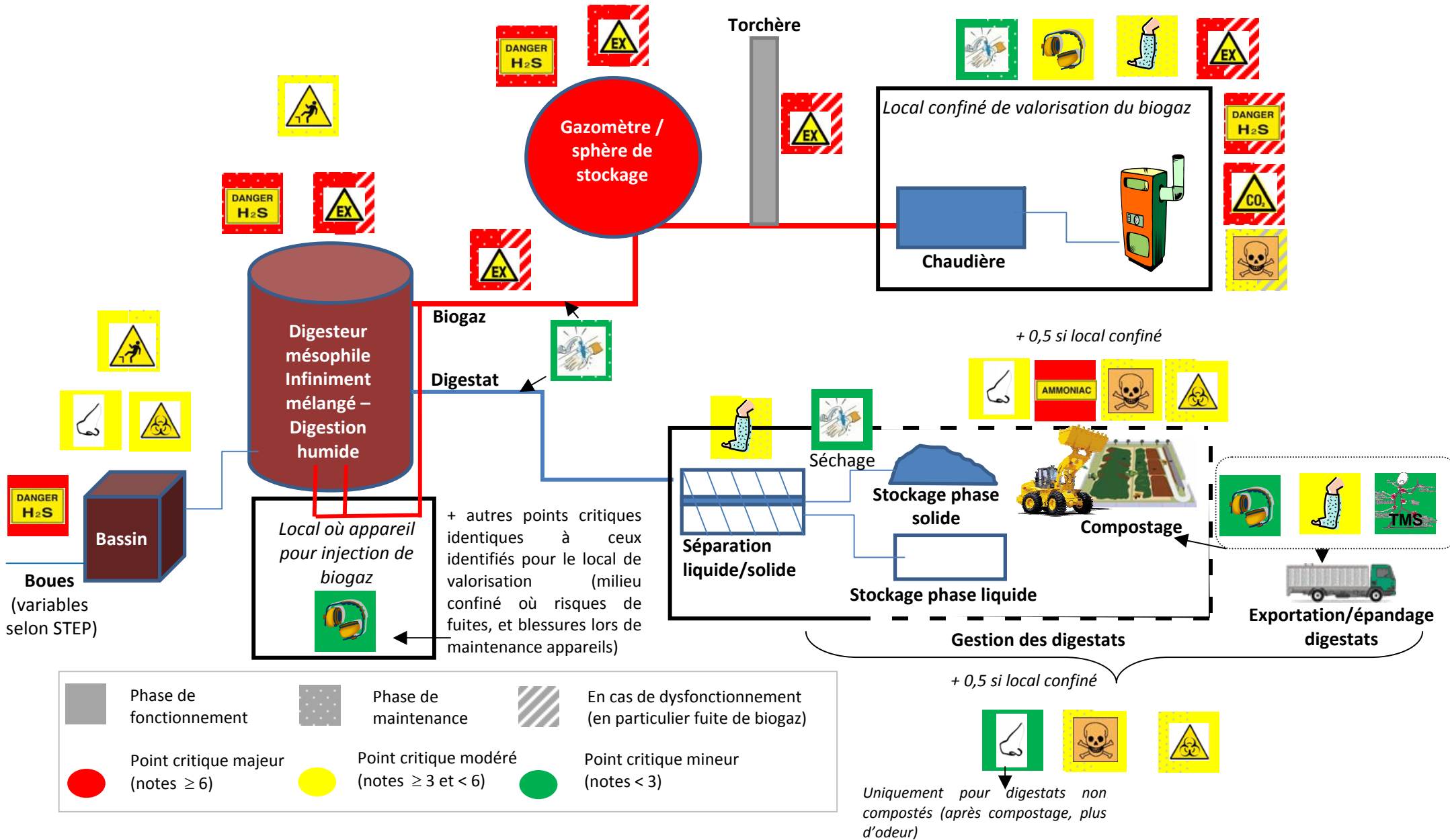
A noter que les données étant différentes pour les dangers étudiés, cela introduit un certain biais, notamment si l'on souhaite les comparer entre eux. Par ailleurs dans certains cas (dangers, filières étudiées), les données sont rares voire inexistantes, ce qui peut aussi introduire un biais par rapport aux cas où des données sont disponibles.









Pour plus de détails sur la méthodologie, se reporter en section 9/ du rapport.

Remarque importante : le contenu de cette synthèse, du diagramme et du tableau présentés ci-après, ne peut être utilisé en l'état par une entreprise ou un site comme le résultat d'une analyse des risques professionnels. Il s'agit uniquement d'une sensibilisation des acteurs, et lecteurs sur des points critiques des filières de production, valorisation de biogaz, en termes de santé et sécurité des opérateurs. Ces points critiques constituent des alertes sur des points au niveau desquels il convient de mettre en œuvre les mesures de maîtrise des risques existantes et/ou d'approfondir les données en réalisant des évaluations de risques plus détaillées.





Filière Méthanisation des boues de STEP urbaines



Diagramme indissociable du tableau argumentaire ci-après.
 ! Ne peut être utilisé comme le résultat d'une évaluation des risques professionnels.









Points critiques identifiés	Lieux / étapes	Phases	Niveaux d'enjeux (E)	Niveaux de retour d'expérience (R)	Résultats E X R	Situations particulières	Principales mesures de maîtrises /autres commentaires
Risque électrique 	Local de cogénération / armoire électrique – raccordement au réseau EDF	Mise en service / Maintenance / Dys-fonctionnement	3 - D'après l'INRS (2012 b), des accidents graves, notamment mortels peuvent survenir.	1 - D'après l'INRS (2012 b), ces accidents sont de plus en plus rares (toutes professions confondues, 10 morts / an par électrocution). <i>A noter qu'à ce jour, les STEP valorisent principalement en chaleur, en général réutilisée sur le site. Sur le schéma le risque électrique n'apparaît donc pas.</i>	3 x 1 = 3 		Habilitations Normes
Risque d'explosion d'une ATEX, inflammation de gaz 	Local confiné où arrivée de biogaz (local de cogénération) Digesteur / post-digesteur / gazomètre / torchère (soupapes) Brides / raccords / pots de purges canalisations	Dys-fonctionnement (fuite) / Maintenance (ex : purges) / Fonctionnement du digesteur : en phase démarrage / arrêt	3 - L'explosion d'une ATEX engendre de nombreux dégâts et potentiellement des morts. Les incendies ou feux torches en particulier lié à des fuites de gaz peuvent aussi être dévastateurs (INERIS, 2008).	3 – Des dysfonctionnements ont déjà été enregistrés ayant entraîné des fuites de biogaz jusqu'à l'explosion et aux feux torches. Les règles de sécurité s'améliorant, ce type d'accidents devrait être cependant de plus en plus rare.	3 x 3 = 9 	+ 0,5 dans local confiné - 0,5 au niveau des canalisations (volume ATEX moins important)	Identifications des zones ATEX Formation, mesures de sécurité (soupapes détecteurs de CH ₄ , ventilation) Appareils dédiés zones ATEX
Risque blessures / chutes 	Endroits où des chutes en particulier de hauteur sont possibles (ex : bord bassin aération). Manipulation d'objets, d'outils Chargement digestat	Fonctionnement / Maintenance	1 - Même si ces accidents du travail peuvent avoir une gravité très variable, les plus fréquents sont des accidents peu graves entraînant des douleurs, lumbagos, contusions, plaies (CNAMTS, 2010)	3 – Ce type d'accidents de travail est le plus fréquent. Ces AT sont notamment liés à la manipulation d'objet (291 cas), des accidents de plain-pied (249 cas) et des chutes avec dénivellation (144 cas) (sur 999 AT recensés en 2010 chez les salariés sur secteur « autres services d'assainissement » (CNAMTS, 2010).	1 x 3 = 3 	+ 0,5 en cas maintenance	Règles de sécurité (ex : barrières, utilisations de cordes), de conception des locaux. Notices machines, ...
Brûlures 	Canalisations non enterrées du biogaz/digestat Local chaudière Séchages des digestats / emploi d'acides	Fonctionnement / Maintenance (ex : sur chaudière)	1 – La gravité de ces brûlures (hors incendies) est considérée comme faible (proportion du corps touchée faible (ex : mains))	1 – Aucune information relative aux éventuelles brûlures n'est disponible. Toutefois leur nombre est probablement faible.	1 x 1 = 1 	+ 0,5 si digestion thermophile au niveau des canalisations + 0,5 en cas maintenance	Règles de bon sens et de sécurité (ex : refroidissement avant maintenance) / repérage canalisations selon normes, calorifugeage canalisations, pièces

Points critiques identifiés	Lieux / étapes	Phases	Niveaux d'enjeux (E)	Niveaux de retour d'expérience (R)	Résultats E X R	Situations particulières	Principales mesures de maîtrises /autres commentaires
Intoxications aiguës à H ₂ S 	Bassin digesteur, zones mortes où risque d'anaérobie Digesteur / gazomètre / sphère Local confiné	Fonctionnement / Maintenance Maintenance Dys-fonctionnement (fuite, non efficacité de la désulfuration) / maintenance (purges)	3 – L'exposition à l'H ₂ S peut être très rapidement mortelle.	3 – Des cas d'intoxications ont déjà été décrits dans le cas d'installations de méthanisation de boues urbaines (exposition dans un local confiné lié à des purges et exposition mortelle liée à une rupture de canalisation). Les concentrations possibles dans les biogaz bruts sont parfois très élevées au regard par exemple des VLEP (7500 mg/m ³ – VME = 7 mg/m ³). Jusqu'à présent, la plupart des STEP ne désulfure pas le biogaz produit (ATEE, Club Biogaz, 2011).	3 X 3 = 9 	+ 0,5 en cas de maintenance + 0,5 en milieu confiné - 1 si désulfuration (majoritairement pas le cas)	Règles de sécurités : détecteur gaz, H ₂ S, ventilation, formation Penser à vérifier l'efficacité du traitement de désulfuration
Anoxie liée au remplacement de l'O ₂ par d'autres gaz tel que le CO ₂ 	Local confiné	Dys-fonctionnement (fuite)	3 – L'anoxie peut conduire à la mort rapide.	2 – Concentrations en CO ₂ plus fortes qu'en H ₂ S (moyenne 35 % soit 350 000 ppm) mais rapport des « concentrations maximales relevées dans biogaz / VME » plus élevé pour l'H ₂ S (>1000) que pour le CO ₂ (70).	3 X 2 = 6 	+ 0,5 en milieu confiné	Détecteur 4 gaz
Intoxications à l'ammoniac 	Gestion des digestats, en particulier lorsqu'il y a compostage.	Fonctionnement	2 – L'ammoniac est un puissant irritant des voies respiratoires. Il peut aussi être mortel ou provoquer des effets irréversibles mais les seuils d'effets, notamment létaux, de l'ammoniac sont plus élevés que ceux de l'H ₂ S.	3 - La production d'ammoniac durant le compostage semble être une problématique bien réelle. Même si aucun résultat n'est disponible, à ce jour, pour le compostage de digestats de boues, des résultats le sont pour des procédés de compostage de boues urbaines non méthanisées. Les valeurs mesurées en ambiances de travail (ambiances de fermentation, cabines d'engins et prélèvements individuels) dépassent la VME (7 mg/m ³) (INRS, 2010). De plus, la méthanisation transforme l'azote en azote ammoniacal. Il est possible que des concentrations encore plus élevées d'ammoniac soit engendrée par le compostage de digestats de boues que de boues non méthanisées.	2 x 3 = 6 	+ 0,5 en milieu confiné	Ventilation Média filtrants efficaces dans les cabines d'engins

Points critiques identifiés	Lieux / étapes	Phases	Niveaux d'enjeux (E)	Niveaux de retour d'expérience (R)	Résultats E X R	Situations particulières	Principales mesures de maîtrises /autres commentaires
Intoxications chroniques à des substances chimiques autres qu'H ₂ S et NH ₃ par inhalation de biogaz 	Local confiné	Dys-fonctionnement (fuite) Maintenance (ex : purges)	3 – Les pathologies liées à des expositions chroniques à des substances en question (notamment CMR) peuvent être graves (cancers) et entraîner la mort.	1 – Les concentrations déjà mesurées dans les biogaz sont inférieures aux VLEP. Un opérateur ne sera de plus, jamais exposé à une atmosphère composée de 100 % de biogaz et de manière chronique. L'exposition au biogaz est donc probablement très faible même si elle peut <i>a priori</i> arriver de manière répétée lors par exemple des opérations de purges.	3 x 1 = 3 	- 0,5 si utilisation de filtre à charbon actif ou tour de lavage permettant d'éliminer les COV en plus de l'H ₂ S	Peu de résultats disponibles. il serait pertinent de réévaluer les conclusions à mesurer de l'obtention de nouveaux résultats
Intoxications par ingestion / inhalation de poussières aérosolisées 	Gestion des digestats, épandage	Fonctionnement Maintenance (ex : lavage)	3 – idem ci-dessus	1 – Même avec l'exemple d'un scénario semble-t-il très majorant, il semble peu probable que les valeurs toxicologiques de référence soient dépassées. Les seuils de la norme NFU 44-095 permettent <i>a priori</i> d'être sécuritaire pour les polluants concernés.	3 x 1 = 3 	+ 0,5 si compostage des boues digérées (aérosolisation plus importante)	Idem ci-dessus Règles de sécurité (ex : engins équipés de filtres à poussières ; masques) et d'hygiène.

Points critiques identifiés	Lieux / étapes	Phases	Niveaux d'enjeux (E)	Niveaux de retour d'expérience (R)	Résultats E X R	Situations particulières	Principales mesures de maîtrises /autres commentaires
Risque microbiologique (infection, allergie, inflammation) 	Gestion des effluents boues/eaux avant méthanisation Gestion des digestats	Fonctionnement / Maintenance (lavages)	2 - Des pathologies de gravités différentes peuvent survenir, cependant les majeures sont sans doute des pathologies courtes et traitables (ex : diarrhées). Des allergies, inflammations des voies respiratoires peuvent aussi survenir (notamment liées à l'exposition à des bioaérosols).	2 – Même si limitées et parfois contradictoires, des études épidémiologiques ont apporté des preuves de liens entre exposition des travailleurs de STEP et des infections, symptômes d'irritations et d'allergies (ADEME <i>et al</i> , 2007). Les agents en cause étaient des endotoxines, parasites, virus et champignons. Peu d'études se sont intéressées à l'exposition <i>via</i> les boues. Certaines n'ont détecté aucun effet significatif, d'autres ont rapporté des infections virales et symptômes gastro-intestinaux (ADEME <i>et al</i> , 2007). Aucune étude n'évoque des boues après méthanisation. A noter qu'en 2010, deux hépatites virales ont été reconnues MP chez des salariés du secteur « autres services d'assainissements » (CNAMTS, 2010).	2 x 2 = 4 	- 0,5 pour les digestats par rapport aux substrats (réduction des pathogènes) - 0,5 si hygiénisation des entrants / hygiénisation post-méthanisation ou digestion thermophile + 1 lors du compostage (aérosolisation accentuée – apparition de flore thermophile – études épidémiologiques montrant l'association entre troubles et exposition à des bioaérosols des professionnels de plateforme de compostage – ORS, 2010)	Vêtements, dispositifs de protection ; bonnes pratiques d'hygiène. Seuils de la norme NFU 44-095
	Exposition au biogaz Exposition aux condensats des canalisations	Dys-fonctionnement Maintenance	2 – idem précédent. Cependant la flore du digestat n'est pas représentative de celle du biogaz – peu d'éléments sur celle-ci.	0 – Les concentrations dans les biogaz semblent relativement faibles et de l'ordre de la contamination de l'air ambiant. Très peu d'études ont néanmoins été conduites. D'après l'état actuel des connaissances, les opérateurs ne devraient pas être exposés à des doses importantes pouvant engendrer des pathologies.	2 x 0 = 0	+ 0,5 si utilisation d'eau contaminée pour la désulfuration par lavage (Vinerras, 2007). + 0,5 si présence identifiée / possible de bactérie <i>Legionella</i> pathogène par inhalation	Très peu de résultats disponibles. A réévaluer à mesures de l'obtention de nouveaux résultats

Points critiques identifiés	Lieux / étapes	Phases	Niveaux d'enjeux (E)	Niveaux de retour d'expérience (R)	Résultats E X R	Situations particulières	Principales mesures de maîtrises /autres commentaires
TMS  Risques liés aux postures, vibrations, port de charges notamment	Utilisation d'engins pour la gestion des digestats (compostage, transport extérieur du site)	Fonctionnement	1 – Ces troubles même s'ils peuvent être très perturbants au quotidien sont cependant considérés comme de faible gravité.	2 – Les TMS sont les maladies professionnelles les plus fréquentes des salariés du secteur « autres services d'assainissements » (36 sur 40 déclarées en 2010). Les MP sont toutefois moins nombreuses que les AT (40 MP contre 999 AT en 2010) (CNAMTS, 2010).	1 x 2 = 2 		Amélioration du confort des appareils, Règles à respecter
Bruits 	Local des appareils assurant la recirculation du biogaz dans les digesteurs Utilisation de véhicules pour gestion des digestats Local de valorisation du biogaz (chaudière / moteur)	Fonctionnement	1 – Même si les impacts sur la santé liés au bruit sont souvent sous-estimés, on peut cependant considérer qu'ils sont généralement de faible gravité	2 – Aucune donnée disponible mais les moteurs (camions, circulation digestats) engendrent automatiquement du bruit, celui-ci n'étant cependant, pas forcément nuisible, d'autant plus si les règles constructeurs sont respectées. 3 – Dans les locaux de valorisation, les niveaux déjà enregistrés (cas d'une autre filière) sont élevés (95 à 110 dB(A)) <i>A noter qu'en 2010, 1 cas de surdité a été reconnu MP chez 1 salarié du secteur « autres services d'assainissements » (CNAMTS, 2010).</i>	1 x 2 = 2 Ou 1 x 3 = 3 	+ 0,5 exportation des digestats hors site	Règles : isolation phonique du local de cogénération, port de casques, cabines engins fermées, isolées
Odeurs 	Gestion des boues avant méthanisation Compostage Stockage/épandage des digestats non compostés* * Le compostage correspond à une stabilisation (plus de fermentation donc plus d'odeurs a priori émises)	Fonctionnement	1 – Les odeurs même si elles peuvent être incommodantes sont considérées comme des nuisances de faible gravité. <i>A noter, qu'en particulier, pour des riverains, les nuisances olfactives peuvent avoir des conséquences psychologiques non négligeables.</i>	3 - La plupart des matières traitées en méthanisation émettent par nature des composés malodorants (dégradation de la matière organique). En STEP, les composés soufrés seraient responsables de 80 à 90 % des odeurs (Debrieu, 2004). Le biogaz quant à lui, en système clos, n'engendre pas en fonctionnement normal de nuisances olfactives. (en cas de dysfonctionnement d'autres points critiques que les odeurs sont nous semble-t-il à privilégier donc non retenu comme critique vis-à-vis des odeurs)	1 x 3 = 3 	- 1 pour les digestats par rapport aux substrats : la méthanisation réduit les odeurs + 1 lors du compostage (émission d'ammoniac)	

Bibliographie citée dans cette synthèse

- ADEME. 2011. Qualité agronomique et sanitaire des digestats. Etude réalisée par RITMO. 250 p.
- ADEME. 2005. Impacts environnementaux de la gestion biologique des déchets. Bilan des connaissances. 331 p.
- ADEME, SYPREA, Les Entreprises de l'Eau, INERIS. 2007. Evaluation des risques sanitaires des filières d'épandage des boues des stations d'épurations. Base scientifique de l'évaluation des risques sanitaires liés aux agents pathogènes. 172 p.
- AFSSET. 2008. Risques sanitaires du biogaz : Evaluation des risques sanitaires liés à l'injection de biogaz dans le réseau de gaz naturel, Rapport d'expertise collective « Groupe de travail Biogaz », Saisine Afsset n°« 2006/010 », 174 p.
- ATEE, Club Biogaz. 2011. État des lieux de la filière méthanisation en France, 61 p.
- COUTURIER C. 2002. Effets de la digestion anaérobie sur les micropolluants et germes pathogènes. SOLAGRO. 5 p
- COUTURIER C., GALTIER L.; POUECH P., BRUGERE H. ; MARACHE L., KAEMMERER M. 2000. Etat des connaissances sur le devenir des germes pathogènes et des micropolluants au cours de la méthanisation des déchets et sous-produits organiques, rapport ADEME n° 98-93-024, 100 p.
- DEBRIEU C. 2004. Lutte contre les odeurs de l'assainissement. Document technique FNDAE n°13. En ligne http://www.fndae.fr/documentation/PDF/fndae13_v2.pdf 69 p.
- GOYER N., LAVOIE J., LAZURE L., MARCHAND G. 2001. Les bioaérosols en milieu de travail : guide d'évaluation, de contrôle et de prévention. Etudes et Recherches. Guide technique. IRSST. 72 p.
- HAHN H., HOFFSTEDE U. 2010. Final assessment report on residual materials. Projet BIOGASMAX. 251 p.
- INERIS. 2002. Caractérisation des biogaz: Bibliographie, Mesures sur site, 31 p.
- INERIS. 2006. Etude comparative des dangers et des risques liés au biogaz et au gaz naturel, rapport N° 46032, 34 pages.
- INERIS. 2008. Etude des risques liés à l'utilisation des méthaniseurs agricoles, Rapport d'étude n° DRA-07-88414-10586B réalisé pour le Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables, 91 p
- INERIS. 2009. Risques sanitaires liés à l'injection de biogaz issu de boues de STEP dans un réseau de gaz naturel – travaux préliminaires. 23 p.
- INERIS. 2012. Retour d'expérience relatif aux procédés de méthanisation et à leurs exploitations. EAT DRA DRC- 93 - Opération A. 148 p.
- INRS, 2011. Endotoxines en milieu de travail. II. Exposition, risques, prévention. Dossier médico-technique. 19 p.
- INRS. 2012. a) Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France. ED 984. Aide-mémoire Technique. 32 p
- INRS, 2010. Approche des risques chimiques et microbiologiques dans le secteur du compostage. Hygiène et sécurité du travail. ND 2336 – 221. 14 p.
- MOLETTA M. 2006. Caractérisation de la diversité microbienne aéroportée des biogaz. Déchets-revue francophone d'écologie industrielle – cahier spécial du n° 44. pp 18-20.

MOLETTA-DENAT M., BRU-ADAN V., DELGENES JP., HAMLIN J., WERY N., GODON JJ. 2010. Selective microbial aerosolization in biogas demonstrated by quantitative PCR. *Bioresource Technology*. Vol 101. pp 7252-7257.

MOLETTA M. WERY N., DELGENES JP., GODON JJ. 2008. *Water Science & Technology*. Vol 57, n°4. pp 595-599.

OHANNESSIAN A. 2008. Composés Organiques Volatils du Silicium : Un frein à la valorisation énergétique des biogaz – « *Génèse et mécanismes de formations* ». *Thèse INSA de Lyon*. 305 p.

ORS (Observatoire Régional de la Santé – Rhône-Alpes). 2010. L'évaluation des effets sanitaires liés à la gestion des déchets ménagers et assimilés (DMA). Rapport scientifique. 184 p.

RASI. 2009. Biogas composition and upgrading to biomethane. Academic dissertation. Université de Jyväskylä. 79 p.

RASI S. VEIJANEN A., RINTALA J. 2007. Trace compounds of biogas from different biogas production plants. *Energy*, n° 32. pp 1375–1380

RECORD. 2009. Freins et développements de la filière biogaz : les besoins en recherche et développement, étude n°07-0418/1A 134 pages. Disponible en ligne sur le site www.record-net.org

SOLAGRO. 2001. La digestion anaérobie des boues urbaines. Etat des lieux, état de l'art. 36 p.

VINNERAS B. NORDIN A. 2007. Microbiological community in biogas systems and evaluation of microbial risks from gas usage. *Energie - wasser-praxis* 12/2007 – DVGW Jahresrevue. pp 50-53.

Sites internet, bases de données :

Base de données EPICEA de l'INRS. <http://www.inrs.fr/accueil/produits/bdd/epicea.html> ; consulté le 02/10/2012.

Base de données ARIA du BARPI <http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/> ; consulté le 02/10/2012.

INRS, 2012, b) article « Electricité » <http://www.inrs.fr/accueil/risques/phenomene-physique/electricite.html> ; consulté le 08/10/2012.

INRS, 2012, c) article « Assainissement et traitement des eaux usées » <http://www.inrs.fr/accueil/secteurs/environnement/assainissement-eau.html> ; consulté le 18/12/2012.

CNAMTS, 2010. Statistiques par numéro de risque ou par code APE-NAF. <http://www.risquesprofessionnels.ameli.fr/chiffres-cles-et-statistiques/nos-statistiques.html> ; consulté le 18/12/2012.

Filières méthanisation des ordures ménagères

Description de la filière de méthanisation des ordures ménagères en France (sources : ATEE, Club Biogaz, 2011 ; AMORCE et ADEME, 2011)

Préambule : La méthanisation des déchets ménagers se déroule dans des installations de traitement des biodéchets collectés sélectivement ou, dans des installations où les ordures ménagères résiduelles (OMR²⁸) collectées en mélange sont préalablement triées, notamment dans les installations de traitement mécano-biologique (TMB). C'est la fraction fermentescible des ordures ménagères (FFOM) qui peut être méthanisée (matières organiques)

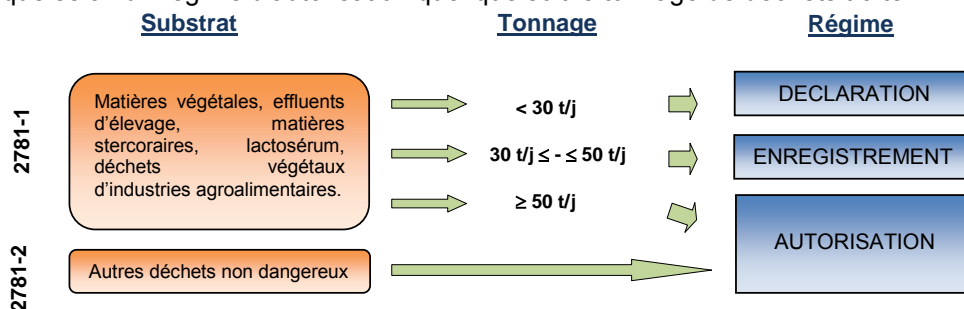
A noter : les informations sur cette filière fournie par le Club Biogaz (2011) proviennent de l'étude AMORCE et ADEME (2011).

Nombre d'installations	9 en service en 2011. 2 en construction d'après le Club biogaz (2011) ; 7 en construction d'après AMORCE et ADEME (2011)
Traitement des intrants	Aucune information n'est synthétisée dans le rapport du Club Biogaz (2011). D'après les schémas des installations fournis dans le rapport AMORCE et ADEME (2011), des systèmes de broyages, criblages, des trommels, malaxeurs sont employés en amont de la méthanisation. Dans certains cas, un pré-compostage ou une pré-fermentation dans des bioréacteurs est aussi mis en œuvre.
Technologie du digesteur	S'agissant des technologies des digesteurs elles ne sont décrites dans aucun des deux rapports cités. Les plages de température de digestion sont cependant mentionnées : <ul style="list-style-type: none"> - 6 installations utilisent la digestion thermophile et, - 3 la digestion mésophile. ainsi que les noms commerciaux des procédés , soit : <ul style="list-style-type: none"> - 3 installations utilisent le process VALORGA (mésophile, de type piston vertical, agitation par injection de biogaz) (http://www.valorgainternational.fr/fr/mpg3-128079--LE-PROCEDE-DE-METHANISATION-VALORGA.html ; consulté le 15 février 2013), - 1 utilise le process VALORGA par voie sèche (thermophile), - 4 utilisent le process KOMPOGAS (thermophile, piston horizontal, voie sèche, agitation mécanique) (http://www.axpo-kompogas.ch/index.php?path=wissen/kompogas-technologie/kompogas-verfahren&lang=fr ; consulté le 15 février 2013), - 1 utilise le process LINDE (thermophile, piston horizontal, voie sèche, agitation mécanique) (Damien, 2008)
Traitement du biogaz	5 installations procèdent à une déshydratation. 3 procèdent à une désulfuration par injection de sulfure ferrique. 3 procèdent à une désulfuration et élimination du CO ₂ dont 2 par filtre à charbon et 1 par tour de lavage.
Traitement du digestat	L'ensemble des installations produit du compost à partir du digestat.
Stockage du biogaz	Aucune information n'est détaillée.
Composition du biogaz	50 à 60 % de méthane (moyenne proche de 55 %).
Valorisation	8 valorisent le biogaz par cogénération. 1 produit du biométhane.

²⁸ Les ordures ménagères résiduelles correspondent à la fraction des déchets des ménages qui reste après la collecte séparées des déchets recyclables (emballage, verre, déchets d'équipements électriques et électroniques, ...) (INERIS, 2012 b).

Principaux textes / dispositifs réglementaires

Règlementation ICPE – la sous- rubrique **2781-2** propre à la méthanisation des autres déchets non dangereux (autres que les matières végétales, effluents d'élevages, matières stercoraires,) s'applique selon un régime d'autorisation quel que soit le tonnage de déchets traité.



Concernant la combustion du biogaz, la rubrique **2910 B** peut aussi s'appliquer (si la puissance thermique maximale est supérieure à 0,1 MW) sous le régime de l'autorisation.

Le stockage du biogaz est régi par la rubrique **1411** et soumis à déclaration ou autorisation selon les quantités.

Par ailleurs, s'agissant des digestats compostés dans cette filière, la rubrique **2780** « Installations de traitement aérobie (compostage ou stabilisation biologique), de déchets non dangereux ou matière végétale brute, ayant le cas échéant subi une étape de méthanisation" s'applique.

A noter que d'autres rubriques ICPE pourraient être applicables selon les machines utilisées pour le prétraitement des matières entrantes notamment.

Le digestat produit peut être valorisé en agriculture pour sa valeur fertilisante. Pour rentrer dans une logique produit, il doit être composté et peut ainsi être homologué ou répondre à la **norme NF U 44-051**²⁹ définissant des seuils pour des microorganismes pathogènes, métaux, HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques) et PCB (Polychlorobiphényles).

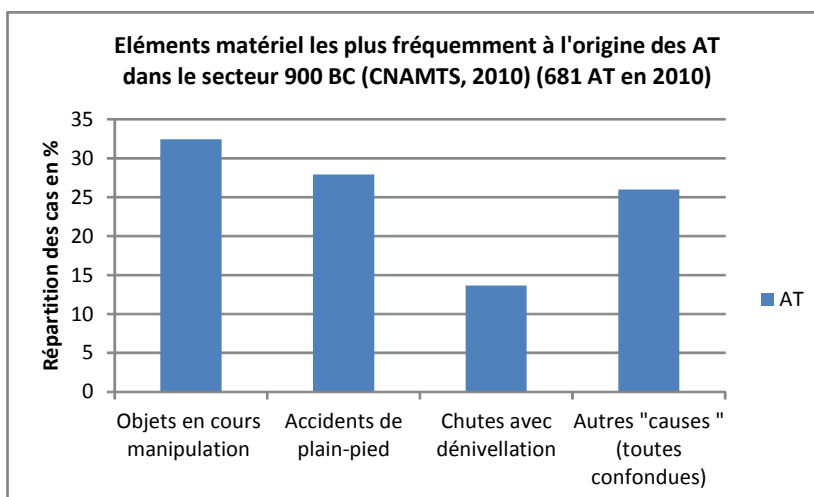
Concernant la santé des salariés des filières de traitements des ordures ménagères, elle relève du régime général et est donc suivie par la Caisse Nationale de l'Assurance Maladie des Travailleurs Salariés (CNAMTS). Celle-ci coordonne les organismes du réseau des branches maladie et accidents du travail - maladies professionnelles, soit les caisses primaires d'assurance maladie (CPAM) et caisses d'assurance retraite et de la santé au travail (CARSAT, ex CRAM). La CNAMTS élabore des statistiques par secteur d'activité ou code CTN. Elle dispose notamment de données pour le secteur « entreprises de traitement des ordures ménagères et des déchets industriels et commerciaux banals – 900 BC » incluant probablement les installations de méthanisation des ordures ménagères.

Données sur les ATMP (Accidents du Travail – Maladies Professionnelles) des salariés du secteur 900 BC (source : CNAMTS, 2010).

Parmi les données disponibles à ce jour, la production de biogaz n'est jamais mentionnée.

En 2010, 681 accidents du travail ont été recensés chez les salariés du secteur « entreprises de traitement des ordures ménagères et des déchets industriels et commerciaux banals – 900 BC» (sur 8 287 salariés).

Les principales causes sont : des objets en cours de manipulation (221 cas), des accidents de plain-pied (190 cas) et des chutes avec dénivellation (93 cas).



²⁹ A noter qu'une autre norme est disponible : NFU 44-095 applicable aux composés à base de boues.

Douleurs / lumbagos, contusions, plaies et entorses sont les types de lésions les plus fréquemment rencontrés (dans plus de 10 % des AT).

En 2010, 47 maladies professionnelles ont aussi été recensées chez les salariés du secteur 900BC. Il s'agit toutes de troubles musculo-squelettiques (TMS) dont 45 affections périarticulaires et 2 affections du rachis lombaire liées aux vibrations.

Données sur les accidents / incidents recensés dans la filière de méthanisation des ordures ménagères

Données issues d'un retour d'expérience mené par l'INERIS (2012 a) :

L'INERIS a mené, en 2011 et 2012, une analyse sur l'accidentologie en France et en Allemagne des procédés de méthanisation, et de leurs exploitations. Ce retour d'expérience a mis en évidence la difficulté à recueillir des informations sur les incidents et accidents dans les deux pays.

Il apparaît cependant que certaines unités fonctionnelles (centrales de cogénération, systèmes d'injection des solides, pompes, tuyaux, vannes et agitateurs) sont particulièrement vulnérables entraînant des défaillances en termes de sécurité telles que des fuites ou la perte de confinement. Ces conclusions se rapportent à l'ensemble des filières de production de biogaz.

Aucun détail n'est fourni pour le secteur de la méthanisation des ordures ménagères.

A titre d'information, sur 33 accidents survenus en Allemagne de 2005 à 2011 dans des installations de méthanisation (*a priori* principalement du secteur agricole mais non clairement précisé) et décrits par l'INERIS (2012 a), les sinistres recensés sont des incendies (23 cas), des déflagrations (5 cas), des déflagrations et incendies (3 cas), 1 éclatement de fermenteur et un rejet prolongé d'H₂S.

Par ailleurs, le SIAAP et un autre industriel, exploitants de stations d'épuration, ont aussi fourni à l'INERIS, des retours d'expérience relative à l'accidentologie liée à la méthanisation des boues.

Les causes des incidents répertoriés sont, pour le premier :

- la corrosion / déboitement de tuyauterie (5 cas),
- la rupture de canalisations enterrées lors de terrassement (2 cas),
- l'impact de la foudre (2 cas),
- le défaut du stockage du biogaz, entrée d'air et fuite (3 cas) : 1 délutage et 2 entrée air.

Le second recueil mentionne 12 événements recensés en 2011 dont 11 ayant conduit à l'émission de biogaz, dû à :

- des fuites en différents points, à savoir, au niveau :
 - o d'une bride d'une vanne manuelle en amont de la torchère,
 - o de gardes hydrauliques des filtres à l'aspiration des compresseurs,
 - o d'un raccord de tête de manomètre,
 - o d'une torchère à l'arrêt,
 - o d'un raccord fileté,
 - o d'une canne de brassage de digesteur,
- l'ouverture des soupapes de sécurité des digesteurs. Cinq événements sont décrits dont :
 - o un suite à une fuite d'air comprimé pilotant les vannes de sécurité du réseau biogaz (et donc montée en pression des digesteurs),
 - o un suite à des problèmes de pression d'air pilotant les vannes de sécurité du réseau biogaz,
 - o un suite au déclenchement accidentel de l'arrêt d'urgence de l'automate de sécurité ayant aussi conduit à la montée en pression des digesteurs,
 - o un suite à une chute de pression des dômes des digesteurs détectée par des sondes, déconnexion de la mauvaise sonde par le personnel et donc mise en sécurité de l'installation par l'automate d'où ensuite montée en pression des digesteurs et ouvertures des soupapes,
 - o des pannes répétées d'un automate de sécurité entraînant le dégazage aux soupapes.

Il est également mentionné une détérioration de l'isolant réfractaire de la torchère.

A noter qu'au cours de ces événements, aucune victime ou blessé n'a été à déplorer. Des réparations et mesures de prévention ont été mises en place par l'exploitant. Les fuites sont en général repérées lors des visites, ronde de routine ou opérations de maintenance.

Par ailleurs l'INERIS (2006, 2012 a) évoque les incidents suivants :

- débordement du méthaniseur (estimation de 3 à 4 cas en Allemagne par an),
- gel des soupapes du méthaniseur (recensés plusieurs fois sans précision du nombre), celles-ci n'étant donc plus en état de fonctionner,
- envol de la membrane souple d'un méthaniseur industriel (1 cas) : libération du biogaz stocké,
- suppression à l'intérieur du méthaniseur (1 cas en Allemagne, 1 cas en Espagne). Dans un cas, l'accumulation de matières plastiques a engendré la formation d'une couche étanche à la surface de la phase liquide ; la digestion s'est poursuivie sous celle-ci, ayant conduit à l'éclatement du méthaniseur,

Suite à ce retour d'expérience, les principaux phénomènes dangereux des filières de méthanisation (toutes confondues semble-t-il) à considérer ont été classés par l'INERIS (2012 a), par ordre de priorité en terme de probabilité d'occurrence :

- les incendies,
- les explosions,
- l'émission imprévue de toxiques gazeux (H₂S) dans des zones confinées mal ventilées (avec risque d'intoxication humaine).

A noter que concernant la filière méthanisation des ordures ménagères, la voie utilisée est principalement la voie sèche. Celle-ci induit en général une alimentation semi-continue, voire discontinue ce qui nécessite probablement de précautions supplémentaires lors du chargements / déchargements pour éviter une explosion/inflammation d'une éventuelle atmosphère explosive (ATEX).

Autres bases de données

La base EPICEA³⁰ de l'INRS décrit, à ce jour, pour le secteur 900 BC, 12 accidents dont 5 sont liés à des machines : convoyeurs, malaxeur ou presse (à balles) des déchets en particulier lors de maintenance (3 cas). Un autre accident est lié à un renversement d'une personne par un chariot de manutention et enfin deux accidents sont intervenus aux niveaux de quai de vidage de déchets. (Pour en savoir plus, se reporter aux n° de dossiers suivants de la base EPICEA : 22702 / 22433/ 22232 / 050708 / 18794 / 17536 / 16962 / 16446).




Aucun accident / incident n'est rapporté lié à la méthanisation proprement dite.

Depuis 2006, 4 accidents mentionnant le terme biogaz ou méthanisation sont recensés à ce jour, dans la base de données ARIA du BARPI concernant des installations de traitement et élimination des déchets non dangereux. Les résumés sont présentés ci-dessous.


Il s'agit de :


- deux incendies déclarés au niveau d'équipements : 1 sur le sécheur à tapis du digestat (cause inconnue) et 1 sur un convoyeur de déchets (origine électrique suspectée),
- 1 cas de pollution du milieu naturel liée à des rejets de la phase liquide du digestat (malveillance suspectée),
- 1 cas d'explosion de digesteurs dans une installation en cours de mise en service.


Mot-clé : biogaz

     **N°38944 - 13/09/2010 - FRANCE - 34 - MONTPELLIER**
E38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux
Vers 11h45, un incendie se déclare dans le local presses et centrifugeuses d'une importante unité de méthanisation de déchets ménagers. Craignant un risque d'explosion de méthane en zone industrielle, une cinquantaine de pompiers interviennent et maîtrisent le sinistre vers 12h45. Le local est détruit mais les autres installations de l'unité ne sont pas touchées et aucune victime n'est à déplorer. Le feu serait d'origine électrique et aurait pris au niveau d'un convoyeur de déchets.

³⁰ EPICEA est une base de données nationale gérée par l'INRS (Institut Nationale de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles) rassemblant plus de 18 000 cas d'accidents du travail survenus, depuis 1990, à des salariés du régime général de la Sécurité sociale. Ces accidents sont mortels, graves ou significatifs pour la prévention.
<http://www.inrs.fr/accueil/produits/bdd/epicea.html> ; consulté le 02/10/2012


N°37842 - 23/01/2010 - FRANCE - 60 - PASSEL
E38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux
 A la suite des plaintes de 2 municipalités, l'inspection des installations classées constate une pollution du milieu naturel provenant d'un centre de traitement des déchets organiques installé depuis mai 2009. Des effluents visqueux et boueux, de couleur noirâtre et d'odeur ammoniacquée, sont visibles sur 600 m dans le fossé de la RD 1032, sur 2 km dans le contre-fossé du canal de l'OISE jusqu'à la DIVETTE ainsi qu'à la sortie de l'émissaire du réseau d'eaux pluviales communal de la zone d'activités et au niveau du regard d'eaux pluviales du centre de déchets. Ces effluents correspondraient à la fraction liquide du digestat issue des digesteurs en sortie de procédé de méthanisation. Selon l'exploitant, un acte de vandalisme durant le week-end serait à l'origine de la pollution. Le grillage près de la porte d'entrée est découpé et la vanne de la bache d'eau de process ouverte. Le contexte est tendu entre l'exploitant, les riverains et les municipalités ; une motion réclamant la fermeture du site a été votée le 15/01 invoquant des risques sanitaires.
 L'exploitant est mis en demeure de curer et nettoyer le réseau d'eaux pluviales, le fossé et le contre-fossé et de réaliser un diagnostic de pollution des milieux susceptibles d'avoir été impactés. Le rejet d'effluents dans le milieu naturel (via le réseau d'eaux pluviales) et l'insuffisance des dispositions préventives nécessaires dans la conception, l'aménagement et l'exploitation des installations sont relevés.


N°42076 - 22/04/2012 - FRANCE - 76 - FRESNOY-FOLNY
E38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux
 Un feu se déclare à 11h45 sur le sécheur à tapis de boues de digestat d'une unité de méthanisation de 800 m² sur un site de valorisation de déchets organiques (fermentescibles ménagers, déchets verts, boues de STEP et sous-produits agricoles). L'alerte a été donnée à 11h30 par des automobilistes circulant à proximité du site. Les flammes se propagent à 2 cuves de 8 et 4 m³ d'acide sulfurique à 95% (H₂SO₄) qui se déversent dans leur rétention, puis au bâtiment adjacent de 1 000 m² accueillant le biofiltre. Les pompiers, intervenant avec 55 hommes et 3 engins, ne relèvent pas de pollution atmosphérique et éteignent l'incendie en 1 h avec 5 lances à eau. Le service de l'électricité a coupé l'alimentation du site dès le début de l'intervention et l'unité de cogénération alimentée par le biogaz est arrêtée. Une partie des eaux d'extinction s'est mélangée avec de l'acide autour des bâtiments sinistrés, mais le reste est récupéré dans le bassin d'extinction de 5 000 m³ et réutilisé malgré l'acidité du mélange (pH = 1). L'exploitant pompe ces effluents puis les neutralise avec de la craie. En raison des risques d'infiltration des eaux d'extinction dans les sols autour des bâtiments et malgré leurs couvertures argileuses, l'Agence Régionale de Santé (ARS) demande aux exploitants de captage d'eau renforcer leurs contrôles de qualité de l'eau. La membrane de la cuve de maturation de 1300 m³, à proximité du bâtiment biofiltre, a été percée et du biogaz s'échappe à l'air libre : faute d'alimentation électrique, celui-ci ne peut plus être pompé pour être valorisé ou brûlé à la torchère. Au cours de l'intervention, un pompier a été légèrement blessé par des projections d'acide. Le bâtiment de méthanisation est détruit sur 500 m². Le maire, la gendarmerie et l'inspection des installations classées se rendent sur place. Des mesures de toxicité dans l'air faites sous le vent par une cellule risque technologique (CRT) ne relèvent pas de danger. Aucune mesure de chômage technique n'est envisagée pour les 30 employés car seule l'activité de fabrication d'engrais azotés est arrêtée pour plusieurs mois.
 La cause du sinistre n'est pas connue. Des travaux de maintenance avaient eu lieu la veille jusqu'à 19h30. Une ronde de surveillance le matin de l'accident n'avait relevé aucun dysfonctionnement. L'inspection demande l'évacuation des déchets (eaux d'extinction et boues de craie et d'acide) vers des filières spécialisées, la vidange progressive de la cuve de maturation produisant le biogaz, l'élimination de son digestat et une surveillance des nappes phréatiques autour du site au moyen des piézomètres existants. Plusieurs dépôts de feu sur les installations de stockage du biogaz s'étaient produits pendant les 10 jours précédents l'accident et le procédé de méthanisation souffrait régulièrement de dysfonctionnement depuis son démarrage 16 mois avant.


N°32040 - 21/01/2006 - ALLEMAGNE - 00 - GÖTTINGEN
E38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux
 Dans une usine de traitement de déchets, 2 cuves d'une installation de méthanisation en cours de mise en service se rompent ou explosent vers 5h30. L'installation a été conçue pour traiter 133 000 t de déchets par an, dont 86 000 t de déchets organiques, ce qui correspond à la production de 6 M m³ de biogaz par an. Après tri, les déchets organiques sont mélangés à de l'eau et stockés dans 3 fermenteurs en acier émaillé de 4 500 m³ chacun. Une partie du biogaz est utilisée pour produire de l'énergie et la chaleur récupérée sert au chauffage des fermenteurs et au séchage final du digestat. L'installation est partiellement mise en service : le 1er fermenteur est entièrement rempli de substrat et produit du biogaz, le 2ème est rempli de 2 500 m³ d'eau de pluie suite à un test d'étanchéité et le 3ème est vide car l'essai d'étanchéité n'était pas concluant.
 Vers 5h30, les 2 fermenteurs remplis se rompent, déversant leur contenu en une vague destructrice. Le fermenteur vide est soulevé de ses fondations et déplacé sur 10 m, les bâtiments proches (salle des machines) sont endommagés et 1 000 l d'hydrocarbures sont perdus dans l'accident suite à la rupture d'une cuve de stockage projetée à 600 m. Les dommages matériels sont évalués à 10 M euros. L'accident, qui pourrait résulter d'une défaillance technique (gel ?), n'a pas fait de victime. Un ruisseau gelé proche est pollué.
 D'importants moyens en hommes (115 pompiers...) et en matériels interviennent vers 6h15 pour protéger la population et la ressource en eau potable ; des concentrations en méthane jusqu'à 60% sont mesurées autour du fermenteur. L'évacuation des masses de boue prendra plusieurs jours. La remise en état des installations prendra plusieurs mois.

Aucun événement supplémentaire n'est identifié avec le mot-clé méthanisation.

Données sur les postes de travail de la filière méthanisation des ordures ménagères

A noter : des informations sur les postes de travail et le temps passé ont été recherchées dans le but, d'évaluer l'exposition des opérateurs.

Aucune information n'est disponible à notre connaissance concernant les postes liés à la méthanisation des ordures ménagères.

En 2013, des données devraient être disponibles suite à l'appel d'offre lancé par l'ADEME en 2011 concernant le suivi technique, économique, environnemental et social d'installations de méthanisation à la ferme, centralisées, industrielles et en station d'épuration. Nous ne savons pas si dans ce cadre, des données de suivi sont collectées dans des installations de méthanisation d'ordures ménagères.

A noter qu'un certain nombre d'opérations de tri des ordures ménagères doivent être effectuées avant la méthanisation (seule la fraction fermentescible est méthanisable), selon qu'elles sont issues de la collecte sélective (biodéchets des ménages) ou sont des ordures ménagères résiduelles (OMR) en mélange. Même si un certain nombre de ces opérations sont effectuées automatiquement au moyen de divers équipements, il est probable que des personnels (au moins de maintenance) soient en charge de ces opérations. Le rapport ORS (2010) évoque que le tri est en partie réalisé mécaniquement par détection optique ou par magnétisme et en partie manuellement, notamment pour retirer tous les produits non-recyclables.

Données sur la composition des substrats et digestats des filières de méthanisation des ordures ménagères ; effets de la digestion sur les micropolluants inorganiques, organiques et microorganismes pathogènes

Eléments traces métalliques (ETM) et micropolluants organiques

Comme déjà évoqué, les substrats pouvant être traités dans le cas de la filière de méthanisation des ordures ménagères sont de deux ordres :

- des déchets ou biodéchets des ménages issus de la collecte sélective,
- des ordures ménagères résiduelles qui nécessitent un tri en usine.

A notre connaissance aucune donnée spécifique à la composition en micropolluants de ces substrats n'est disponible. Peuvent être cependant indiqués les niveaux relevés dans les ordures ménagères (globales) en notant, qu'entre 1993 et 2007, la composition des ordures ménagères a peu changé d'après l'ADEME (2009). Les grandes catégories sont les déchets putrescibles (32,2 %), les papiers-cartons (21,5 %), le verre (12,7 %), les plastiques (11,2 %), les textiles (10,6 %, dont les textiles sanitaires), les métaux (3 %) et divers matériaux composites ou non classés (8,9 %).

Ainsi, en terme de composition en ETM, le rapport ADEME (2005) fournit des concentrations moyennes (issues de la 1^{ère} enquête MODECOM en 1993) en indiquant qu'elles ont diminué depuis (probablement en particulier lié à la collecté séparée des déchets d'équipements électriques et électroniques). Les niveaux sont indiqués dans le tableau ci-dessous.

Teneurs en ETM des ordures ménagères en France (ADEME, 2005, d'après 1^{ère} étude MODECOM en 1993).

ETM	As	B	Cd	Cr	Co	Cu	Mn	Hg	Mn	Ni	Se	Zn
Concentrations moyennes des ordures ménagères en mg/kg MS	4	14	4	162	119	1108	427	3	1	817	0	1060

Concernant les micropolluants organiques, ils peuvent être divers et dépendent aussi des déchets et de l'évolution de nos modes de consommation. L'étude RECORD (2012) présente par exemple une analyse et prospective des substances émergentes présentes dans les déchets (ex : nanoparticules, ...).

Le mode de collecte (sélective ou en mélange) induit toutefois probablement des différences en terme de teneurs en micropolluants dans les substrats. Même si aucune donnée n'est disponible sur les substrats, des données le sont sur des composts (obtenus après étape de méthanisation ou non).

En effet, d'après les données collectées par l'INERIS (2012 b), une différence significative existe entre les teneurs en ETM et molécules organiques des composts issus des deux modes de collecte (résultats obtenus pour des composts ayant au préalable subi une étape de méthanisation ou non). Ainsi les teneurs en ETM, mises à part celles de l'arsenic, sont plus faibles lorsque le compost est issu de la collecte sélective des déchets ménagers par rapport à ceux issus de la collecte en mélange et au tri en usine.

A l'inverse les teneurs en 3 substances HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques) disposant d'un seuil dans la norme NFU 44-051 sont statistiquement plus élevées dans les composts issus des déchets collectés sélectivement. Ceci pourrait être lié à l'incorporation plus importante de déchets verts et de cendres déposées avec ces derniers dans ce type de compost mais, cette hypothèse reste à vérifier (INERIS, 2012 b).

Les résultats pour les composts obtenus après une étape de méthanisation sont fournis ci-après. Aucun test statistique n'a été utilisé mais sur la base des moyennes des moyennes de chaque site, par type de site (CS ou TM), les mêmes tendances que pour tous les composts confondus sont observées :

- hormis pour l'arsenic et le sélénium, les concentrations en ETM sont plus élevées lorsque le tri des ordures ménagères se fait en usine,
- à l'inverse les concentrations en HAP sont plus élevées pour les digestats compostés issus de la collecte sélective des ordures ménagères.

A noter que tous ces résultats sont inférieurs aux seuils limites définis par la norme NFU 44-051.

Teneurs en ETM et HAP (en mg/kg MS) dans des composts de digestats obtenus après méthanisation et issus de la collecte sélective (sites CS) d'ordures ménagères ou de la collecte en mélange et tri mécanique en usine (sites TM).

	As		Cd		Cr	
Nb sites	3 sites CS	4 sites TM	3 sites CS	4 sites TM	3 sites CS	4 sites TM
Nb analyses	61	60	61	63	61	63
Moyennes	3,07 - 3,96	2,37 - 3,23	0,52 - 0,89	0,90 - 1,21	24,96 - 35,13	31,69 - 72,72
Médianes	2,60 - 3,95	2,73 - 3,55	0,50 - 0,80	0,84 - 1,10	23,35 - 34,00	31,57 - 66,70
Maximums	4,20 - 9,20	3,60 - 6,40	0,70 - 1,34	1,10 - 2,10	43,00 - 50,90	44,94 - 99,70
Moyennes des moyennes par type de sites	3,62	2,89	0,73	1,02	28,63	50,44

	Cu		Hg		Ni	
Nb sites	3 sites CS	4 sites TM	3 sites CS	4 sites TM	3 sites CS	4 sites TM
Nb analyses	61	63	61	63	61	63
Moyennes	57,14 - 189,33	80,11 - 264,60	0,13 - 0,51	0,50 - 0,76	16,29 - 21,87	15,07 - 40,10
Médianes	54,45 - 198,00	81,65 - 196,00	0,10 - 0,52	0,46 - 1,00	16,05 - 21,00	14,51 - 37,10
Maximums	94,80 - 200,00	116,83 - 558,00	0,20 - 0,70	1,00 - 1,85	23,60 - 51,50	18,04 - 53,00
Moyennes des moyennes par type de sites	107,03	155,25	0,28	0,63	18,58	28,08

	Pb		Se		Zn	
Nb sites	3 sites CS	4 sites TM	3 sites CS	4 sites TM	3 sites CS	4 sites TM
Nb analyses	61	63	61	63	61	63
Moyennes	63,68 - 87,03	97,29 - 136,25	1,53 - 3,03	0,56 - 3,05	239,33 - 398,50	291,44 - 502,60
Médianes	67,45 - 86,00	93,65 - 139,15	0,60 - 3,00	0,50 - 3,50	203,70 - 390,00	288,53 - 515,00
Maximums	89,30 - 169,90	121,90 - 170,76	3,10 - 5,00	0,70 - 3,50	420,00 - 536,90	282,57 - 567,00
Moyennes des moyennes par type de sites	77,11	109,96	2,12	1,66	305,26	383,04

	fluoranthène		benzo(b)fluoranthène		benzo(a)pyrène	
Nb sites	3 sites CS	4 sites TM	3 sites CS	4 sites TM	3 sites CS	4 sites TM
Nb analyses	61	55	61	55	61	55
Moyennes	0,26 - 0,76	0,24 - 0,54	0,09 - 0,33	0,07 - 0,15	0,07 - 0,25	0,07 - 0,13
Médianes	0,19 - 0,61	0,21 - 0,44	0,11 - 0,31	0,06 - 0,14	0,08 - 0,23	0,05 - 0,16
Maximums	0,48 - 3,17	0,45 - 0,93	0,14 - 1,44	0,10 - 0,24	0,11 - 0,97	0,11 - 0,29
Moyennes des moyennes par type de sites	0,57	0,37	0,24	0,11	0,19	0,11

Seuil de la norme NFU 44-095 :

As : 18 - Cd : 3 - Cr : 120 - Cu : 300 - Hg : 2 - Ni : 60 - Pb : 180 - Se : 12 - Zn : 600 mg/kg MS
Fluoranthène : 4 – benzo(b)fluoranthène : 2,5 – benzo(a)pyrène : 1,5 mg/kg MS

A noter que le rapport de l'INERIS (2012, b) évoque des différences selon les procédés de tri mis en œuvre en usine. Selon leurs performances, les qualités de compost atteintes seront différentes.

En Suisse des teneurs médianes en HAP totaux (*a priori* 16) et PCB totaux (*a priori* 7) de respectivement 4 207 et 31 µg/kg MS pour 13 digestats issus de digestion thermophile et de respectivement 2 314 et 10 µg/kg MS pour 3 digestats de digestion mésophile (déchets verts et de cuisine traités) ont été mesurées (OFEV, 2007). D'autres familles y ont été recherchées ; les teneurs sont variables :

- quelques ng de WHO TEQ³¹/ kg MS pour les DL –PCB, et de I-TEQ⁵ pour les PCDD/PCDF (médiane de 5 digestats),
- de 0,3 à 13,8 µg/kg MS par composé BDE (médiane de 5 digestats),
- 82 µg/kg MS de produits phytosanitaires (médiane de 7 digestats),
- jusque 1140 µg/kg MS de DEHP (moyenne de 2 digestats).

Il peut aussi être noté que, de façon générale, d'après Couturier *et al.* (2000) :

- les micropolluants inorganiques ne sont pas dégradés par les process de fermentation anaérobie : ils se trouvent concentrés dans les digestats. Leur spéciation (et donc leur biodisponibilité et toxicité) peut toutefois évoluer au cours des process mais reste peu documentée,

³¹ les WHO-TEQ et I-TEQ sont des unités d'équivalents toxiques définis par l'OMS

- les composés organiques quant à eux vont pouvoir être dégradés par les process en composés en général moins toxiques mais peuvent également être à l'origine de composés ayant des effets néfastes (H₂S notamment). Les auteurs ont résumé les éléments suivants concernant le devenir en méthanisation des micropolluants organiques :
 - dégradabilité des composés organiques aliphatiques et des composés organiques monoaromatiques par voies biologiques et chimiques,
 - dégradabilité potentielle de certains composés organiques poly-aromatiques par voie biologique (déhalogénéation réductrice) ou par voie chimique,
 - faible dégradabilité de certains composés halogénés comme les PCBs et Dioxines et formation par voie biologique de composés en partie déshalogénés de toxicité différente des produits initiaux.
 - formation de sous-produits instables aux effets probablement mutagènes et anti-thyroïdiens différents des effets mutagènes des molécules mères (molécules stables). En sortie de digesteur, il apparaît i) une concentration très faible des micro-polluants organiques dans la phase liquide malgré la présence possible de composés polyaromatiques adsorbés à de la matière dissoute, ii) des composés organiques poly-aromatiques adsorbés à la surface des molécules organiques dans la phase solide, à une concentration voisine de de la concentration initiale en entrée de digesteur ou sous forme de sous-produits de dégradation.

Quelques travaux rapportés par l'ADEME (2011) ont effectivement démontré un potentiel de biodégradation des HAP, nonylphénols et PCB présents dans les boues urbaines lors de la méthanisation de celles-ci. Cependant le nombre de données est encore limité et les résultats parfois contradictoires. De façon générale, les teneurs en ces molécules dans les digestats semblent plus influencées par les teneurs initiales dans les boues que par le métabolisme, la température de méthanisation ou la biodisponibilité des molécules

A noter que l'influence des médicaments, en particulier des antibiotiques utilisés dans l'élevage, sur les processus de méthanisation et sur le digestat produit a été étudiée. Les quantités d'antibiotiques trouvées dans les lisiers ont été parfois suffisantes (à partir de 100 mg d'oxytétracycline) pour diminuer jusqu'à 40 % la production de méthane (Gans *et al.*, 2010 rapportés par ADEME, 2011).

Microorganismes présents dans les substrats (déchets)

L'étude RECORD (2003) fournit un tableau des principaux microorganismes pathogènes susceptibles de se retrouver dans les déchets (d'après Schwartzbrod *et al.*, 1998). Ces différents agents pathogènes (bactéries virus et parasites) ont pour origine les couches jetables, serviettes hygiéniques, mouchoirs, nourriture, papier.... Les déchets constituent un milieu favorable à la prolifération de certains microorganismes (bactéries et champignons). Les ordres de grandeur en bactéries viables peuvent varier de 4.10⁶ à 7.10⁸ UFC/g (RECORD, 2002). Après quelques semaines les genres bactériens principalement représentés sont *Bacillus*, *Citrobacter*, *Agrobacter*, *Enterobacter* et *Pseudomonas*. S'agissant des champignons, les genres *Aspergillus* et *Penicillium* sont les principaux. Les espèces de *Candida albicans* sont les levures majoritairement observées.

Principaux microorganismes susceptibles de se retrouver dans des déchets d'après Schwartzbrod *et al.* (1998) cité par RECORD (2003).

MICROORGANISMES (classés dans le Groupe 2 sauf ceux noté d'une *)		PATHOLOGIE	TEMPS DE SURVIE
Bactéries entériques (G-) <i>Salmonella sp</i> <i>Shigella sp</i> <i>Yersinia sp</i> <i>Campylobacter jejuni</i> <i>Escherichia coli</i> (souches pathogènes)		Salmonellose Dysenterie bacillaire Gastro-entérite Gastro-entérite Gastro-entérite	< 70 jours mais généralement < 20 jours
Virus Entériques Virus de l'Hépatite A et E [†] Rotavirus Entérovirus Poliovirus Coxsackievirus Astrovirus		Hépatite infectieuse Gastro-entérite Gastro-entérite Poliomyélite Infect respiratoire, Gastro-entérite Gastro-entérite	< 100 jours mais généralement < 20 jours dans le sol
Virus autres Virus des Hépatites B [†] , C [†] Virus de l'immunodéficience humaine acquise (HIV)*		Hépatite infectieuse SIDA	Dans le sang ou les liquides humains 8 jours qqs h à 24 h
Parasites Protozoaires <i>Cryptosporidium sp</i> <i>Giardia intestinalis</i> <i>Entamoeba histolytica</i> <i>Balantidium coli</i> <i>Toxoplasma gondii</i> Helminthes <i>Ascaris lumbricoï des</i> <i>Trichuris trichiura</i> <i>Toxocara sp</i> <i>Taenia sp</i>		Gastro-entérite Diarrhée Dysenterie Diarrhée et Dysenterie Toxoplasmose Troubles gastro-intestinaux Diarrhée, douleurs abdominales Diarrhée, douleurs abdominales Nervosité, Insomnie, Troubles digestifs, Anorexie	< 20 jours mais généralement < 10 jours Plusieurs mois

* microorganismes appartenant au Groupe 3 (arrêté du 18 juillet 1994)

A noter que d'après un médecin du travail du secteur des installations de stockage de déchets non dangereux (ISDND) (pouvant être assimilés aux ordures ménagères), les déchets pourraient aussi être propice à la présence de nuisibles (ex : rats) pouvant être vecteur de maladies telle que la leptospirose.

La composition en microorganismes est aussi probablement variable en fonction des déchets ménagers et de leur mode de collecte. Aucune donnée n'est à notre connaissance disponible concernant la composition en microorganismes de ces substrats.

Concernant les digestats avant le compostage, aucune donnée n'est disponible également. De façon générale, la digestion anaérobie est toutefois un procédé qui permet la réduction des concentrations en germes pathogènes, avec une efficacité beaucoup plus importante en conditions thermophiles qu'en conditions mésophiles (ADEME, 2011). La digestion mésophile avec un taux d'abattement en pathogènes de l'ordre de 80 % n'assure pas forcément une hygiénisation suffisante pour prévenir le développement ultérieur des microorganismes pathogènes lors du stockage. Une hygiénisation supplémentaire peut alors être apportée, si nécessaire, par un prétraitement ou un post traitement ad hoc (le compostage par exemple). Le stockage d'au minimum un mois des digestats liquides diminue aussi nettement les risques de présence de germes pathogènes. Les agents pathogènes les plus résistants sont les *Clostridium* et les *Bacillus cereus* qui peuvent résister à la digestion thermophile (espèces sporulantes) ainsi que les *Enterovirus* et les *Parvovirus* qui résistent à la digestion mésophile (Couturier, 2002).

Pour rappel les installations de méthanisation des ordures ménagères en France utilisent en majorité (6/9 en 2011) une digestion thermophile. Le digestat est ensuite composté.

D'après les 291 analyses de pathogènes (œufs d'helminthes viables dans 1,5 g et salmonelles dans 1 ou 25 g de matières brutes) collectées par l'INERIS (2012 b) sur les composts issus de la collecte sélective ou de la collecte en mélange puis le tri en usine (après une étape de méthanisation ou non), la présence de Salmonelles n'a été mise en évidence que dans un seul cas sur un compost issu de la collecte sélective de biodéchets. L'INERIS (2012 b) en conclue que l'hygiénisation des composts est bien obtenue dans tous les cas.

NB : Ces valeurs de micropolluants et microorganismes dans les substrats, digestats et compost sont fournies à titre indicatif mais ne sont :

- *ni représentatives de l'ensemble des matières entrantes et digestats,*
- *ni représentatives de l'exposition potentielle des opérateurs via ces matières. A noter que, dans le cas d'évaluations de risques sanitaires (à des substances chimiques ou microorganismes), les voies d'exposition étudiées sont l'ingestion, l'inhalation et le contact cutané.*

Cette dernière est souvent considérée comme négligeable au regard des autres voies (barrière cutanée), bien que certaines substances (ex : toluène) sont reconnues avoir une pénétration cutanée pouvant être importante. Cependant, moins de valeurs toxicologiques de référence sont disponibles pour cette voie et, en santé du travail, les valeurs limites ne concernent que la voie inhalation. De plus, dans les filières de méthanisation, la majorité des opérations est effectuée aux moyens de matériels ; les opérateurs n'entrent donc pas en contact direct avec les matières et, si cela devait être le cas, des moyens de protections (gants) peuvent être employés.

Concernant l'ingestion, s'agissant de travailleurs, il est peu probable que les matières en question soient ingérées volontairement. Un portage main-bouche est envisageable mais a priori il y a peu de manipulations directes : un lavage des mains est en tous les cas indispensable. L'exposition peut aussi se faire par ingestion de poussières. A titre d'exemple, un groupe d'experts a évalué les risques liés aux microorganismes pathogènes présents dans les boues d'épuration et a notamment considéré un scénario d'exposition de l'agriculteur épandant les boues et travaillant son champ. Selon ce scénario, sur une journée de 8H de travail, l'agriculteur, dans son tracteur ouvert (scénario majorant) peut ingérer 216 mg de poussières/jour (ADEME et al., 2007).

Les travailleurs peuvent être exposés à des substances chimiques et microorganismes par inhalation. Une attention doit donc être portée aux dangers volatiles, aérosolisés ou adsorbés sur des particules inhalables, thoraciques ou alvéolaires³². Comme déjà indiqué, les valeurs limites d'exposition en santé du travail concernent cette voie inhalation.

Sur ces bases, il est donc possible de considérer qu'un opérateur d'une filière de méthanisation d'ordures ménagères peut être exposé à des dangers chimiques et microbiologiques, par inhalation ou ingestion de poussières, lors des étapes de gestion des matières (substrats et digestats).

³² En santé au travail, les fractions de particules devant être contrôlées sont majoritairement les fractions inhalables et dans certains cas, les fractions thoraciques ou alvéolaires (INRS, 2007).

Zoom sur les dangers « inhalables » issus des substrats et digestats

D'après l'ORS (2010), les filières de traitement des déchets où les déchets ménagers sont manipulés, de façon manuelle et/ou mécanique, exposent les travailleurs essentiellement à des poussières d'agents biologiques dispersés dans l'air (bioaérosols), et à des composés organiques volatils (COV) non microbiens, dans des environnements confinés.

Concernant les bioaérosols, plusieurs études de mesures de microorganismes au postes de travail sont rapportés dans le rapport ORS (2010) dont l'étude menée par l'INRS en France (2009). Les concentrations en bactéries ou en moisissures cultivables relevées au niveau de postes de travail de centres de tri étaient comprises entre 10^4 et 10^6 UFC/m³. La concentration en poussières variait suivant le point de prélèvement considéré entre 0,2 et 0,9 mg/m³.

Goyer *et al.* (2001) indiquent que les bioaérosols dominants pour le tri des déchets domestiques sont *Aspergillus*, *Penicillium*, Bactéries *Actynomyces*.

Les auteurs rapportent des niveaux de concentrations en bactéries totales, bactéries gram négatives, actinomycètes thermophiles, moisissures et endotoxines présentées dans le tableau ci-contre.

Aucune valeur limite

professionnelle n'est disponible en France pour les microorganismes et les endotoxines. Pour ces dernières des valeurs de 50 UE/m³ et 200 UE/m³ sont proposées respectivement en Allemagne et aux Pays-Bas (INRS, 2011).

Concentrations de bioaérosols mesurés dans des ambiances de travail (Goyer *et al.*, 2001).

		Extérieur	Tri déchets domestiques
bactéries totales	UFC/m ³	10 ²	10 ⁴
bactéries Gram négatives		10 ¹	10 ³
actinomycètes thermophiles		10 ²	10 ⁰
moisissures		10 ³	10 ⁴
endotoxines	UE/m ³	np	0-990*

np : non précisé ; * milieu de travail : traitement de déchets (détails non fournis)

L'étude de Nadal *et al.* (2009) sur un site espagnol de traitement de fractions organiques des ordures ménagères, collectées sélectivement (biodéchets) montrent que les teneurs en microorganismes sont les plus faibles au niveau de l'unité de méthanisation et à l'inverse sont plus élevées, au niveau de la cabine de tri des déchets, de la réception et des tunnels de compostage.

Concentrations médianes en paramètres microbiologiques (en UFC/m³) en différents points d'une usine de traitement de la fraction organique des ordures ménagères en Espagne (Nadal *et al.*, 2009).

	A	B	C	D	E	F
<i>Gram-negative bacteria</i>	1743 ^a	155 ^b	1 ^c	123 ^{ab}	26 ^c	13 ^c
<i>Total bacteria</i>	1463 ^a	2025 ^a	76 ^c	1663 ^{ab}	543 ^b	374 ^b
<i>Fungi-25 °C</i>	2294 ^a	598 ^a	69 ^c	592 ^{ac}	383 ^{ac}	605 ^{ac}
<i>A. fumigatus-25 °C</i>	60 ^{ab}	35 ^{ab}	<2 ^a	60 ^b	<2 ^a	<2 ^a
<i>Fungi-37 °C</i>	488 ^a	130 ^a	7 ^c	178 ^a	102 ^a	160 ^a
<i>A. fumigatus-37 °C</i>	5 ^{ab}	7 ^{ab}	<2 ^a	40 ^b	<2 ^{ab}	2 ^a

A : cabine de tri
 B : réception des déchets
 C : digestion anaérobie;
 D : tunnels de compostage;
 E ; F : points situés en extérieur du site

Pour chaque paramètre, les différents exposants a,b,c indiquent une différence significative à p <0,05.

Des **études épidémiologiques** ont par ailleurs été menées pour étudier les effets sanitaires chez les **salariés de la collecte et du tri des déchets ménagers**. D'après l'ORS (2010), un excès de symptômes respiratoires et gastro-intestinaux est régulièrement rapporté, ainsi que des irritations oculaires et cutanées. De plus des troubles musculo-squelettiques (TMS) sont aussi mentionnés.

Sur la base des données disponibles (8 études de synthèse publiées entre 1995 et 2009 et 7 articles d'intérêt publiés entre 2005 et 2010 (dont 1 seul concerne le tri et 6 concernent la collecte)), le groupe d'experts ayant élaboré le rapport ORS (2010) a attribué, selon la méthodologie mise en œuvre et explicitée dans le document, un niveau de preuve convaincant au lien entre l'exposition des travailleurs de la collecte et du tri et, i) d'une part l'apparition de troubles respiratoires aigus, et, ii) d'autre part, la survenue de troubles musculo-squelettiques.

Niveaux de preuves attribués, par les experts ayant élaboré le rapport ORS (2010), aux liens entre exposition des professionnels de la collecte et du tri des déchets ménagers et des effets sanitaires.

Collecte et tri	
Pathologies	Niveau de preuve Professionnels
Cancers	Pas de données
Troubles du développement fœtal	Pas de données
Malformations congénitales	Pas de données
Troubles de la reproduction	Pas de données
Troubles cardiaques	Pas de données
Troubles respiratoires aigus	Convaincant (années 1990 et 2000)
Troubles respiratoires chroniques	Conclusion impossible
Troubles gastro-intestinaux	Probable
Troubles musculo-squelettiques	Convaincant
Troubles dermatologiques	Conclusion impossible
Troubles oculaires	Conclusion impossible
Maladie infectieuse	Convaincant (étranger)

Concernant les données relatives aux symptômes respiratoires aigus des salariés de centres de tri, c'est l'abondance des bioaérosols qui a été mise en cause. A noter que les résultats sont issus d'études menées à l'étranger (Danemark, Pays-Bas et Royaume-Uni dont les pratiques de gestion ne sont pas précisées) dans les années 1993 à 1997. L'ORS (2010) précise que depuis ces années, des évolutions en France ont amélioré les conditions de travail.

Concernant les TMS, les opérateurs de tri manuel et de collecte des déchets seraient particulièrement exposés, pour les premiers, dû à des gestes rapides et répétitifs en position en général debout (et entraînant douleurs du dos, des épaules et lombaires) et, pour les seconds, dû principalement aux actions de tirer, pousser, pencher, soulever, porter des conteneurs, poubelles ou sacs. L'INRS en 2005 avait préconisé de porter une attention particulière aux postes de tri manuel des déchets.

S'agissant des troubles gastro-intestinaux, les experts ont attribué un niveau de preuve probable. Une seule étude concerne cependant spécifiquement les salariés du tri (étude au Royaume-Unis). Dans celle-ci, les problèmes gastriques semblent liés aux niveaux en $\beta(1,3)D$ -glucanes, présents dans les parois cellulaires de champignons et bactéries.

Quant au lien entre exposition des salariés de la collecte et du tri des déchets ménagers et l'apparition de troubles respiratoires chroniques, troubles dermatologiques et, troubles oculaires il a été impossible de conclure pour les experts.

A noter que l'ORS (2010) a estimé qu'un risque de contracter une maladie infectieuse suite à une blessure avec du matériel souillé chez les professionnels de la collecte et du tri des déchets existe. Cependant les cas rapportés concernent principalement des cas à l'étranger. Le risque est réel mais faible, d'autant plus qu'en France les déchets médicaux sont collectés dans un circuit à part.

Des **études épidémiologiques** ont aussi été réalisées dans des centres de **compostage**. Pour rappel, les digestats d'ordures ménagères sont en France actuellement tous compostés. Les polluants émis lors du compostage sont de deux ordres (ORS, 2010). Il s'agit :

- de substances chimiques. Divers gaz peuvent effectivement être émis et sont fonction des conditions d'aération, de l'étape de traitement et de la nature des déchets traités : principalement CO₂, N₂O, composés soufrés et ammoniac (cf. ci-après), et en moindre quantité, composés organiques volatils non méthaniques,
- de microorganismes dont i) des organismes pathogènes d'origine fécale présents dans les produits de départ en particulier les boues, ii) d'organismes allergisants ou pathogènes se développant durant le compostage : c'est surtout le cas des actinomycètes thermophiles et des champignons, et iii) de toxines et allergènes libérés par les agents constituants des bactéries (endotoxines) et les champignons parfois métabolites secondaires (mycotoxines).

Dans le rapport ORS (2010), il est fait mention de 9 études de synthèse portant sur les effets sanitaires du personnel des plateformes de compostage. Le groupe d'experts a jugé qu'un niveau de preuve convaincant peut être attribué au lien entre l'exposition à des bioaérosols de ces travailleurs et l'apparition de troubles respiratoires aigus. Concernant les troubles respiratoires chroniques, les données sont insuffisantes pour pouvoir conclure.

S'agissant des troubles dermatologiques gastro-intestinaux et oculaires, ils jugent possible l'association entre l'exposition des travailleurs et ces effets. Pour les autres pathologies étudiées (cancers, troubles du développement fœtal et autres symptômes divers), aucune donnée n'est disponible.

Concernant le compostage, la problématique de

Niveaux de preuves attribués, par les experts ayant élaboré le rapport ORS (2010), aux liens entre exposition des professionnels des centres de compostage et des effets sanitaires.

Pathologies	Niveau de preuve Professionnels
Cancers	Pas de données
Troubles du développement fœtal	Pas de données
Troubles respiratoires aigus	Convaincant
Troubles respiratoires chroniques	Conclusion impossible
Symptômes divers/subjectifs	Pas de données
Troubles dermatologiques	Possible
Troubles gastro-intestinaux	Possible
Troubles oculaires	Possible

l'émission **d'ammoniac (NH₃)** semble donc bien réelle. Des mesures ont été conduites en ambiance de travail d'usines de compostage de divers déchets dont une traitant un digestat d'ordures ménagères résiduelles (INRS, 2010). Pour ce site, sur 40 mesures de NH₃, 32 dépassaient la VME fixée à 7 mg/m³ avec des valeurs moyennes de près de 28 mg/m³ (cf. tableau ci-dessous). A noter que dans cette usine, les bâtiments étaient entièrement clos.

D'après l'INRS (2010), la conduite des engins (chargeuse sur pneus, mélangeuses, retourneur d'andain, ...) représentent environ 80 % du temps de travail des opérateurs des centres de compostage. Les cabines des engins sont équipées de filtres mais la plupart du temps inefficaces vis-à-vis de l'ammoniac.

Concentrations en ammoniac mesurées dans des centres de compostage de divers déchets (INRS, 2010).

Entreprise	Déchet principal	Ammoniac : concentration en ppm															
		Ambiance tous points				Ambiance fermentation				Cabines engins				Prélèvements individuels			
		n (n>VME)	Moy	Max	Écart type	n (n>VME)	Moy	Max	Écart type	n (n>VME)	Moy	Max	Écart type	n (n>VME)	Moy	Max	Écart type
A hiver	DV	3*	< 1	< 1													
A été	DV	3*	< 1	< 1													
B hiver	boues	3*	2,6	6,0													
B été	boues	3*	6,2	12,1													
C	boues	10 [10]	58,29	81,60	17,11	6 [6]	65,40	81,60	9,80	4 [2]	26,90	51,60	26,84	7 [3] cabine	22,44	48,60	19,74
D	bio-déchets	20	2,08	4,61	1,17	12	2,30	4,61	1,26	5	1,98	3,69	1,02				
E	DV + boues	26	3,55	7,54	2,60	18	5,06	7,54	1,55	4	0,63	0,77	0,10				
F	OMR	26	0,18	0,59	0,13	8	0,24	0,59	0,16	4	0,09	0,13	0,03				
G	OMR	28	0,06	0,11	0,01	19	0,06	0,08	0,01	4	0,11	0,18	0,05				
H	boues	34 [19]	12,47	39,50	7,32	34 [19]	12,47	39,50	7,32	12 [3]	8,67	13,01	3,25	5 [1]	8,29	20,18	2,54
I	DV	35	1,59	6,00	1,64	20	1,62	6,00	1,74	15	0,16	0,29	0,07				
J	digestat OMR	40 [32]	27,58	51,21	12,68	30 [30]	34,20	51,21	5,76	5 [3]	14,6	24,3	7,1	11 [8] cabine	15,8	30,0	8,2

* Mesurages réalisés sur une durée moyenne de 6 à 7 heures par appareil à lecture directe

DV : déchets verts ; OMR : Ordures Ménagères Résiduelles ; Plateformes C et J entièrement closes ; les autres disposent de bâtiments fermés, halls mi-clos et aires de stockage à l'air libre. En général hormis dans le cas des usines C et J, les bâtiments et halls ne sont que très rarement fermés : en périodes de travail, en général au moins une porte est ouverte.

Concernant les COV de manière générale, l'étude de l'INRS (2010) a mis en évidence les teneurs les plus élevées au niveau de l'usine (close) de compostage d'un digestat d'OMR (10,99 mg/m³ contre 0,14 à 1,52 mg/m³ dans les autres usines de compostage).

Concentrations en COV mesurées dans des centres de compostages de divers déchets (INRS, 2010).

Entreprise	Déchet principal	COV : concentration moyenne en mg/m ³					
		n	Alcools	Cétones	Aromatiques	Terpènes	Total COV
A hiver	DV	9	n.d.	0,03	0,04	0,38	0,45
A été	DV	13	n.d.	0,03	0,04	0,26	0,33
B hiver	boues	11	n.d.	0,03	0,14	0,05	0,21
B été	boues	16	n.d.	0,03	0,06	0,03	0,12
C	boues	14	n.d.	0,29	0,51	0,39	1,19
D	bio-déchets	18	n.d.	0,03	0,04	0,23	0,30
E	DV + boues	20	n.d.	0,03	0,04	0,07	0,14
F	OMR	23	n.d.	0,06	0,10	0,74	0,90
G	OMR	24	n.d.	0,03	0,21	1,27	1,52
H	boues	21	0,02	0,06	0,04	0,06	0,17
I	DV	21	0,10	0,18	0,04	0,30	0,61
J	digestat OMR	24	5,59	1,93	0,37	3,10	10,99

D'après les mesures de Nadal *et al.* (2009) réalisées pour rappel sur un site de traitement de la fraction organique des ordures ménagères, collectées sélectivement (biodéchets) situé en Espagne, les premières étapes de la filière (réception, tri) sont les plus émettrices en COV (étape de tri) (cf. tableau page suivante).

Les niveaux restent inférieurs aux valeurs limites professionnelles fixées par l'Espagne ainsi qu'à celles de la France (certaines sont identiques). Cependant, les auteurs ont aussi conduit une évaluation des risques pour les travailleurs sur la base de valeurs toxicologiques de référence et, lors de l'étape du compostage, les quotients de risque (voie inhalation) restent inférieurs à 1 alors que pour l'étape de tri, le QR du toluène (effet avec seuil, non carcinogène) a été évalué à 5.

Concentrations médianes ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en composés organiques volatils mesurés en différents points d'une usine de traitement de la fraction organique des ordures ménagères en Espagne (Nadal et al., 2009).

	A	B	C	D	VLA-ED*
Benzene	11.5 ^a	12.0 ^{ab}	2.4 ^b	13.5 ^{ab}	3250
Toluene	4775.0 ^a	845.0 ^b	50.5 ^c	467.5 ^b	192,000
Ethylbenzene	780.0 ^a	172.5 ^b	5.8 ^c	106.0 ^b	441,000
<i>m,p</i> -Xylene	2497.5 ^a	660.0 ^b	11.0 ^c	430.0 ^b	221,000
<i>o</i> -Xylene	350.0 ^a	104.5 ^b	3.1 ^c	61.0 ^b	221,000
Styrene	64.5 ^a	21.5 ^a	<0.2 ^c	9.3 ^b	86,000
Naphthalene	1.8	1.2	0.2	1.3	53,000
Methylene chloride	15.0	27.5	<20.0	10.5	177,000
1,2-Dichloroethane	<2.0	2.5	<2.0	9.5	20,000
Chloroform	21.0 ^a	19.0 ^a	1.9 ^b	15.5 ^a	10,000
Trichloroethylene	66.0 ^a	28.5 ^a	4.6 ^c	27.5 ^b	273,000
Tetrachloroethylene	1335.0 ^a	118.5 ^b	<10.0 ^c	96.0 ^b	n.a.
1,3-Butadiene	<40.0	<40.0	<40.0	<40.0	4500
1,3,5-Trimethylbenzene	152.5 ^a	36.5 ^b	2.4 ^c	26.0 ^b	100,000
1,2,4-Trimethylbenzene	440.0 ^a	140.0 ^b	9.7 ^c	89.0 ^b	100,000
<i>p</i> -Isopropyltoluene	635.0	1272.5	735.0	1435.0	n.a.
<i>n</i> -Propylbenzene	56.5 ^a	16.0 ^b	1.4 ^c	14.5 ^b	n.a.
Isopropylbenzene	20.5 ^a	4.9 ^b	0.5 ^c	4.0 ^b	n.a.
Formaldehyde	8.2	4.6	10.3	5.2	n.a.
Total VOCs (mg/m^3)	14.4 ^a	4.61 ^b	1.06 ^c	2.91 ^b	n.a.
BTEX (mg/m^3)	8.41 ^a	1.80 ^b	0.12 ^c	1.08 ^b	n.a.

n.a.: not available. For each parameter, different superscripts (a,b,c) indicate significant differences at $p < 0.05$. *VLA-ED are environmental limit values for daily exposure to chemical pollutants developed by the Spanish National Institute of Safety and Hygiene at Work (INSHT, 2008). The sampling areas (A, B, C, D) are described in the "Materials and methods" section.

A : cabine de tri ; B : réception des déchets ; C : digestion anaérobie ; D : tunnels de compostage ; E ; F : points situés en extérieur du site

A noter que l'inhalation et l'ingestion de poussières contaminées est aussi possible au niveau des étapes de réception / tri des déchets. L'INRS (2010) note par exemple qu'un agent d'entretien non équipé d'une protection réparant un trommel peut être exposé à des **poussières** à plus de $8 \text{ mg}/\text{m}^3$ (VME poussières inhalables et alvéolaires respectivement de 10 et $5 \text{ mg}/\text{m}^3$).

Dans l'ambiance de travail de la zone de compostage du digestat d'OMR étudié par l'INRS (2010), des teneurs en poussières peuvent aussi être plus élevées que la VME (cas pour 4 mesures sur 24) *A noter cependant que les opérateurs dans ces zones sont principalement dans des engins équipés de filtres à poussières.*

Concentrations en matières particulaires totales mesurées dans des centres de compostages de divers déchets (INRS, 2010).

Entreprise	Déchet principal	MPT : concentration en mg/m^3									
		Ambiance				Cabine engin			Prélèvements individuels		
		n (n>VME)	Moy	Max	Écart type	n	Moy	Max	n	Moy	Max
A hiver	DV	13	0,7	1,6	0,5						
A été	DV	12	1,8	5,4	1,4						
B hiver	boues	11	0,3	0,5	0,2						
B été	boues	15 [1]	3,3	22,1	5,4						
C	boues	19 [3]	6,8	13,6	3,5				8 (cabine)	0,8	2,1
D	bio-déchets	16	0,5	d	0,4	3	1,1	2,2			
E	DV + boues	18	2,8	5,7	1,6	3	0,5	0,7			
F	OMR	21	0,5	1,6	0,5	2	0,4	0,5	2	2,3	3,4
G	OMR	20	0,8	4,4	1,1	3	0,2	0,2	2	0,8	1,1
H	boues	20	0,2	0,8	0,1	8	0,6	1,4	2	4,6	8,0
I	DV	21	0,6	4,6	1,1	9	0,4	1,3			
J	digestat OMR	24 [4]	4,8	15,4	4,8						

Concernant l'émission d' H_2S à partir des substrats, Peu (2011) n'identifie pas, les filières de traitement des OM comme des secteurs majeurs d'émissions d' H_2S . (A contrario il mentionne des secteurs tels que les industries agroalimentaires, la production et le stockage de déchets liquides, les réseaux d'assainissement des eaux, les élevages intensifs, les papeteries).

L' H_2S étant principalement produit par les bactéries sulfato-réductrices en anaérobie, il est probable que les étapes précédant la méthanisation des OM se déroulent plutôt en aérobie. Si des fosses de stockage ou bennes sont présentes, une attention devrait cependant être portée à la possible émanation d' H_2S .

En résumé, les opérateurs des filières de méthanisation des ordures ménagères peuvent en particulier être exposés à des composés organiques volatils et bioaérosols lors des opérations de tri des déchets mais aussi lors de la gestion du digestat notamment au moment du compostage. Une attention particulière semble aussi être devoir portée aux opérateurs de tri manuel (le cas échéant) vis-à-vis des troubles musculo-squelettiques.

Données sur la composition chimique des biogaz des filières de méthanisation des ordures ménagères

Pour rappel, la composition du biogaz produit dans ces unités de méthanisation en terme de concentration en **méthane CH₄** varie de 50 à 60 % (moyenne proche de 55 %) (ATEE, Club Biogaz, 2011). Le méthane est un gaz inflammable qui, s'il se retrouve en mélange stœchiométrique dans l'air, peut exploser en cas de source d'ignition. L'autre composé majoritaire du biogaz est le **dioxyde de carbone CO₂** quant à lui inerte (ses concentrations varient de 25 à 45 % d'après l'INERIS, 2008).

D'après l'INERIS (2008), la LIE - limite inférieure d'explosivité se situe autour de 5 % v/v et la LSE - limite supérieure d'explosivité varie de 15 % pour du méthane pur à, 11,4 % v/v, si le méthane n'est présent dans le biogaz qu'à une proportion de 50 %.

LIE et LSE pour différentes compositions de biogaz en terme de mélange CH₄ - CO₂ (INERIS, 2008).

CH ₄ - CO ₂ (%v/%v)	LIE (%v/vCH ₄)	LSE (%v/vCH ₄)
100 - 0	5	15
60 - 40	5,1	12,4
55 - 45	5,1	11,9
50 - 50	5,3	11,4

D'autres composés sont présents à l'état de traces dans le biogaz mais, sont suffisamment peu abondants pour n'avoir qu'une influence négligeable sur les caractéristiques d'explosivité du mélange biogaz/air. En revanche ces divers composés peuvent présenter une certaine toxicité.

Peu de données sont disponibles. Quelques études compilant des données de teneurs ont été réalisées mais elles ne sont pas toutes comparables en termes de composés recherchés et limites de quantification appliquées.

L'AFSSET (2008) a recensé des données pour 4 biogaz issus de la méthanisation d'ordures ménagères et 1 biogaz issu de la méthanisation de biodéchets. Les concentrations (valeurs maximales recensées) sont présentées dans le tableau page suivante. Des composés tels que des hydrocarbures aromatiques, aliphatiques, halogénés sont mis en évidence. A noter que parmi les HAP, seul le naphthalène a semble-t-il été recherché dans le biogaz d'ordures ménagères et aucun métaux ne l'a été.

A titre d'informations, d'après les résultats de Rasi *et al.* (2007) en Finlande, la concentration totale en **composés organiques volatiles** varie :

- de 45 à 176 mg/m³ dans le biogaz de station d'épuration (STEP),
- de 13 à 268 mg/m³ dans le biogaz issu de centre de stockage de déchets (assimilables dans une certaine mesure à des ordures ménagères),
- de 5 à 8 mg/m³ dans le biogaz agricole.

Les auteurs indiquent également qu'en STEP et centres de stockage de déchets, les composés volatils majoritairement mis en évidence dans le biogaz sont des **hydrocarbures aliphatiques et aromatiques**. En centre de stockage, plus de composés aromatiques et halogénés qu'en STEP sont observés. Pour l'installation agricole, les composés volatiles du biogaz sont principalement des **composés soufrés réduits** et quelques hydrocarbures aliphatiques et aromatiques.

Les auteurs notent également que les biogaz issus de STEP et centre de stockage peuvent contenir des **composés organiques de silicium (COVSi)** dont les siloxanes (concentrations de 1,5 à 10,6 dans le biogaz issu de STEP et 0,7 à 4,0 mg/m³ dans le biogaz issu de centres de stockage de déchets). Dans le biogaz agricole, leurs teneurs restent inférieures à 0,4 mg/m³ (Rasi *et al.*, 2007). Ces composés sont issus de la dégradation des silicones utilisées dans de nombreux produits de consommation courante (ex : cosmétiques) et peuvent à ce titre aussi se retrouver dans les ordures ménagères collectées sélectivement ou en mélange.

Selon Ohannessain (2008), les silicones ne posent pas de problème de santé publique mais constitue un frein majeur à la valorisation du biogaz. En effet, quand le biogaz est brûlé pour produire de l'électricité, les siloxanes se transforment en dioxyde de silicium (SiO₂), qui peut se déposer sur les différents équipements en contact avec le gaz brûlé, sous forme de dépôt blanchâtre apparenté à de la céramique. La présence de siloxanes dans le biogaz provoque des dégâts considérables sur les équipements de production d'électricité (moteurs, microturbines, piles à combustible...) et ainsi une baisse des performances (Record, 2009).

Ces COVSi ne constituent donc *a priori* pas un danger direct pour les opérateurs des filières mais peuvent constituer un danger indirect lié à la dégradation progressive du matériel des filières (maintenance nécessaire). Des systèmes d'épuration sont de plus en plus mis en œuvre pour éliminer ces composés du biogaz.

Concernant l'hydrogène sulfuré **H₂S**, gaz pouvant être mortel en quelques minutes (963 mg/m³ pendant 10 minutes), des teneurs de 5200 et 370 mg/m³ sont rapportés par l'AFSSET (2008) dans du biogaz issu respectivement d'ordure ménagères (4 biogaz analysés) et de biodéchets (1 biogaz analysés). D'après l'INERIS (2008), les traitements de désulfuration permettent toutefois d'atteindre des teneurs inférieures à 100 mg/m³.

Concentrations en micropolluants organiques déjà mesurées dans 4 biogaz issus de la méthanisation d'ordures ménagères et 1 issu de la méthanisation de biodéchets (pays non précisés) (d'après AFSSET, 2008) (valeurs maximales).

	OM	biodéchets
HALOGENES	mg/m³	
Méthane, dichloro	2,1	<0.33
Méthane, trichloro (chloroforme)	<0,003	nr
Ethylène, 1,2 dichloro	0,18	<0.08
Ethylène, 1,1 dichloro	0,005	nr
Ethylène, trichloro	1,3	53
Ethylène, tetrachloro	0,52	7,4
Ethane, 1,1,1 trichloro	0,1	nr
méthane, tétrachloro	<0,003	nr
Ethane, dichloro	0,03	nr
Ethylène, chloro (chlorure de vinyl)	0,02	nr
Ethane, 1,1,2 trichloro	<0,006	nr
Ethane, 1,1,1,2 tetrachloro	<0,006	nr
Propane, 1,2 dichloro	0,028	nr
Propane, 1,3 dichloro	<0,006	nr
Propane, 2,2 dichloro	<0,006	nr
Benzène, chloro	0,081	nr
Ethane, chloro	<0,005	nr
Benzène, 1,4 dichloro	3,6	nr
Ethane, 1,1 dichloro	0,02	nr
Ethane, 1,2 dichloro	0,01	nr
HYDROCARBURES ALIPHATIQUES	µg/m³	
Butane	5900	nr
Butane, iso	830	nr
Hexane	430	nr
Hexane, 2-méthyl	870	nr
Hexane, 3-méthyl	1400	nr
Décane	77000	nr
Octane	3200	nr
Nonane	20000	nr
Undécane	38000	nr
Butane, 2methyl	8000	nr
Pentane	6900	nr
Pentane, 3 méthyl	590	nr
Pentane, 2 méthyl	1200	nr
Heptane	2400	nr
Dodecane	4400	nr

	OM	biodéchets
HAP	µg/m³	
Naphtalène	130	10
Acénaphthylène	nr	3,3
Acénaphène	nr	0,1
Fluorène	nr	0,017
Phénanthrène	nr	0,24
Anthracène	nr	<0,0422
Fluoranthène	nr	0,089
Pyrène	nr	<0,0527
Benzo-a-Anthracène	nr	0,0093
Chrysène	nr	0,0059
Benzo-b-Fluoranthène	nr	<0,0105
Benzo-k-	nr	<0,0004
Benzo-a-Pyrène	nr	<0,0042
Dibenzo-a,h-Anthracène	nr	<0,0063
Benzo-g,h,i pérylène	nr	<0,0126
Indéno-1,2,3,c,dpyrène	nr	<0,00422
HA MONOCYCLIQUES	mg/m³	
benzène	2,1	<0,17
Toluène	53	nr
Benzène, Ethyl	59	<0,24
Xylènes (m/p+o)	160	<0,23
Benzène, isopropyl (cumène)	1,2	nr
Benzène, 1,3,5 triméthyl	7,2	nr
Benzène, 1,2,4,5 tetraméthyl	3,4	nr
Benzène, 1ethyl 2methyl	3,8	nr
Benzène, 1 ethyl 4methyl	7,3	nr
Benzène, 1ethyl 3 methyl	2,6	nr
Benzène, propyl	2,6	nr
HYDROCARBURES CYCLIQUES	µg/m³	
Cyclohexane	2000	nr
Cyclohexane, méthyl	1500	nr
Cyclopentane, méthyl	3300	nr

	OM	biodéchets
CETONES	mg/m³	
2-Heptanone	1,4	nr
2-Hexanone	0,26	nr
3-Pentanone	0,48	nr
Acetone	11	nr
Butanone	30	nr
ACIDES	mg/m³	
acide acétique	1,6	nr
ALCENES/TERPENES	mg/m³	
Limonene	220	nr
Pinene, alpha	50	nr
Camphène	4,5	nr
Pinène, bêta	11	nr
ESTERS	mg/m³	
Acétate, ethyl	0,44	nr
Acétate, methyl	0,041	nr
Propanoate, methyl	< 0,01	nr
Propanoate, propyl	< 0,01	nr
Butanoate, ethyl	< 0,01	nr
Acétate, butyl	0,13	nr
ALCOOLS	mg/m³	
1-Butanol	0,053	nr
1-Propanol	0,28	nr
1-Propanol, 2 méthyl	0,069	nr
2-Butanol	1,6	nr
2-Propanol	1,1	nr
ETHERS ET FURANES	mg/m³	
Furane	0,023	nr
Furane, tétraHydro	0,49	nr

	OM	biodéchets
METAUX	µg/m³	
Cd	nr	<ld
Tl	nr	<ld
As	nr	34
Se	nr	<3.6
Sb	nr	4,8
Cu	nr	1,4
Co	nr	<0.4
Cr	nr	25
Sn	nr	<0.4
Mn	nr	2,7
Ni	nr	2,9
Pb	nr	<3.4
V	nr	<0.7
Te	nr	1,2
Hg	nr	<3.1
COMPOSES S	mg/m³	
Sulfure, dimethyl ou methyl	2,2	nr
Disulfure, dimethyl ou methyl	0,1	nr
Butanthiol	1,3	nr
Methanethiol	0,77	nr
Thiophène	0,12	nr
Ethanthiol	0,3	nr
1-Propanthiol	4	nr
2-Propanethiol	1,2	nr
1-Propanéthiol, 2 méthyl	0,032	nr
2-Propanethiol, 2 méthyl	0,35	nr

OM : ordures ménagères ; nr : non recherché ; ld : limite de détection (non précisées).

Valeurs limites d'exposition professionnelles (VLEP) et valeurs toxicologiques de référence (VTR) de substances observées dans les biogaz et/ou les digestats issus de la méthanisation des ordures ménagères

Les VLEP disponibles pour les composés mesurés dans le biogaz issu de la méthanisation d'ordures ménagères, biodéchets sont présentées à titre indicatif (*cf.* tableau ci-après) et, afin de les comparer aux valeurs mesurées dans le biogaz. Il faut toutefois noter qu'un opérateur ne sera jamais exposé à une atmosphère composée de 100 % de biogaz. Si tel était le cas, l'asphyxie par absence d'oxygène interviendrait avant tout effet toxique des substances. Rappelons également que la méthanisation se déroule en système clos. Les opérateurs ne devraient pas être exposés à des dangers du biogaz en fonctionnement normal. Des expositions sont potentielles lors d'un dysfonctionnement, fuite notamment dans un local confiné ou éventuellement lors d'opérations de maintenance (ex : purges de réseau) au cours desquelles une courte exposition à une petite quantité de biogaz pourrait être possible.

Les valeurs rencontrées dans le biogaz sont, pour la plupart, inférieures (voire largement inférieures *cf.* tableau page précédente) aux valeurs limites professionnelles disponibles, sauf pour :

- le chrome quantifié à une valeur de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dans un biogaz issu de biodéchets et en considérant la VME du Cr VI, soit 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Toutefois, il est probable que la concentration reportée par l'AFSSET (2008) correspond à du Cr total,
- l' H_2S pour lequel la VME est de 7 mg/m^3 . Dans le biogaz non épuré des valeurs jusque 5 200 et 390 mg/m^3 ont déjà été mesurées respectivement dans des biogaz issus d'ordures ménagères et biodéchets. Pour de tels biogaz, il suffirait d'environ respectivement 0,13 et 1,8 % de biogaz dilué dans une atmosphère. Ce scénario semble plausible. Cependant comme déjà souligné, la désulfuration est en France largement mise en œuvre dans cette filière (6/9). Les teneurs en H_2S du biogaz sont donc *a priori* largement plus faibles. L'INERIS (2008) indique des valeurs pour du biogaz agricole, *a priori* plus concentré en H_2S , après désulfuration, inférieures à 100 mg/m^3 , ce qui reste plus élevé que la VME. Pour atteindre celle-ci, l'atmosphère devrait contenir environ 7 % de biogaz. L'AFSSET (2008) indique quant à elle une limite de détection de l' H_2S à 0,0002 mg/m^3 qui n'aurait pas été atteinte dans un biogaz épuré d'un centre de stockage de déchets non dangereux, le biogaz brut en contenant 610 mg/m^3 .

Au vu de ces éléments on ne peut que recommander l'emploi de détecteur en continu de l' H_2S dans les lieux confinés et de détecteur portatif individuel lors de la maintenance par exemple des digesteurs. Cependant, comme le souligne l'INERIS (2008), la détection du méthane pourrait suffire (au moins dans les locaux où des risques de fuite de biogaz sont possibles) à se prémunir contre les effets de l' H_2S . En effet, la détection du méthane doit permettre de rester en dessous de 25 % de sa LIE, ce qui pour un biogaz avec une concentration de 100 mg/m^3 d' H_2S , correspond à un teneur de 1,7 ppm d' H_2S dans l'atmosphère (soit environ 2,4 mg/m^3). Cette teneur est inférieure aux VME et VLCP respectivement fixées à 7 et 14 mg/m^3 (soit 5 et 10 ppm). L'INERIS souligne cependant que cette démarche n'est valable que si la désulfuration est efficace et que les teneurs en H_2S sont bien maintenues inférieures à 100 mg/m^3 dans le biogaz.

Pour rappel des mesures d'ambiance de travail ont été réalisées dans une usine de méthanisation / compostage de la fraction organique des ordures ménagères en Espagne (Nadal *et al.*, 2009). Les concentrations les plus élevées en molécules organiques telles que le toluène ont en général été relevées dans les zones de tri / réception mais restent inférieures aux VLEP françaises.

Pour compléter la réflexion, concernant les composés parfois présents dans les composts de digestats d'ordures ménagères méthanisées et, considérant un agriculteur pouvant être exposé *via* ingestion de poussières lorsqu'il les épand et travaille son champs (scénario déterminé dans l'étude de l'ADEME *et al.*, 2007), les valeurs toxicologiques de référence (orale - chronique³³) des métaux, HAP et PCB quantifiés sont fournies ci-dessous à titre indicatif.

Même selon un scénario semble-t-il très majorant (*tracteur ouvert : ingestion de 216 mg/j de poussières*³⁴ ; – *considération que l'agriculteur réalise le travail de son champs sur lequel a été épandu le digestat tous les jours, ...*), les concentrations limites en composés étudiés ne devant pas être dépassées dans les poussières ingérées par l'agriculteur pour qu'aucun effet chronique à

³³ Les VTR chroniques ont été sélectionnées, elles sont plus faibles que les valeurs aiguës et permettent de se placer dans un scénario majorant. De plus lorsque plusieurs VTR étaient disponibles, la plus faible a été sélectionnée.

³⁴ Tracteur fermé, les experts estiment que la quantité de poussières ingérées diminue à 12 mg/j (ADEME *et al.*, 2007).

seuil ou sans seuil soit à craindre, sont, très largement supérieures aux teneurs mesurées et aux seuils des normes NFU (cf. tableau page suivante).

Valeurs limites professionnelles disponibles pour des composés mesurés dans le biogaz (INRS, 2012 a) – en mg/m³

Composés organiques	VME ³⁵	VLCT ³⁶	Composés inorganiques	VME ³³	VLCT ³⁴	Autres	VME ³³	VLCT ³⁴		
benzène	3,25	/	Pb	0,1		H ₂ S	7	14		
toluène	76,8	384	Cd	0,05	/	CO₂	9000	/		
éthylbenzène	88,4	442	dioxyde de Ti, en Ti	10	/	Ammoniac	7	14		
xylènes (somme ou o, m, p)	221	442	trioxyde d'As, en As	0,2	/	Poussières totales	10	/		
benzène triméthyl (1,3,5 - 1,2,3 - 1,2,4)	100	250	Ni	1	/	Poussières alvéolaires	5	/		
			hexafluorure de Se	0,2	/					
Isopropyl benzène	100	250	Cu (fumées)	0,2	/					
dichlorobenzène (1,2)	122	306	Cu (poussières)	1	2					
dichlorobenzène (1,4)	4,5	306	Cr (Chrome VI)	0,001	0,005					
dichlorométhane	178	356	Cr inorganique (II et III)	2						
trichlorométhane	10	250	Mn (fumées)	1	/					
dichloroéthylène (1,1)	20	/								
trichloréthylène	405	1080	Hg (composés alkylés), en Hg	0,01	/					
tétrachloréthylène	138	275	bismuth (tellure de, dopé au Se), en Bi	5	/					
Ethylène, chloro	2,59	/								
Benzène, chloro	27	70								
butane	1900	/								
nonane	1050	/								
octane	1450	/								
heptane	1168	2085								
pentane	3000	/								
naphtalène	50	/								
benzo(a)pyrène	0,150 *									
cyclohexane	700	1300								
cyclopentane	1720	/								
cyclohexane, méthyl	1600	/								

En noir gras, valeurs réglementaires contraignantes

En bleu gras, valeurs réglementaires indicatives

En noir, valeurs indicatives ;

** valeur recommandée par la CNAM (pas de VLEP fixée).*

Cases en rosé : substances CMR avérées, assimilées ou possibles

VTR chroniques par voie orale des composés HAP, PCB et métaux quantifiés dans des digestats – évaluation des concentrations limites ne devant pas être dépassées pour qu'aucun effet pour l'agriculteur exposé ne soit à craindre.

	VTR orales chroniques en mg/kg/j		Doses journalières maximales pour un opérateur de 70 kg en mg/j		Concentrations limites ne devant pas être dépassées dans les poussières ingérées par l'agriculteur épandant un digestat et travaillant son champs - en mg/kg MS		Valeurs quantifiées (INERIS, 2012 b) / seuils des normes NFU 44015 ou NFU 44095 en mg/kg MS
	effet avec seuil	effet sans seuil					
			Seuil	Sans seuil	Seuil	Sans seuil	
fluoranthène	0,04	ND	2,8	-	12 963	-	3,17 / 4
benzo(b) fluoranthène	ND	1,2	-	84	-	388889	1,44 / 2,5
benzo(a)pyrène	ND	7,3	-	511	-	2365741	0,97 / 1,5
PCB	ND	0,00001	-	0,0007	-	3,24	nr / 0,8
As	0,0003	1,5	0,021	105	97	486111	9,20 / 18
Cd	0,0005	ND	0,035		162		2,10 / 3
Cr (VTR du Cr VI)	0,003	ND	0,21		972		99,70 / 120
Cu	0,14	ND	9,8		45370		558 / 300
Hg	0,0003	ND	0,021		97		1,85 / 2
Ni	0,005	ND	0,35		1620		53 / 60
Pb	0,0036	0,0085	0,252	0,595	1167	2755	171 / 180
Se	0,005	NC	0,35		1620		5 / 12
Zn	0,3	ND	21		97222		567 / 600

³⁵ VME : Valeur moyenne d'exposition correspondant à des valeurs limites sur 8 H d'exposition

³⁶ VLCT : valeur limite court terme destinée à protéger des pics d'exposition.

Données sur la composition microbiologique des biogaz

En fonction des intrants, la composition microbiologique du biogaz varie. Toutefois, la composition de la flore des biogaz n'est, en proportion, pas la même que celle du digesteur dont il est issu (AFSSET, 2008).

En effet, même si le biogaz apparaît être un vecteur capable de transporter n'importe laquelle des espèces microbiennes présentes dans la source (les densités de micro-organismes sont généralement de l'ordre de 10^6 à 10^7 cellules procaryotes/m³ et 10^4 cellules d'eucaryotes/m³), l'aérosolisation est variable en fonction des espèces (Moletta, 2006, Moletta *et al.*, 2008 et 2010) :

- certaines sont préférentiellement aérosolisées (ex : *Staphylococcus spp.*, *Propionibacterium acnes*, phylums des *alphaproteobacteria*, *betaproteobacteria*, *gammaproteobacteria*) (aérosolisation active),
- certaines sont préférentiellement non-aérosolisées (phylums des *Deltaproteobacteria*, *Spirochaetes*, *Thermotogae*, *Chloroflexi* et groupes sulfato-réducteurs) (non-aérosolisation active),

Les auteurs évoquent aussi un comportement d'aérosolisation passive qui peut conduire n'importe lequel des groupes de micro-organismes présents dans la source à se retrouver dans l'aérosol (ex : phylums des *Actinobacteria*, *Firmicutes* et *Bacteroidetes*).

Vinneras et Nordin (2007) ont étudié la flore de biogaz issus de stations d'épurations. Ils ont conclu que le risque microbiologique lié à l'utilisation du biogaz valorisé était probablement insignifiant. Les risques liés au contact avec le gaz brut et les eaux condensées sont probablement plus élevés. Cependant les systèmes étant généralement fermés, les auteurs rapportent que, selon les professionnels, les travailleurs sont rarement exposés. *A noter que dans cette étude, une des sources de microorganisme dans le biogaz était l'eau usée utilisée pour désulfurer le biogaz.*

Diagramme de fonctionnement des installations de méthanisation des ordures ménagères / identification de points critiques pour la santé / sécurité des opérateurs

Un diagramme de fonctionnement d'une filière de méthanisation d'ordures ménagères est présenté ci-après. Il illustre les principales étapes de cette filière et est représentatif des installations les plus répandues en France (d'après les données de l'ATEE, Club Biogaz, 2011 et AMORCE et ADEME, 2011).

Sur ce diagramme, les points critiques pour les opérateurs vis-à-vis de différents dangers identifiés sont représentés aux moyens de logos illustratifs et d'un code couleur représentatif d'un niveau de criticité.

En effet, une hiérarchisation des points critiques pour les opérateurs des filières biogaz a été proposée. Elle est fondée sur la base d'une méthodologie dans laquelle des niveaux de criticité sont définis en croisant :

- des niveaux d'enjeux (en terme de conséquences) et,
- des niveaux de retour d'expérience (l'évènement a-t-il déjà été décrit, est-il probable ou non, ... ?).

Pour chacun de ces niveaux, des scores ont été attribués : plus le score est élevé, plus le niveau est élevé c'est-à-dire par exemple, plus l'évènement peut avoir des conséquences importantes.

Dans le cadre de cette étude, nous avons arbitrairement considéré 3 niveaux d'enjeux et 3 niveaux de retour d'expérience : niveau faible – score 1 / niveau modéré – score 2 / niveau fort – score 3. La matrice suivante a ainsi été élaborée :

niveaux de retour d'expérience / niveaux d'enjeux	Elevé- 3	Moyen -2	Faible - 1
Important - 3	3 x 3 = 9	3 x 2 = 6	3 x 1 = 3
Modéré - 2	2 x 3 = 6	2 x 2 = 4	2 x 1 = 2
Faible - 1	1 x 3 = 3	1 x 2 = 2	1 x 1 = 1

Dans le cas de situations particulières, des scores en général de 0,5, voire 1 peuvent ensuite avoir été ajoutés ou retranchés aux résultats de criticité « Enjeux x Retour d'expérience ».

Trois niveaux de points critiques sont ainsi identifiés :

- les points critiques majeurs avec des notes supérieures ou égales à 6 (couleur rouge),
- des points critiques modérés avec des notes variant de 3 à inférieures à 6 (couleur jaune),
- des points critiques mineurs avec des notes inférieures à 3 (couleur verte).

Les différents éléments rapportés dans cette synthèse ont permis de proposer des niveaux d'enjeux et des niveaux de retour d'expérience, selon des critères propres à chacun des dangers et, explicités dans le tableau argumentaire associé au diagramme. Ce tableau argumentaire est indissociable du diagramme.

A noter que les données étant différentes pour les dangers étudiés, cela introduit un certain biais, notamment si l'on souhaite les comparer entre eux. Par ailleurs dans certains cas (dangers, filières étudiées), les données sont rares voire inexistantes, ce qui peut aussi introduire un biais par rapport aux cas où des données sont disponibles.

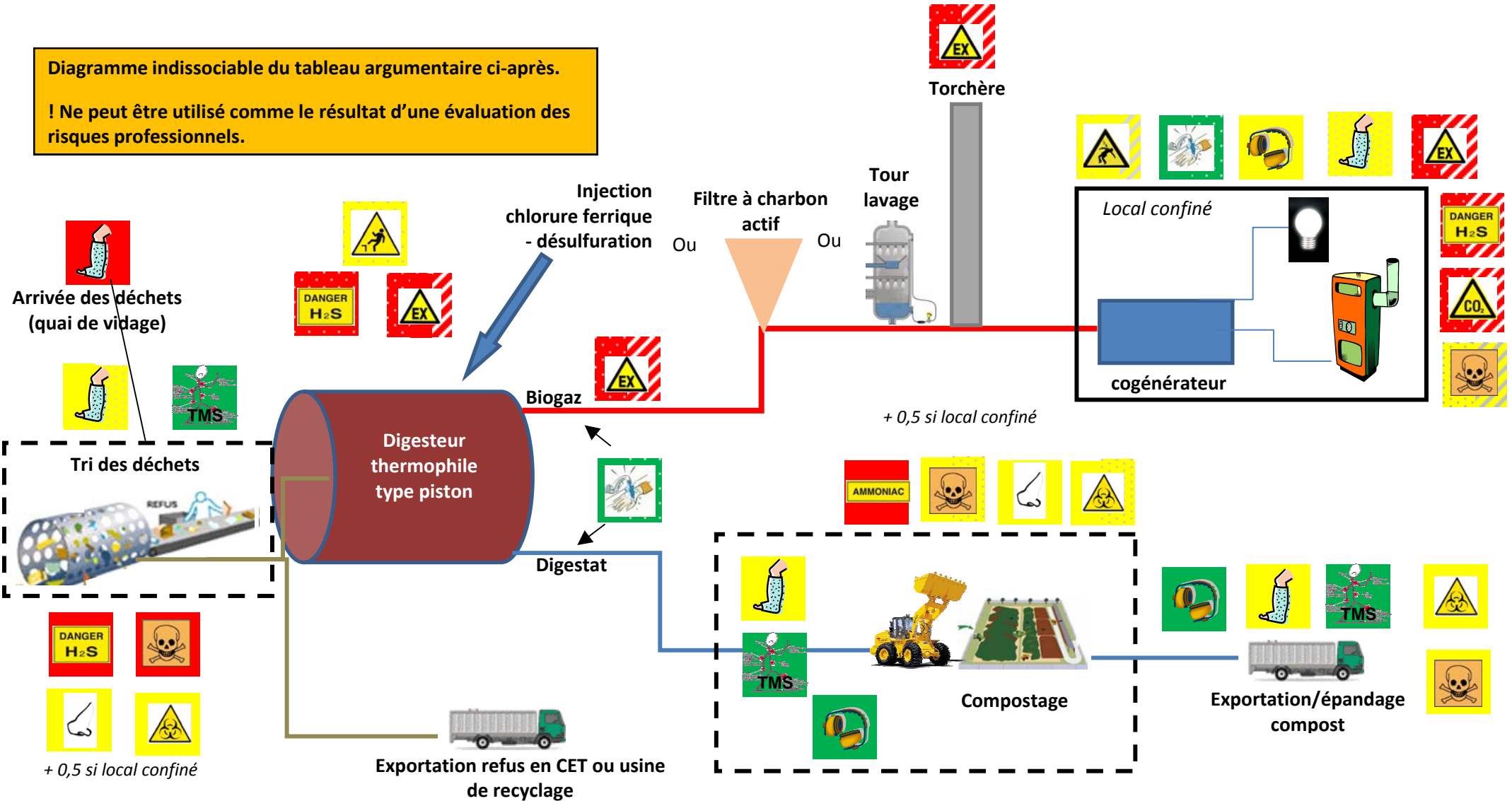
Pour plus de détails sur la méthodologie, se reporter en section 9 du rapport.

Remarque importante : le contenu de cette synthèse, de ce diagramme et du tableau argumentaire ne peut être utilisé en l'état par une entreprise ou un site comme le résultat d'une analyse des risques professionnels. Il s'agit uniquement d'une sensibilisation des acteurs, et lecteurs sur des points critiques des filières de production, valorisation de biogaz, en termes de santé et sécurité des opérateurs. Ces points critiques constituent des alertes sur des points au niveau desquels il convient de mettre en œuvre les mesures de maîtrise des risques existantes et ou d'approfondir les données en réalisant des évaluations de risques plus détaillées.

Filière Méthanisation des Ordures Ménagères



Diagramme indissociable du tableau argumentaire ci-après.


! Ne peut être utilisé comme le résultat d'une évaluation des risques professionnels.









	Phase de fonctionnement		Phase de maintenance		En cas de dysfonctionnement (en particulier fuite de biogaz)		Point critique majeur (notes ≥ 6) fonctionnement		Point critique modéré (notes ≥ 3 et < 6)		Point critique mineur (notes < 3) fonctionnement
--	-------------------------	--	----------------------	--	--	--	--	--	--	--	--







Points critiques identifiés	Lieux / étapes	Phases	Niveaux d'enjeux (E)	Niveaux de retour d'expérience (R)	Résultats E X R	Situations particulières	Principales mesures de maîtrises /autres commentaires
Risque électrique 	Local de cogénération / armoire électrique – raccordement au réseau EDF	Mise en service / Maintenance / Dys-fonctionnement	3 - D'après l'INRS (2012 b), des accidents graves, notamment mortels peuvent survenir.	1 - D'après l'INRS (2012 b), ces accidents sont de plus en plus rares (toutes professions confondues, 10 morts / an par électrocution).	3 x 1 = 3 		Habilitations Normes
Risque d'explosion / incendie d'une ATEX 	Local confiné où arrivée de biogaz (local de cogénération) Digesteur / post-digesteur / gazomètre / torchère (soupapes) Brides / raccords / pots de purges canalisations	Dys-fonctionnement (fuite) / Maintenance (ex : purges) / Fonctionnement du digesteur : en phase démarrage / arrêt	3 - L'explosion d'une ATEX engendre de nombreux dégâts et potentiellement des morts. Les incendies ou feux torches en particulier lié à des fuites de gaz peuvent aussi être dévastateurs.	3 – Peu d'incidents/accidents sont rapportés pour cette filière mais peu d'installations existent également. Au même titre que dans les autres filières de méthanisation, des risques liés aux ATEX sont possibles.	3 x 3 = 9 	+ 0,5 dans local confiné - 0,5 au niveau des canalisations (volume ATEX moins important)	Identifications des zones ATEX Formation, mesures de sécurité (soupapes détecteurs de CH ₄ , ventilation) Appareils dédiés zones ATEX
Risque blessures / chutes  	Endroits où des chutes en particulier de hauteur sont possibles Manipulation d'objets, d'outils Chargement digestat	Fonctionnement / Maintenance	1 – Même si ces accidents du travail peuvent avoir une gravité très variable, les plus fréquents sont des accidents peu graves entraînant des douleurs, lombagos, contusions, plaies et entorses (CNAMTS, 2010) 3 - Un cas particulier est identifié au niveau des quais de vidage des déchets : des accidents de gravité plus importante semblent pouvoir survenir (retour professionnels, cas décrits dans base EPICEA)	3 – Ce type d'accidents de travail est le plus fréquent. Ces AT sont notamment liés à la manipulation d'objet (221 cas), des accidents de plain-pied (190 cas) et des chutes avec dénivellation (93 cas) (sur 681 AT recensés en 2010 chez les salariés des « entreprises de traitement des ordures ménagères et des déchets industriels et commerciaux banals »). (CNAMTS, 2010).	1 x 3 = 3 Ou 3 x 3 = 9 	+ 0,5 en cas maintenance	Règles de sécurité (ex : barrières, utilisations de cordes), de conception des locaux. Notices machines, ...

Points critiques identifiés	Lieux / étapes	Phases	Niveaux d'enjeux (E)	Niveaux de retour d'expérience (R)	Résultats E X R	Situations particulières	Principales mesures de maîtrises /autres commentaires
Brûlures 	Canalisations non enterrées du biogaz/digestat Local cogénération Séchages des digestats / emploi d'acides	Fonctionnement Maintenance (ex : sur chaudière)	1 – La gravité de ces brûlures (hors incendies) est considérée comme faible (proportion du corps touchée faible (ex : mains))	1 – Aucune information relative aux éventuelles brûlures n'est disponible. Toutefois leur nombre est probablement faible.	1 x 1 = 1 	+ 0,5 si digestion thermophile au niveau des canalisations + 0,5 en cas maintenance	Règles de bon sens et de sécurité (ex : attendre refroidissement avant maintenance) / repérage canalisations selon normes, calorifugeage canalisations, pièces machines
Intoxications aiguës à H ₂ S 	Tri des déchets → Digesteur / gazomètre / sphère → Local confiné →	Fonctionnement Fonctionnement / Maintenance Dys-fonctionnement (fuite, non efficacité de la désulfuration) / maintenance (purges)	3 – L'exposition à l'H ₂ S peut être très rapidement mortelle.	2 - avant méthanisation – Aucune intoxication dans des centres de méthanisation d'ordures ménagères n'a été décrite. Même si de l'H ₂ S peut être produit, Peu (2011) n'identifie pas, les filières de traitement des OM comme des secteurs majeurs d'émissions d'H ₂ S. (<i>A contrario il mentionne des secteurs tels que les IAA, la production et le stockage de déchets liquides, les réseaux d'assainissement des eaux, les élevages intensifs, les papeteries.</i>) <i>L'H₂S étant principalement produit par les bactéries sulfato-réductrices en anaérobie, il est probable que les étapes précédant la méthanisation des OM se déroulent plutôt en aérobie. Si des fosses de stockage sont présentes, une attention devrait cependant être portée à la possible émanation d'H₂S.</i> 3 - pour le biogaz - Lors de la méthanisation anaérobie, au même titre que dans les autres filières, de l'H ₂ S est produit. Une valeur de 5200 mg/m ³ a déjà été observée dans du biogaz brut issu d'OM (VME = 7 mg/m ³) (AFSSET, 2008).	3 X 2 = 6  3 x 3 = 9 	+ 0,5 en cas de maintenance + 0,5 en milieu confiné - 1 si désulfuration	Règles de sécurité : détecteur gaz, H ₂ S, ventilation, formation Penser à vérifier l'efficacité du traitement de désulfuration

Points critiques identifiés	Lieux / étapes	Phases	Niveaux d'enjeux (E)	Niveaux de retour d'expérience (R)	Résultats E X R	Situations particulières	Principales mesures de maîtrises /autres commentaires
Anoxie liée au remplacement de l'O ₂ par d'autres gaz tels que le CO ₂ 	Local confiné	Dys-fonctionnement (fuite) / Maintenance (purges)	3 – L'anoxie peut conduire à la mort rapide.	2 - Concentrations en CO ₂ plus fortes que l'H ₂ S (40 à 50% environ soit 400 000 à 500 000 ppm) mais rapport des « concentrations maximales relevées dans biogaz / VME » plus élevé pour l'H ₂ S (740) que pour le CO ₂ (100).	3 X 2 = 6 	+ 0,5 en cas maintenance	Détecteur 4 gaz
Intoxications à l'ammoniac 	Gestion des digestats : compostage	Fonctionnement	2 – L'ammoniac est un puissant irritant des voies respiratoires. Il peut aussi être mortel ou provoquer des effets irréversibles mais les seuils d'effets, notamment létaux, de l'ammoniac sont plus élevés que ceux de l'H ₂ S.	3 - La production d'ammoniac durant le compostage semble être une problématique bien réelle. Toutes les mesures d'exposition professionnelles effectuées dans un hall clos de compostage de digestats d'OM sont supérieures à la VME (= 7 mg/m ³). En effet, la méthanisation transforme l'azote en azote ammoniacale. Dans les cabines d'engins et pour les prélèvements individuels, respectivement 3 mesures sur 5 et 8 sur 11 dépassent la VME (INRS, 2010).	2 x 3 = 6 	+ 0,5 en milieu confiné	Ventilation. Médias filtrants efficaces des cabines d'engins
Intoxications chroniques à des substances chimiques autres qu'H ₂ S et NH ₃ par inhalation de biogaz 	Local confiné	Dys-fonctionnement (fuite) / Maintenance (purges)	3 – Les pathologies liées à des expositions chroniques à des substances en question (notamment CMR) peuvent être graves (cancers) et entraîner la mort.	1 – Les concentrations déjà mesurées dans les biogaz sont inférieures aux VLEP. Un opérateur ne sera de plus, jamais exposé à une atmosphère composée de 100 % de biogaz et de manière chronique. L'exposition au biogaz est donc probablement très faible même si elle peut <i>a priori</i> arriver de manière répétée lors par exemple des opérations de purges. A noter que Nadal <i>et al.</i> (2009) ont réalisé des mesures d'ambiance dans une zone de digestion anaérobie d'OM en Espagne. Les valeurs mesurées sont toutes inférieures aux VLEP. Les auteurs n'identifie aucun risque avec ou sans seuil dans cette zone.	3 x 1 = 3 		Peu de résultats disponibles. il serait pertinent de réévaluer les conclusions à mesures de l'obtention de nouveaux résultats

Points critiques identifiés	Lieux / étapes	Phases	Niveaux d'enjeux (E)	Niveaux de retour d'expérience (R)	Résultats E X R	Situations particulières	Principales mesures de maîtrises / autres commentaires
Intoxications chroniques par inhalation / ingestion de poussières et de composés organiques volatiles 	Tri des déchets / réception	Fonctionnement / Maintenance (lavage, réparation)	3 – idem ci-dessus	2 – Nadal <i>et al.</i> (2009) ont réalisé une campagne de mesure des COV sur un site de traitement de fractions organiques des ordures ménagères, collectées sélectivement (biodéchets). L'air ambiant dans les cabines de tri, le hall de réception, la zone de méthanisation et celle de compostage a été échantillonné. Les premières étapes de la filière sont les plus émettrices en COV (étape de tri). Les niveaux restent inférieurs aux VLEP. Cependant, les auteurs ont aussi conduit une évaluation des risques pour les travailleurs sur la base de valeurs toxicologiques de référence et, lors de l'étape du compostage, les quotients de risque (voie inhalation) restent inférieurs à 1 alors que pour l'étape de tri, le QR du toluène (effet avec seuil, non carcinogène) a été évalué à 5. A noter que l'inhalation et l'ingestion de poussières contaminées est aussi possible à cette étape. L'INRS (2010) note par exemple qu'un agent d'entretien non équipé d'une protection réparant un trommel peut être exposé à des poussières à plus de 8 mg/m ³ (VME poussières inhalables et alvéolaires respectivement de 10 et 5 mg/m ³).	3 x 2 = 6 	+ 0,5 en milieu confiné	Idem ci-dessus Règles de sécurité (ex : engins équipés de filtres à poussières ; masques) et d'hygiène.
	Gestion des digestats compostage	Fonctionnement / maintenance (lavage surface)	3 – idem ci-dessus	1,5 - Peu de données sont disponibles mais le compostage conduit à une volatilisation de composés (COV) et aérosolisation de poussières. Les concentrations en COV totaux les plus élevées ont été mises en évidence dans les ambiances de travail (closes) d'une usine de compostage d'un digestat d'OM (INRS, 2010). Quatre valeurs de matières particulaires totales sur 24 obtenues en ambiance de compostage d'un digestat d'OM sont supérieures à la VME (= 10 mg/m ³).	3 x 1,5 = 4,5 	+ 0,5 en milieu confiné	
	Epannage	Fonctionnement	3 – idem ci-dessus	1 – Même avec l'exemple d'un scénario semble-t-il très majorant, il semble peu probable que les valeurs toxicologiques de référence soient dépassées. Les seuils des normes NFU permettent <i>a priori</i> d'être sécuritaire.	3 x 1 = 3 		

Points critiques identifiés	Lieux étapes /	Phases	Niveaux d'enjeux (E)	Niveaux de retour d'expérience (R)	Résultats E X R	Situations particulières	Principales mesures de maîtrises /autres commentaires
Risque micro-biologique (infection, allergie, inflammation) 	Tri Gestion des digestats : Compostage Epan dage	Fonctionnement /Maintenance (lavage)	2 - Des pathologies de gravités différentes peuvent survenir, cependant les majeures sont sans doute des pathologies courtes et traitables (ex : diarrhées). Des allergies, inflammations des voies respiratoires peuvent aussi survenir (notamment liées à l'exposition à des bioaérosols).	2 – Des études épidémiologiques ont déjà mis en évidence des associations convaincantes entre des troubles respiratoires aigus et l'exposition des professionnels de la collecte et du tri des déchets (ORS, 2010), probablement associé à l'abondance des bioaérosols. Les auteurs soulignent toutefois des évolutions en France (depuis les études de 92 à 97 et 2003) ayant permis d'améliorer les conditions de travail. De même des études montrent une association probable entre des troubles digestifs et exposition de ces professionnels, probablement associés aussi à des taux élevés en bioaérosols (endotoxines champignons glucanes, microorganismes totaux). Par ailleurs, de façon générale, l'OMS considère que la filière de traitement des déchets municipaux est susceptibles d'exposer les salariés à un risque de pathologies infectieuses, pulmonaires allergiques, bronchites chroniques et hépatites plus élevés que la population générale. Ces risques sont associés à des niveaux de bioaérosols dans l'air de 2 à 10 fois supérieurs dans une ambiance d'une usine de tri de déchets par rapport à une ambiance générale (RECORD, 2003).	2 x 2 = 4 	- 0,5 pour les digestats par rapport aux substrats (réduction des pathogènes) - 0,5 si hygiénisation des entrants / hygiénisation post-méthanisation ou digestion thermophile + 0,5 lors du compostage (aérosolisation accentuée – apparition de flore thermophile – études épidémiologiques montrant l'association entre troubles et exposition à des bioaérosols des professionnels de plateforme de compostage – ORS, 2010 – tableaux aigus les plus importants publiés pour activité de compostage ou collecte déchets verts – RECORD, 2003). + 0,5 en milieu confiné	Vêtements, dispositifs de protection ; bonnes pratiques d'hygiène. Seuils de la norme NFU 44-015
	Exposition au biogaz Exposition aux condensats des canalisations	Dys Fonctionnement Maintenance	2 – idem précédent. Cependant la flore du digestat n'est pas représentative de celle du biogaz – peu d'éléments sont disponibles sur celle-ci	0 – Les concentrations dans les biogaz semblent relativement faibles et de l'ordre de la contamination de l'air ambiant. Très peu d'études ont néanmoins été conduites. D'après l'état actuel des connaissances, les opérateurs ne devraient pas être exposés à des doses importantes pouvant engendrer des pathologies. Les mesures de Nadal <i>et al.</i> (2009), dans un centre en Espagne de traitement d'OM par digestion anaérobie et compostage montre que les niveaux en bioaérosols sont les plus faibles dans la zone de méthanisation : ils sont largement inférieurs aux quelques valeurs seuils proposées.	2 x 0 = 0	+ 0,5 si utilisation d'eau contaminée pour la désulfuration par lavage (Vinerras, 2007) + 0,5 si présence identifiée / possible de bactérie <i>Legionella</i> pathogène par inhalation	Très peu de résultats disponibles. A réévaluer à mesures de l'obtention de nouveaux résultats

Points critiques identifiés	Lieux / étapes	Phases	Niveaux d'enjeux (E)	Niveaux de retour d'expérience (R)	Résultats E X R	Situations particulières	Principales mesures de maîtrises /autres commentaires
TMS  Risques liés aux postures, vibrations, port de charges notamment	Utilisation d'engins pour la gestion des digestats (compostage, transport extérieur du site)	Fonctionnement	1 – Ces troubles même s'ils peuvent être très perturbants au quotidien sont cependant considérés comme de faible gravité.	2 – Les TMS sont les maladies professionnelles les plus fréquentes des salariés du secteur « Entreprises de traitement des ordures ménagères et des déchets industriels et commerciaux banals (900 BC) » (47 sur 47 déclarées en 2010). Les MP sont toutefois moins nombreuses que les AT (47 MP contre 681 AT en 2010) (CNAMTS, 2010).	1 x 2 = 2 	+ 0,5 pour les opérateurs de tri (des études épidémiologiques ont mis en évidence une association convaincante entre TMS et postes professionnels de la collecte et du tri des déchets)	Amélioration du confort des appareils, des postes de travail. Règles à respecter
Bruits 	Tri Local de valorisation du biogaz (chaudière / moteur) Utilisation de véhicules pour gestion des digestats	Fonctionnement	1 – Même si les impacts sur la santé liés au bruit sont souvent sous-estimés, on peut cependant considérer qu'ils sont généralement de faible gravité.	2 – Aucune donnée disponible mais les moteurs (camions, circulation digestats) engendrent automatiquement du bruit, celui-ci n'étant cependant, pas forcément nuisible, d'autant plus si les règles constructeurs sont respectées. 3 – Dans les locaux de valorisation, les niveaux déjà enregistrés (cas d'une autre filière) sont élevés (95 à 110 dB(A))	1 x 2 = 2 ou 1 x 3 = 3 	+ 0,5 transport des digestats hors site	Règles : isolation phonique du local de cogénération, port de casques, cabines engins fermées, isolées, règles machines
Odeurs 	Tri Compostage	Fonctionnement	1 – Les odeurs même si elles peuvent être incommodantes sont considérées comme des nuisances de faible gravité. <i>A noter, qu'en particulier, pour des riverains, les nuisances olfactives peuvent cependant avoir des conséquences psychologiques non négligeables.</i>	3 - La plupart des matières traitées en méthanisation émettent par nature des composés malodorants (dégradation de la matière organique). Le biogaz quant à lui en système clos n'engendre pas en fonctionnement normal de nuisances olfactives. (en cas de dysfonctionnement d'autres points critiques que les odeurs sont nous semble-t-il à privilégier donc non retenu comme critique vis-à-vis des odeurs). Après compostage, la matière est considérée stabilisée, elle ne devrait plus émettre d'odeurs.	1 x 3 = 3 	+ 1 lors du compostage (émission d'ammoniac et de composés soufrés les 1ers jours (ADEME, 2012)) + 0,5 en milieu confiné	

Bibliographie citée dans cette synthèse

ADEME. 2005. Impacts environnementaux de la gestion biologique des déchets. Bilan des connaissances. 331 p.

ADEME. 2009. Campagne nationale de caractérisation des ordures ménagères (MODECOM) - Résultats 2007. 6p.

ADEME, 2011. Qualité agronomique et sanitaire des digestats. Etude réalisée par RITMO 250 p.

AFSSET. 2008. Risques sanitaires du biogaz : Evaluation des risques sanitaires liés à l'injection de biogaz dans le réseau de gaz naturel, Rapport d'expertise collective « Groupe de travail Biogaz », Saisine Afsset n°« 2006/010 », 174 p.

AMORCE et ADEME. 2011. Méthanisation des déchets ménagers (installations de traitement des biodéchets collectés sélectivement et installations de traitement mécano-biologique des ordures ménagères) État des lieux –Mars 2011. DT38. 84 p.

ATEE, Club Biogaz. 2011. État des lieux de la filière méthanisation en France, 61 p.

DEBRIEU C. 2004. Lutte contre les odeurs de l'assainissement. Document technique FNDAE
GOYER N., LAVOIE J., LAZURE L., MARCHAND G. 2001. Les bioaérosols en milieu de travail : guide d'évaluation, de contrôle et de prévention. Etudes et Recherches. Guide technique. IRSST. 72 p.

INERIS. 2006. Etude comparative des dangers et des risques liés au biogaz et au gaz naturel, rapport N° 46032, 34 pages.

INERIS. 2008. Etude des risques liés à l'utilisation des méthaniseurs agricoles, Rapport d'étude n° DRA-07-88414-10586B réalisé pour le Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables, 91 p

INERIS. 2012 a. Retour d'expérience relatif aux procédés de méthanisation et à leurs exploitations. EAT DRA DRC- 93 - Opération A. 148 p.

INERIS. 2012 b. Etude comparative de la qualité de composts et de digestats issus de la fraction fermentescible d'ordures ménagères, collectée séparément ou en mélange. Rapport d'Etude N°INERIS – DRC – 12 – 125976 -02525 B. 124 p.

INRS, 2011. Endotoxines en milieu de travail. II. Exposition, risques, prévention. Dossier médico-technique. 19 p.

INRS. 2012. a) Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France. ED 984. Aide-mémoire Technique. 32 p

MARCHAIS C. 2011. Biogaz et méthanisation en France.
http://www.fnccr.asso.fr/documents/2.%20ClubBiogaz%20ATEE_Caroline%20MARCHAIS.pdf

MOLETTA M. 2006. Caractérisation de la diversité microbienne aéroportée des biogaz. Déchets-revue francophone d'écologie industrielle – cahier spécial du n° 44. pp 18-20.

MOLETTA-DENAT M., BRU-ADAN V., DELGENES JP., HAMLIN J., WERY N., GODON JJ. 2010. Selective microbial aerosolization in biogas demonstrated by quantitative PCR. Bioresource Technology. Vol 101. pp 7252-7257.

MOLETTA M. WERY N., DELGENES JP., GODON JJ. 2008. Water Science & Technology. Vol 57, n°4. pp 595-599.

NADAL. M., INZA I., SCHUHMACHER M., FIGUERAS M., DOMINGO J. 2009. Health risks of the occupational exposure to microbiological and chemical pollutants in a municipal waste organic fraction

treatment plant. International Journal of Hygiene and Environmental Health. Vol 212, N) 6. pp 661 – 669.

OHANNESSIAN A. 2008. Composés Organiques Volatils du Silicium : Un frein à la valorisation énergétique des biogaz – « *Génèse et mécanismes de formations* ». Thèse INSA de Lyon. 305 p.

ORS (Observatoire Régional de la Santé – Rhône-Alpes). 2010. L'évaluation des effets sanitaires liés à la gestion des déchets ménagers et assimilés (DMA). Rapport scientifique. 184 p.

PEU P. 2011. La gestion des effluents d'élevage et la production d'hydrogène sulfuré, cas particulier de la méthanisation. Thèse Ecole Doctorale SDLM. Université de Rennes 1. 173 p.

RASI. 2009. Biogas composition and upgrading to biomethane. Academic dissertation. Université de Jyväskylä. 79 p.

RASI S. VEIJANEN A., RINTALA J. 2007. Trace compounds of biogas from different biogas production plants. Energy , n° 32. pp 1375–1380

RECORD 2012. Substances émergentes, polluants émergents dans les déchets : analyses et prospective. 183 p.

RECORD. 2009. Freins et développements de la filière biogaz : les besoins en recherche et développement, étude n°07-0418/1A 134 pages. Disponible en ligne sur le site www.record-net.org

SOLAGRO. 2001. La digestion anaérobie des boues urbaines. Etat des lieux, état de l'art. 36 p.

VINNERAS B. NORDIN A. 2007. Microbiological community in biogas systems and evaluation of microbial risks from gas usage. Energie - wasser-praxis 12/2007 – DVGW Jahresrevue. pp 50-53.

Sites internet, bases de données :

ADEME : <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?id=11433&m=3&cid=96>

Base de données EPICEA de l'INRS. <http://www.inrs.fr/accueil/produits/bdd/epicea.html> ; consulté le 02/10/2012.

Base de données ARIA du BARPI <http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/> ; consulté le 02/10/2012.

INRS, 2012, b) article « Electricité » <http://www.inrs.fr/accueil/risques/phenomene-physique/electricite.html> ; consulté le 08/10/2012.

CNAMTS, 2010. Statistiques par numéro de risque ou par code APE-NAF. <http://www.risquesprofessionnels.ameli.fr/chiffres-cles-et-statistiques/nos-statistiques.html> ; consulté le 18/12/2012.

Filière « Méthanisation industrielle »

Description de la filière de méthanisation industrielle (ATEE, Club Biogaz, 2011)

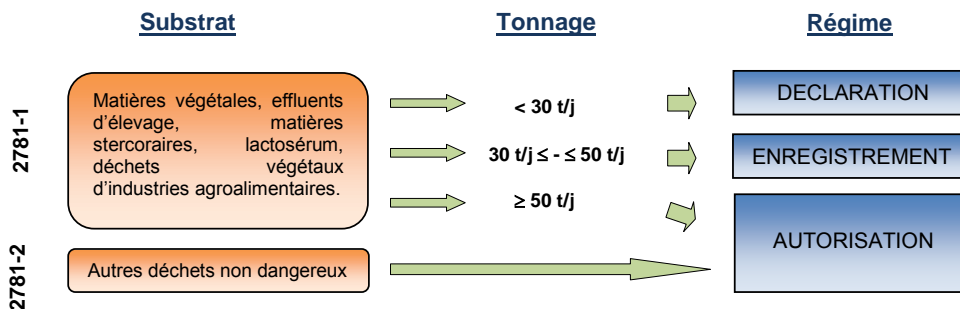
Plusieurs secteurs industriels ont recours à la méthanisation en particulier pour réduire la DCO (Demande Chimique en Oxygène) de leurs effluents en vue de les rejeter au milieu naturel. A noter que certaines industries, notamment vinicoles ou distilleries, fonctionnent de manière discontinue sur l'année, puisque l'apport en effluents survient principalement après les vendanges.

Nombre d'installations en 2011	80 installations opérationnelles réparties dans divers secteurs :												
	Secteur agroalimentaire traitant les produits indiqués ci-contre :	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Viandes (2 installations) ➤ Lait (fromage, lactosérum, eaux blanches, yaourts, glaces) (11 installations) ➤ Sucre, miel et friandises (6 installations) ➤ Boissons et alcools (7 brasseries, 18 exploitations vinicoles*, 4 distilleries et 1 industrie de fabrication de boisson non alcoolisée) ➤ Fruits, légumes et pommes de terre (7 installations) ➤ Amidon et additifs alimentaires (2 installations) 											
	Secteur de la chimie	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Industries chimiques et industries de production de biocarburants (13 installations), ➤ Industries pharmaceutiques (2 installations) 											
	Secteur des papeteries / cartonneries	➤ 7 installations											
4 installations de méthanisation d'effluents industriels sont en construction : 2 pour des industries de transformation de fruits et légumes, et 2 pour l'industrie vinicole.													
Traitement des intrants	Les intrants sont divers en fonction des secteurs.												
	Type de matériel	Nombre installations (sur 55 ayant décrit leurs procédés)											
	Broyeur	2 (transformation pomme de terre et industrie vinicole)											
	Presse	1 (industrie vinicole)											
	Hygiénisation	1 (abattoir)											
	Dégrilleur / tamiseur	24											
	Préchauffage entrants	18											
<i>D'autres procédés de traitement chimiques ou biologiques, comme le chaulage, la nitrification / dénitrification, l'ajustement de pH ou l'épuration aérobie peuvent compléter la méthanisation (en amont ou en aval) pour la dépollution des effluents.</i>													
Technologie du digesteur	Technologie du digesteur :	proportion générale	chimie	fruits/légumes	lait/formage	papeteries	pharmacie	sucre	brasserie	distillerie	effluents vinicoles	Secteurs	
		57	58	43	64	57	100	50	71	75	45	taux de réponse (%)	
		infiniment mélangé :	42	29	33	71	0	100	33	20	67	38	Proportions en %
		lit fixé :	11	14	67	0	0	0	33	0	33	0	
		lit fluidisé :	11	14	0	0	50	0	0	0	0	13	
	UASB :	36	43	0	29	50	0	33	80	0	50		
Température de la digestion	43/47 utilise la digestion mésophile 4/47 utilisent la digestion psychrophile												
Présence de gazomètre	29 installations sur 35 installations ayant répondu déclarent disposer d'un gazomètre (type non précisé)												
Traitement du biogaz	6/40 procèdent à une déshumidification 6/40 procèdent à une désulfuration 2/40 procèdent à un traitement des siloxanes.												
Traitement du digestat	14/36 procèdent à une séparation des phases liquides et solides (par centrifugeuse, décanteur, clarificateur, flottateur, presse à vis et/ou à bande). En général, les boues sont ensuite déshydratées et la phase liquide subit un traitement aérobie puis, est rejetée dans les milieux récepteurs ou envoyée en station d'épuration collective. 3 industries agroalimentaires compostent la phase solide du digestat.												
Composition du biogaz	55 à 87 % de méthane (moyenne : 73 % environ) <i>Données issues de 19 % des installations</i>												
Valorisation	Brulage en torchère ou chaudière	76											
	Electricité	4											

* les installations de méthanisation des effluents vinicoles sont les installations industrielles les plus nombreuses. Elles sont donc prises en exemple pour la construction du diagramme de fonctionnement.

Principaux textes / dispositifs réglementaires

Réglementation ICPE – Sont concernées par la rubrique 2781 (-1 et -2), les installations de méthanisation de déchets non dangereux ou matière végétale brute, à l'exclusion des installations de méthanisation d'eaux usées ou de boues d'épuration urbaines lorsqu'elles sont méthanisées sur leur site de production.



Concernant la combustion du biogaz, la rubrique **2910 C** peut aussi s'appliquer (si la puissance thermique maximale est supérieure à 0,1 MW) sous les trois régimes correspondants à ceux de la rubrique 2781. Le stockage du biogaz est régi par la rubrique **1411** et soumis à déclaration ou autorisation selon les quantités.

D'autres rubriques peuvent s'appliquer en fonction du secteur de l'industrie mais ne concerne pas spécifiquement la méthanisation ou l'utilisation du biogaz.

Le « **Règlement (CE) N°1069/2009**³⁷ peut concerner les filières industrielles méthanisant des sous- produits animaux (SPA). Il fixe des règles sanitaires ; ainsi, certains SPA (catégorie 1) ne peuvent être méthanisés et, impose aussi la demande d'un agrément sanitaire par les industries concernées.

Le digestat produit peut être valorisé en agriculture pour sa valeur fertilisante. En France, sans traitement additionnel, les digestats sont considérés comme des déchets et non des produits. Ils peuvent être cependant épandus dans le cadre d'un plan d'épandage et sous réserve de respecter les seuils réglementaires correspondants (arrêté du 02/02/98³⁸ modifié pour les ICPE ; arrêté du 3/04/00 pour les industries papetières³⁹ ; arrêtés du 15/03/99 et 3/05/00⁴⁰ pour les industries vinicoles).

Pour rentrer dans une logique produit, les digestats doivent être compostés et peuvent ainsi être homologués ou répondre aux **normes NFU 44-015**⁴¹ applicable aux déchets organiques issus de l'agriculture, l'élevage, l'industrie alimentaire, la restauration et l'entretien des espaces vert ou NFU-44-095 applicable aux composts issus du traitement des eaux (ex : boues de stations d'épuration urbaines mais aussi industrielles). Ces normes définissent des seuils pour des microorganismes pathogènes, métaux, HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques) et PCB (Polychlorobiphényles).

Concernant la santé des salariés des différents secteurs industriels pouvant procéder à la méthanisation, elle relève du régime général et est donc suivie par la Caisse Nationale de l'Assurance Maladie des Travailleurs Salariés (CNAMTS). Celle-ci coordonne les organismes du réseau des branches maladie et accidents du travail - maladies professionnelles, soit les caisses primaires d'assurance maladie (CPAM) et caisses d'assurance retraite et de la santé au travail (CARSAT, ex CRAM). La CNAMTS élabore des statistiques par secteur d'activité ou code CTN. Aucune statistique n'est cependant spécifiquement disponible pour les filières industrielles concernées ici. Aussi les statistiques nationales du régime général, tous les CTN confondus sont considérées.

³⁷ Règlement (CE) N°1069/2009 du parlement Européen et du conseil du 21 octobre 2009 établissant des règles sanitaires applicables, à compter du 4 mars 2011, aux sous-produits animaux et produits dérivés non destinés à la consommation humaine

³⁸ Arrêté du 02/02/98 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation

³⁹ Arrêté du 03/04/00 relatif à l'industrie papetière

⁴⁰ Arrêté du 03/05/00 relatif aux prescriptions applicables aux Installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation sous la rubrique 2251 (Préparation, conditionnement de vin, la capacité de production étant supérieure à 20 000 hl/an). L'arrêté du 15 mars est le même que celui du 03/05/00 mais applicable aux installations soumises à déclaration.

⁴¹ Une autre norme est disponible : NFU 44-095 applicable aux composés à base de boues.

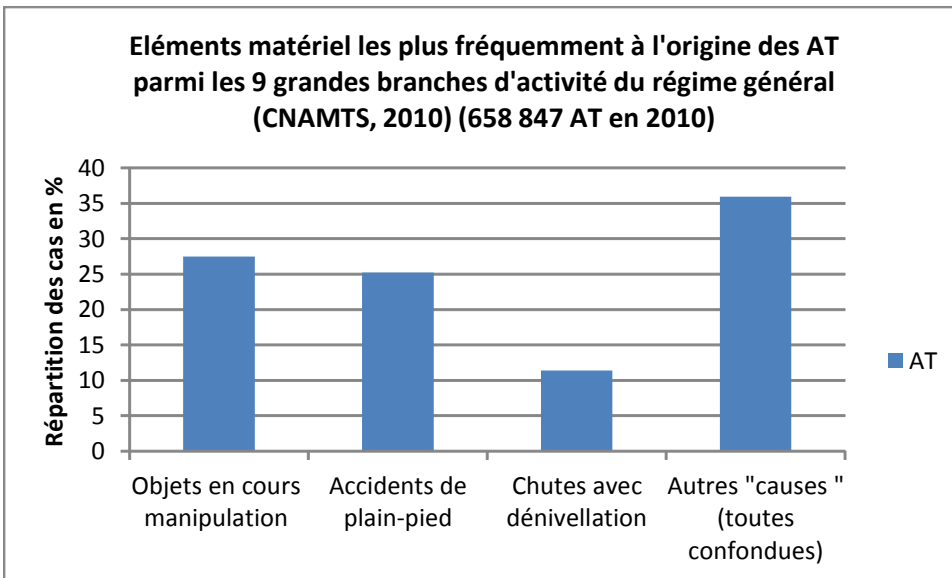
Données sur les ATMP (Accidents du Travail – Maladies Professionnelles) tous les secteurs du régime général confondus (Source : CNAMTS, 2010)

Parmi les données disponibles à ce jour, la production de biogaz n'est jamais mentionnée.

En 2010, 658 847 accidents du travail ont été recensés chez les salariés des 9 branches d'activité étudiées par la CNAMTS (sur 18 299 717 salariés).

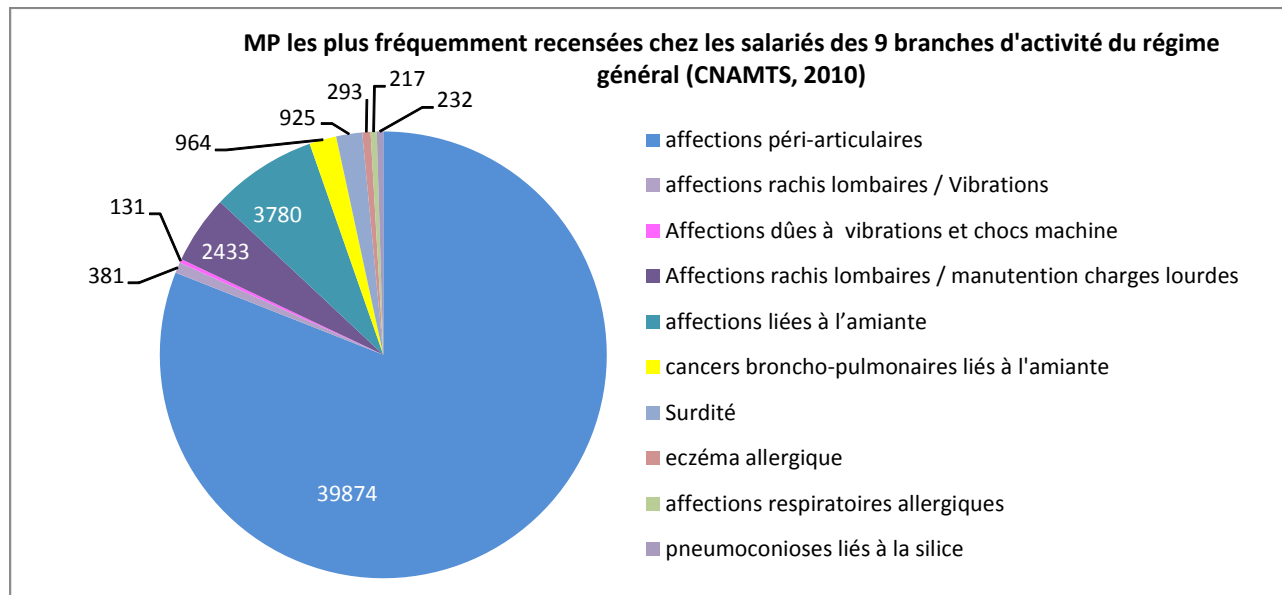
Les principales causes sont : des objets en cours de manipulation (27 % des cas), des accidents de plain-pied (25 % des cas) et des chutes avec dénivellation (11 % des cas).

Douleurs / lumbagos, contusions, plaies et entorses sont les types de lésions les plus fréquemment rencontrés (dans plus de 10 % des AT).



En 2010, 50 688 maladies professionnelles ont aussi été recensées chez les salariés des 9 branches d'activité étudiées par la CNAMTS. Les troubles musculo-squelettiques (TMS) représentent 85 % des MP. Ils rassemblent plusieurs tableaux :

- affections péri articulaires dues à des gestes et postures (39 874 cas),
- affections dues aux vibrations / chocs d'outils ou de machines (131 cas),
- affections rachis lombaire consécutives aux vibrations (381 cas),
- affections consécutives à la manipulation de charges lourdes (2 433 cas),
- lésions chroniques des ménisques (422 cas).



Parmi les autres MP recensées dans plus de 100 cas en 2010, on trouve les affections liées à l'amiante (3 780 cas), les cancers broncho-pulmonaires aussi liés à l'amiante (964 cas) ; la surdité (925 cas) ; des eczéma allergiques (293 cas), des affections respiratoires allergiques (217 cas) et des pneumoconioses liées à la silice (232 cas).

A noter que dans le secteur de l'agroalimentaire, les TMS représentent 95 % des MP. Un salarié de ce secteur a 2 fois plus de risques de déclarer un TMS que les salariés des autres secteurs (Aravis et al., 2011). Cette observation concerne a priori les activités de production des industries agroalimentaires et non pas la méthanisation proprement dite.

Données sur les accidents / incidents recensés dans les filières de méthanisation industrielle

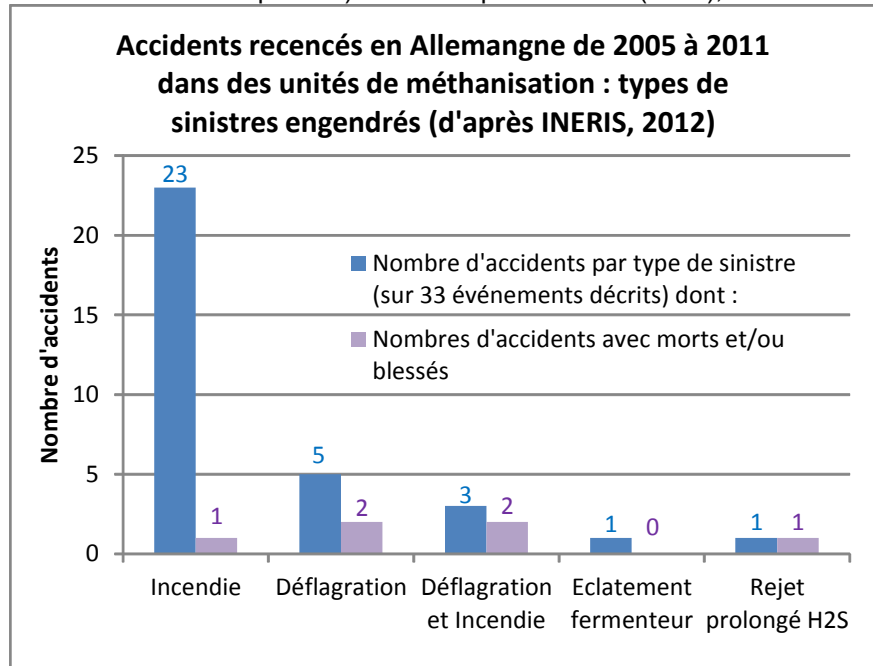
Données issues d'un retour d'expérience mené par l'INERIS (2012) :

L'INERIS a mené, en 2011 et 2012, une analyse sur l'accidentologie en France et en Allemagne des procédés de méthanisation, et de leurs exploitations. Ce retour d'expérience a mis en évidence la difficulté à recueillir des informations sur les incidents et accidents dans les deux pays.

Il apparaît cependant que certaines unités fonctionnelles (centrales de cogénération, systèmes d'injection des solides, pompes, tuyaux, vannes et agitateurs) sont particulièrement vulnérables entraînant des défaillances en termes de sécurité telles que des fuites ou la perte de confinement. Ces conclusions se rapportent à l'ensemble des filières de production de biogaz.

Sur 33 accidents survenus en Allemagne de 2005 à 2011 dans des installations de méthanisation (*a priori* principalement du secteur agricole mais non clairement précisé) et décrits par l'INERIS (2012), les sinistres recensés sont des incendies (23 cas), des déflagrations (5 cas), des déflagrations et incendies (3 cas), 1 éclatement de fermenteur et un rejet prolongé d'H₂S.

Les principales conséquences sont des dommages matériels mais dans certains cas, il y a eu des morts et/ou blessés. Le rejet prolongé d'H₂S (Usine de Rhadereistedt en 2005) a notamment engendré quatre morts, un blessé grave et dix pompiers blessés. La cause du sinistre était le mélange de déchets laitiers et animaux à faible pH et à 60 °C ayant provoqué une forte émanation d'H₂S, libéré en raison d'un couvercle ouvert dans la salle de réception, ventilée trop faiblement.



A noter que d'après la LSV (organisme d'assurance sociale allemand), 140 accidents en 2009 ont été recensés sur des installations produisant du biogaz en Allemagne (soit dans près de 3 % des installations) (rapporté par INERIS, 2012).

L'INERIS (2006, 2012) mentionne également les incidents suivants :

- débordement du méthaniseur (estimation de 3 à 4 cas en Allemagne par an),
- gel des soupapes du méthaniseur (recensés plusieurs fois sans précision du nombre), celles-ci n'étant donc plus en état de fonctionner. Ces soupapes constituent une mesure de maîtrise des risques,
- envol de la membrane souple d'un méthaniseur industriel (1 cas) : libération du biogaz stocké,
- surpression à l'intérieur du méthaniseur (1 cas en Allemagne, 1 cas en Espagne). Dans un cas, l'accumulation de matières plastiques a engendré la formation d'une couche étanche à la surface de la phase liquide ; la digestion s'est poursuivie sous celle-ci, ayant conduit à l'éclatement du méthaniseur.

Suite à ce retour d'expérience, les principaux phénomènes dangereux des filières de méthanisation à considérer ont été classés par l'INERIS, par ordre de priorité en terme de probabilité d'occurrence :

- les incendies,
- les explosions,
- l'émission imprévue de toxiques gazeux (H₂S) dans des zones confinées mal ventilées (avec risque d'intoxication humaine).

Autres bases de données :

La base **EPICEA**⁴² de l'INRS ne décrit, à ce jour, aucun accident/événement impliquant une installation de méthanisation industrielle.

⁴² EPICEA est une base de données nationale gérée par l'INRS (Institut Nationale de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles) rassemblant plus de 18 000 cas d'accidents du travail survenus, depuis

Depuis 1990, dans la base de données **ARIA**⁴³ du BARPI, 7 accidents s'étant produits dans des installations industrielles recourant à la méthanisation, sont actuellement recensés.

Ces événements sont intervenus dans des industries :

- de fabrication de papier / carton (3 cas) : 2 explosions liées à un mélange de biogaz et d'air et 1 pollution du milieu aquatique liée à une baisse de rendement du méthaniseur ont été recensées,
- de transformation de pommes de terre (2 cas) : des fuites sur un digesteur en acier liées à la corrosion et des fuites au niveau d'un bassin de lagunage et d'une chambre de vannes de canalisations ont été observées,
- chimiques (2 cas) : 1 mauvais dimensionnement / tarage d'une soupape située entre un turbocompresseur de l'atelier de fabrication d'ammoniac et le méthaniseur a engendré le desserrage de bride puis une explosion ; un incendie s'est déclaré suite à une rupture de joint sur une bride de canalisation de l'unité de méthanisation.

Mot-clé : biogaz



N°41671 - 23/01/2012 - FRANCE - 62 - HARNES

C10.31 - Transformation et conservation de pommes de terre

Une fuite se produit sur un digesteur de co-produits d'une usine de frites surgelées et de flocons de pomme de terre. Les co-produits méthanisés dans le digesteur sont constitués pour 53 % d'amidon gris (mélange d'amidon cuit et de matières organiques non solubles provenant de la décantation des eaux de process), 30 % de pelures de pommes de terre, 8 % de déchets de purée, 9 % de déchets de frites et 0,2 % de graisse provenant du nettoyage des friteuses. Le biogaz généré est utilisé comme combustible dans les chaudières du site. Ce digesteur de 7 000 m³, de forme cylindrique, mesure 20 m de haut pour un diamètre de 21,5 m. Son calorifugeage maintient le digestat à une température optimum pour la production de méthane.

Le 18/01, l'exploitant constate une fuite de 2 m³/h sur le digesteur à environ 16 m de haut. Le digestat qui coule le long de la paroi, se déverse dans l'égoût le plus proche orientant l'effluent dans la station d'épuration où il est traité. La hauteur de liquide dans le digesteur est de 18 m, la partie supérieure constituant le ciel gazeux contenant le méthane. L'exploitant arrête l'alimentation du digesteur en co-produits, met en place une nouvelle filière d'élimination de ces derniers (environ 300 t/j) et baisse le niveau de liquide vers 15 m par soutirage du digestat, stoppant ainsi la fuite. Au moyen d'une nacelle, il retire le calorifuge au niveau de la fuite et découvre une fissure dans la tôle métallique du digesteur. Le sol n'étant pas étanche entre celui-ci et le caniveau, du digestat s'est répandu sur la zone de schiste non imperméabilisée.

L'inspection des IC demande à l'exploitant de fournir un rapport d'incident détaillé, de proposer une solution pour récupérer les égouttures et de justifier le bon état du digesteur.

Après vidange et inertage de ce dernier, l'exploitant retire la partie supérieure également appelée toit ainsi qu'une série de tôles suivant une verticale. Il s'avère que la partie intérieure des tôles présente une corrosion généralisée. Le digesteur a été construit avec des tôles d'épaisseurs différentes : 12 mm en point bas, plus que de 3 mm au point haut avec des épaisseurs de 10, 8, 6, 5 et 4 mm pour les tôles intermédiaires ; 13 mesures d'épaisseur sur 2 verticales différentes sont réalisées. Ces 26 mesures montrent que la perte d'épaisseur est en moyenne de 2,6 mm et permettent de comprendre pourquoi la fuite s'est produite en partie haute.

Au vu de l'aspect anormal de cette usure prématurée, l'exploitant émet l'hypothèse de la présence de bactéries sulfato-réductrices qui auraient corrodé les tôles en acier et commande une expertise technique pour mieux comprendre les raisons qui auraient conduit à l'apparition et au développement de cette corrosion. L'inspection des IC demande à l'exploitant de lui faire parvenir les conclusions de l'expertise une fois celles-ci connues.



N°36683 - 27/02/2007 - FRANCE - 33 - BIGANOS

C17.12 - Fabrication de papier et de carton

Dans une papeterie, une explosion survient vers 22h au niveau de la station de traitement biologique des effluents aqueux. Les toits de la cuve de conditionnement et du méthaniseur sont projetés à plusieurs dizaines de mètres. Le souffle de l'explosion a brisé des vitres jusqu'à une centaine de mètres et le bruit aurait été perçu jusqu'à une vingtaine de kilomètres. L'accident n'a fait aucune victime et aucun impact sur l'environnement. En particulier, aucune pollution des eaux, n'est à déplorer dans la mesure où l'atelier alimentant la station en effluents était à l'arrêt.

L'injection de peroxyde d'hydrogène à la suite d'une opération de vidange, aurait créé un dégagement d'oxygène qui réagissant avec le biogaz encore présent serait à l'origine de l'explosion. Toutefois, en l'état actuel des investigations, les causes exactes de l'explosion n'ont pas pu être déterminées.

L'inspection des IC propose au préfet un arrêté qui demande à l'exploitant les mesures prises pour assurer la mise en sécurité de l'installation. Cet arrêté fixe également des prescriptions visant à garantir la qualité des rejets aqueux en l'absence de traitement biologique et surbordonne le redémarrage de la station biologique à la réalisation d'une analyse de l'accident et d'une étude des dangers de l'installation de traitement des effluents.



N°9065 - 07/01/1999 - FRANCE - 73 - LA ROCHETTE


C17.12 - Fabrication de papier et de carton


Dans une unité de recyclage de biogaz issu de la station d'épuration anaérobie d'une papeterie, une explosion (5 kg de TNT) détruit une boudruche tampon en matériau souple de 10 m³ et les tuyauteries associées alimentant une chaudière de production de vapeur ou une torchère de sécurité. La boudruche est pulvérisée, des rambardes sont tordues dans un rayon de 3 m, des tuiles sont détruites dans un rayon de 20 m, des bardages sur l'unité et vitres jusqu'à 130 m de distance volent en éclat. Il n'y a pas de victime. La boudruche se serait bloquée en descente et mise en dépression. De l'air serait alors entré par les joints en téflon frottant sur l'axe central. Le biogaz arrivant à nouveau formé le mélange explosif qui est allumé par la flamme de la veilleuse de la torchère. Une production accidentelle d'hydrogène dans le méthaniseur et un acte de malveillance sont également évoqués. L'usine porte plainte. Des expertises sont réalisées. Des sécurités sont installées (analyseurs, clapets, etc.).


1990, à des salariés du régime général de la Sécurité sociale. Ces accidents sont mortels, graves ou significatifs pour la prévention. <http://www.inrs.fr/accueil/produits/bdd/epicea.html> ; consulté le 02/10/2012


⁴³ La base ARIA (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents) recense les incidents ou accidents qui ont, ou auraient, pu porter atteinte à la santé ou la sécurité publiques, l'agriculture, la nature et l'environnement. Elle est gérée par le BARPI (Bureau d'Analyse des risques et Pollutions Industriels) au sein de la Direction Générale de la Prévention des Risques du Ministère du développement durable. <http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/index.html> ; consulté le 02/10/2012

Mot-clé : méthanisation (hors redondance avec précédente recherche)



N°32817 - 29/11/2006 - FRANCE - 77 - GRANDPUITS-BAILLY-CARROIS
C20.15 - Fabrication de produits azotés et d'engrais
 Dans une usine chimique, une explosion et une fuite enflammée se produisent au niveau de la bride d'une soupape sur le turbocompresseur de l'atelier de fabrication d'ammoniac (NH3) en cours de redémarrage. Les détecteurs hydrogène et l'alarme incendie alertent la salle de contrôle qui met aussitôt l'atelier en sécurité. L'équipe d'intervention éteint rapidement le sinistre. Le POI n'est pas déclenché.
 L'accident ne fait pas de victime, l'opérateur présent à proximité ayant pu fuir juste avant l'explosion, après avoir entendu le sifflement dû au rejet de gaz de synthèse composé à 70 % d'hydrogène (débit de 15 000 Nm³/h). Les conséquences matérielles concernent l'environnement direct du turbocompresseur : cablages électriques, bardages fondus, calorifuge de canalisations fortement endommagé... L'unité de fabrication d'ammoniac sera arrêtée pendant plus d'un mois.
 Cinq jours avant l'accident, un problème lié au défaut d'absorption de CO2 au niveau de la colonne de décarbonation de l'unité de production de NH3 alors en redémarrage conduit les opérateurs à ouvrir la mise à l'air en aval de la colonne avant le déclenchement de la sécurité de température haute. Cette mise à l'air trop importante (erreur opératoire), entraîne la chute de la pression d'aspiration du turbocompresseur de synthèse de NH3 et l'activation de l'arrêt d'urgence de l'atelier. La soupape sur la ligne entre le turbocompresseur et le réacteur de méthanisation est alors sollicitée sur pression haute et s'ouvre sans que les opérateurs ne le remarquent.
 Les jours suivants, la production reprend mais un bilan des gaz de synthèse anormal conduit l'exploitant à mener de plus amples investigations et découvre que la soupape précédemment sollicitée n'est plus étanche : elle laisse s'échapper les gaz via une cheminée haute de 47 m. L'atelier est arrêté une nouvelle fois pour permettre le remplacement de la soupape incriminée.
 L'unité redémarre une nouvelle fois. L'amorçage de la réaction de méthanation intervient à 22 h ; le turbocompresseur de synthèse démarre à 1h30 ; l'accident se produit à 3h14 sur la bride de la soupape nouvellement en place (diamètre 6" soit environ 150 mm).
 L'accident serait dû à un sous-tarage de la soupape qui, sollicitée lors du démarrage, aurait "battu", entraînant des vibrations à l'origine du desserrage rapide des écrous de la bride. Par ailleurs, ceux-ci étaient vraisemblablement insuffisamment serrés. Le défaut de traçabilité des opérations de jointage (couple de serrage) est également mis en avant.
 Au titre du retour d'expérience, la société en charge du retarage des soupapes devra faire l'objet d'un agrément par le service inspection de l'usine, les procédures de jointage sont améliorées, les cahiers des charges concernant le jointage et la révision des soupapes sont renforcés, un capteur de pression supplémentaire est mis en place...



N°30686 - 16/08/2005 - FRANCE - 72 - AUBIGNE-RACAN
C17.21 - Fabrication de papier et carton ondulés et d'emballages en papier ou en carton
 La STEP d'une papeterie rejette des effluents bruts dans le LOIR en étiage, à la suite d'un dysfonctionnement du méthaniseur (chute du rendement à 30 %). Les effluents subissent habituellement un traitement physico-chimique (dégrillage, dessablage, bassin d'acidogénèse), une méthanisation puis un traitement biologique. L'inspection estime la pollution rejetée à 400 kg de MES, 10,5 t de DCO, 4,5 t de DBO, 80 kg de P et 10 kg de N. L'usine produit du papier recyclé destiné à la fabrication de carton ondulé. Alertée par l'exploitant le 16 août, l'inspection des installations classées effectue une enquête le jour même. Le dysfonctionnement du méthaniseur aurait pour origine des travaux dans l'atelier de trituration de l'usine, où s'effectue la 1ère étape de mise en pâte des fibres 'secondaires'. Pour respecter les normes de sécurité dans cet atelier durant l'intervention, l'exploitant a couvert certains équipements générateurs d'H2S, modifiant ainsi la qualité des effluents à traiter. La biolite présente dans le méthaniseur aurait alors fixé une grande quantité de soufre et altéré son fonctionnement. A la suite de l'accident, l'exploitant réduit les consommations d'eau et fait fonctionner la station en mode dégradé durant 1 semaine. Après le traitement physico-chimique, les effluents sont épurés dans 3 filières différentes : traitement habituel (25 m³/h), traitement biologique direct (30 m³/h) ou épandage (20 m³/h). En complément des deux 1ères filières, les effluents sont traités à la craie coccolithique et légèrement chlorés avant leur rejet au milieu naturel, pour limiter le développement de bactéries filamenteuses. L'administration constate les faits et propose au préfet que l'épandage soit prescrit par un arrêté de mesures d'urgences.



N°21128 - 27/08/2001 - FRANCE - 51 - MATOUGUES
C10.31 - Transformation et conservation de pommes de terre
 Des fuites sont détectées sur un bassin de lagunage anaérobie (méthanisation) d'une station d'épuration d'effluents d'une usine agro-alimentaire de frites. Ces fuites se situent dans un regard de contrôle de l'étanchéité entre les 2 membranes constituant le fond et les parois du bassin, ainsi que dans une chambre de vannes de canalisations de recyclage des boues, par percolation au travers des parois. Un arrêté préfectoral de mesures d'urgence impose à l'exploitant l'arrêt du remplissage du bassin et demande de proposer sous 3 jours à l'inspection des IC et aux services chargés de la police des eaux les mesures nécessaires pour vider le bassin en respectant les contraintes de rejet dans la MARNE. Un diagnostic de la pollution et la définition des solutions à employer pour y remédier sont également demandés.


N°2174 - 25/08/1990 - FRANCE - 59 - DUNKERQUE
C20.14 - Fabrication d'autres produits chimiques organiques de base
 Dans une usine pétrochimique, un incendie se déclare sur l'unité de méthanisation (95% H2 + 5% CO --supérieur à CH4 + H2 + H2O) d'un vapocraqueur. Une rupture de joint sur une bride du circuit est à l'origine de l'accident. Aucune victime n'est à déplorer. Le POI est déclenché.

Dans des secteurs industriels particuliers (effluents vinicoles, transformation de viande, commerce d'animaux et récupération de déchets alimentaires triés en vue de la fabrication de denrées pour les animaux), des incidents ayant provoqué des asphyxies, intoxications à l'hydrogène sulfuré sont aussi recensés dans la base de données ARIA (6 cas depuis 1992).


N°36228 - 05/06/2009 - FRANCE - 47 - SAINT-SERNIN
A01.21 - Culture de la vigne
 Un apprenti de 20 ans est retrouvé mort au fond d'une cuve à vin de 5 m de haut dans une exploitation vinicole. D'après la presse, le jeune homme, sur une plateforme en surplomb, nettoiyait la cuve par une ouverture large d'une cinquantaine de centimètres. L'inspection du travail effectue une expertise. L'autopsie de la victime fait état d'un décès par asphyxie.


N°25524 - 05/09/2003 - FRANCE - 13 - ROUSSET
C11.01 - Production de boissons alcooliques distillées
 Une émanation de gaz de nature indéterminée se produit lors de l'ouverture d'un trou d'homme dans une coopérative vinicole. Une personne meurt par asphyxie et 7 autres sont intoxiqués dont 3 pompiers.


N°3681 - 09/06/1992 - FRANCE - 72 - VIBRAYE
C10.11 - Transformation et conservation de la viande de boucherie
 Des déchets d'animaux stockés dans une fosse fermentent durant les 3 jours de fermeture d'un abattoir. L'hydrogène sulfuré qui se forme intoxique mortellement 2 personnes et gravement 2 autres employés.

N°17761 - 05/05/2000 - FRANCE - 74 - ALLONZIER-LA-CAILLE
 G46.23 - Commerce de gros d'animaux vivants
 Une jeune employée d'un cabinet d'études effectuant depuis 15 jours des prises d'échantillons d'eaux usées dans une usine d'équarrissage décède par asphyxie et oedème pulmonaire 5 min après être descendue dans un regard de 2 m de profondeur et situé à 100 m de l'établissement. Les secours mesureront une concentration en hydrogène sulfuré supérieure à 120 ppm, soit plus de 10 fois le seuil admis par la législation du travail pour une exposition de 15 min. Le parquet effectue une enquête pour préciser les causes et les circonstances exactes de l'accident. Le regard est condamné dans l'attente des conclusions des enquêtes en cours. L'établissement n'avait pas de plan d'intervention (accueil, prévention, sécurité, consignes d'intervention, etc.) destiné aux intervenants extérieurs et notamment de permis ou procédure pour pénétrer et travailler en milieu confiné. La victime n'avait pas de tenue étanche.

N°11275 - 16/05/1997 - FRANCE - 59 - HAUTMONT
 E38.32 - Récupération de déchets triés
 Dans un centre de récupération de déchets alimentaires huileux destinés à la fabrication de matières grasses pour l'alimentation animale, des émanations d'hydrogène sulfuré intoxiquent 4 employés nettoyant une fosse non utilisée depuis de nombreuses années et contenant des résidus de boues huileuses. Les victimes sont hospitalisées ; 2 d'entre elles dans un état grave resteront sous surveillance plusieurs jours. L'établissement qui emploie 13 salariés suspend ses activités.

Dans la base EPICEA de l'INRS, deux cas d'intoxications liées à l'H₂S sont aussi recensés : un cas dans une papeterie et un autre dans un abattoir.

Résumé de la recherche simple	
Mot ou expression (tous les termes)	H2S
Documents de la recherche triés par numéro de dossier (9 dossiers)	
Numéro du dossier :	7521 sélection <input type="checkbox"/>
Comité technique national :	F - Bois, ameublement, papier-carton, textile, vêtements, cuirs et peaux, pierres et terres à feu
Code risque entreprise :	211CE - Fabrication de papier associé ou non à une transformation
Matériel en cause :	130118 - Autre citerne
Résumé de l'accident :	La victime est un gouverneur de pulper âgé de 21 ans. Cinq personnes ont été intoxiquées en pénétrant dans un local en rez-de-chaussée comportant des cuiviers de stockage de pâte à papier, dans une papeterie utilisant du papier recyclé comme matière première. De la pâte à papier avait séjourné plus d'un mois dans la tour de macération d'une ligne de désencrage momentanément arrêtée. C'est au cours des opérations de redémarrage de cette ligne que l'accident est survenu. Lors du transfert de cette pâte dans un cuvier, une fuite s'est produite par un orifice de vidange mal refermé (joint plein boulonné). C'est sans doute en voulant intervenir pour identifier et faire cesser cette fuite que la première victime, gouverneur de pulper, s'est trouvée intoxiquée probablement par du H ₂ S. Elle est restée inanimée au pied du cuvier. Le local en rez-de-chaussée comportait des ouvertures qui normalement étaient fermées. L'accès se faisait par un escalier depuis le reste de l'installation en étage. Quatre autres personnes (une puis trois) ont été à leur tour intoxiquées en voulant porter secours. Des mesures faites par les pompiers à l'aide d'un appareil portatif, dans l'heure suivant l'accident (après fermeture momentanée des portes), indiquèrent une concentration de 400 ppm de sulfure d'hydrogène (H ₂ S).
Numéro du dossier :	11847 sélection <input type="checkbox"/>
Comité technique national :	D - Services, commerces et industries de l'alimentation
Code risque entreprise :	151CA - Production de viandes de volailles
Matériel en cause :	490203 - Accumulation, concentration d'autres gaz
Résumé de l'accident :	La victime - un ouvrier de 32 ans - était occupée à nettoyer le tunnel central du biofiltre de l'atelier de traitement des sous-produits d'abattage de volailles, ceci en compagnie de deux autres collègues. Le début du récurage s'est effectué par l'utilisation de jet haute pression. Les déchets solides (petits gravats, déchets graisseux, boue etc.) ont été raclés à la pelle et poussés vers l'extrémité du tunnel en vue de leur évacuation ultérieure. Selon toute vraisemblance, des quantités importantes de sulfure d'hydrogène (H ₂ S) se sont libérées pendant le récurage, provenant de la décomposition des matières organiques stagnantes dans l'eau depuis sept jours. Les ouvriers ont mis un masque pour continuer leur travail. La victime, à un moment donné, a retiré le sien pour nettoyer ses lunettes. A ce moment-là, elle a eu un malaise et est tombée. L'un de ses collègues l'a traînée jusqu'au bout du tunnel, pendant que l'autre est parti chercher du secours. Ces deux collègues qui se trouvaient avec la victime dans le tunnel, ont eu un malaise aussi par la suite. Ils ont été transportés tous les trois à l'hôpital.

Données sur les postes de travail dans la filière méthanisation industrielle

A noter : des informations sur les postes de travail et le temps passé sont recherchées dans le but d'évaluer l'exposition des opérateurs.

Aucune information détaillée n'a pu être recueillie sur les postes de travail et le temps nécessaire aux exploitants pour assurer le suivi et la maintenance des installations de méthanisation industrielle.

Des visites, rondes de routine sont probablement effectuées quotidiennement comme dans le cas d'autres filières. Par exemple, d'après un professionnel du secteur de la méthanisation des boues de stations d'épuration, des opérations telles que des purges de circuits sont réalisées 2 à 3 fois par jour et ne durent que quelques minutes.

En 2013, des données devraient être disponibles suite à l'appel d'offre lancé par l'ADEME en 2011 concernant le suivi technique, économique, environnemental et social d'installations de méthanisation à la ferme, centralisées, industrielles et en station d'épuration.

Données sur la composition des substrats et digestats des filières de méthanisation industrielle ; effets de la digestion anaérobie sur les micropolluants inorganiques, organiques et microorganismes pathogènes

Eléments traces métalliques (ETM) et micropolluants organiques dans les substrats et digestats

Le rapport de l'ADEME (2005) fournit des données de composition moyenne de boues agroindustrielles de fabrication d'aliments et de boues papetières. Les ordres de grandeurs en ETM sont les suivants :

- de 0,2 à 1 mg/kg MS pour le cadmium et le mercure,
- de 3,7 mg/kg MS pour le sélénium (uniquement renseigné pour les premières boues)
- de 10 à 14 mg/kg MS pour le nickel et le plomb,
- de 28 à 34 mg/kg MS pour le chrome,
- de 57 à 61 mg/kg MS pour le cuivre,
- de 135 à 199 mg/kg MS pour le zinc.

Les valeurs maximales sont parfois bien plus élevées (ex : zinc mesuré à 1 815 mg/kg MS).

S'agissant des molécules organiques, les valeurs moyennes varient de quelques dizaines à quelques centaines de µg/kg MS notamment dans les boues agroindustrielles.

Composition moyenne de boues agroalimentaires issues de la fabrication d'aliments (hors abattoirs et industries sucrières) (ADEME, 2005).

Eléments	Moyenne	Mini	Maxi
MS (% MB)	12	1,3	91
rapport C/N	7	3,6	43
pH	7	2,3	13
Valeur agronomique (mg/kg MS)			
MO (% MS)	58	25	93
N-TK	3,5	0,7	12
N-NH ₄	0,5	0,03	4
P	1,0	0,04	7
K	1,2	0,08	13
Ca	7	0,9	40
Mg	0,4	0,02	2,4
S	0,8	0,16	0,6
Na	0,7	0,30	1,4
Oligo-éléments (mg/kg MS)			
Fe	1 042	780	1305
Mn	32	20	45
Mo	15	7,9	23
B	23	11	42
Co	0,4	0,1	0,8
ETM (mg/kg MS)			
Cd	0,8	0,01	10
Cr	28	0,05	240
Cu	57	0,10	379
Hg	0,2	<0,01	8
Ni	14	0,10	154
Pb	10	0,10	250
Se	3,7	0,35	6
Zn	199	0,10	1 815
CTO (mg/kg MS)			
Fluoranthène	0,2	0,01	0,3
Benzo (b) fluoranthène	0,04	0,01	0,05
Benzo (a) pyrène	0,04	0,01	0,06
7 PCB	0,07	0,02	0,21

Composition moyenne de boues papetières en mélange (ADEME, 2005).

Eléments	Moyenne	Mini	Maxi
MS (% MB)	32	2	65
rapport C/N	78	12	200
pH	7	4	9
Valeur agronomique (mg/kg MS)			
MO (% MS)	64	19	90
N-TK	1,3	0,4	5
N-NH ₄	0,02	0	0,3
P	0,3	0,09	3
K	0,2	0,05	0,7
Ca	9	0,4	14
Mg	0,6	0,01	4
S	0,5		
ETM (mg/kg MS)			
As	<8		
Cd	1	0	4
Cr	34	< 1	44
Cu	61	2	349
Hg	0,2	< 0,01	1,4
Ni	12	< 1	32
Pb	13	< 1	83
Zn	135	1,3	330
CTO (mg/kg MS)			
Fluoranthène	<0,05	0,01	<0,1
Benzo (b) fluoranthène	<0,02	<0,005	0,04
Benzo (a) pyrène	<0,02	<0,005	0,03
7 PCB	<0,5	0,002	<1

S'agissant des effluents vinicoles, peu de données sont disponibles concernant leur composition en micropolluants. Ils correspondent à l'ensemble des rejets d'eaux usées chargées de matières organiques qui proviennent de l'activité vinicole, depuis les opérations de récolte des raisins jusqu'à la mise en bouteilles. Ils contiennent des particules organiques (sucres, alcool, tanins, glycérol...) et des éléments fertilisants

(azote, phosphore, et surtout potasse). Ils sont également constitués de matières en suspension : débris végétaux, pépins, microorganismes, matières colloïdales... et peuvent aussi contenir des résidus de traitements phytosanitaires et de produits de lavage et désinfection. Il existe une grande variabilité des effluents vinicoles en fonction de la saison et des établissements (Trossat *et al.*, 2003).

Les micropolluants inorganiques ne sont pas dégradés par les processus de fermentation anaérobie : ils se trouvent concentrés dans les digestats. En sortie de digesteur, les métaux sont effectivement accumulés dans la phase solide de l'effluent (Couturier *et al.*, 2000 ; ADEME 2011). Leur spéciation (et donc leur biodisponibilité et toxicité) peut toutefois évoluer au cours des processus mais reste peu documentée.

Les niveaux moyens en ETM relevés dans l'étude ADEME (2011) dans les digestats d'industries agroalimentaires sont fournis ci-dessous. *A noter que ces digestats ne sont pas issus des boues pour lesquelles les valeurs moyennes sont fournies par l'ADEME (2005) et présentées ci-dessus. Les niveaux sont cependant comparables.*

D'après l'étude ADEME (2011), les teneurs en ETM dans les digestats issus des déchets agricoles et matières végétales sont en grande majorité inférieures aux limites de la Norme NFU 44-051. Les quelques teneurs supérieures à ces limites en cuivre et en zinc ont été observées sur des digestats de lisiers porcins et ou de substrats d'industries agroalimentaires (IAA) en provenance de l'activité viticole.

Lestingi *et al.* (2012) fournissent aussi des résultats pour des digestats issus du traitement des eaux usées d'un processus de production de vin et d'une industrie transformant des produits surgelés (*cf.* ci-dessous).

Concentrations en ETM mesurées dans des digestats issus de la méthanisation en industries agroalimentaires (en mg/kg MS) (ADEME, 2011)

ETM	Niveaux moyens*	seuils NFU 44-051
Cu	353,5	300
Zn	237	600
Cd	0,69	3
Pb	10,74	180
Hg	0,14	2
Ni	20,45	60
Cr	36,14	120

Concentrations en ETM mesurés dans des digestats issus de deux procédés de méthanisation industrielles (en mg/kg MS) (Lestingi *et al.*, 2012)

	production de vin	transformation de produits surgelés
Zn	73,3	269
Cu	682	106
Ni	11,7	23,7
Cr	20,6	50,5
Pb	<1	<1

* sur la base de 20 ou 21 échantillons sauf pour le mercure (11 échantillons)

Concernant les micropolluants organiques, quelques travaux rapportés par l'ADEME (2011) ont démontré un potentiel de biodégradation des HAP, nonylphénols et PCB présents dans les boues urbaines lors de la méthanisation. Cependant le nombre de données est encore limité et les résultats parfois contradictoires. De façon générale, les teneurs en ces molécules dans les digestats semblent plus influencées par les teneurs initiales dans les boues que par le métabolisme, la température de méthanisation ou la biodisponibilité des molécules. Il est probable que ces observations puissent être étendues aux autres types de substrats que les boues urbaines.

Concentrations en HAP et PCB dans des digestats agricoles dont a priori certains sont issus d'industries agroalimentaires – seuils de la NFU 44-051 – en µg/kg MS (ADEME, 2011).

	Résultats moyens d'analyses de digestats agricoles français (18 pour les HAP - 9 pour les PCB) (ADEME, 2011)	Seuils NFU 44-051
fluoranthène	8,48	4000
benzo(f)fluoranthène	8,44	2500
benzo(a)pyrène	8,415	1500
somme 7 PCB	70,72	non requis
PCB 52	20,56	(800 par la
PCB 138	70,78	NFU 44-095)

Les teneurs moyennes relevées en HAP et PCB dans des digestats agricoles, dont certains sont *a priori* issus d'industries agroalimentaires (ADEME, 2011), sont autour de 8 µg/kg MS pour les premiers et de 21 à 71 environ pour les seconds.

D'après Couturier *et al.* (2000), de manière générale, les composés organiques vont se trouver dégradés par les

processus en composés en général moins toxiques mais peuvent également être à l'origine de composés ayant des effets néfastes (H₂S notamment). Les auteurs ont résumé les éléments suivants concernant le devenir en méthanisation des micropolluants organiques :

- dégradabilité des composés organiques aliphatiques et des composés organiques monoaromatiques par voies biologiques et chimiques,
- dégradabilité potentielle de certains composés organiques poly-aromatiques par voie biologique (déhalogénéation réductrice) ou par voie chimique,
- faible dégradabilité de certains composés halogénés comme les PCBs et Dioxines et formation par voie biologique de composés en partie déhalogénés de toxicité différente des produits initiaux,

- formation de sous-produits instables aux effets probablement mutagènes et anti-thyroïdiens différents des effets mutagènes des molécules mères (molécules stables),
- en sortie de digesteur, il apparaît :
 - une concentration très faible des micropolluants organiques dans la phase liquide malgré la présence possible de composés polyaromatiques adsorbés à de la matière dissoute,
 - des composés organiques poly-aromatiques adsorbés à la surface des molécules organiques dans la phase solide, à une concentration voisine de de la concentration initiale en entrée de digesteur ou sous forme de sous-produits de dégradation.

Microorganismes présents dans les substrats et digestats

En fonction des substrats, les microorganismes et leurs charges sont très variables. D’après l’étude Ademe *et al.* (2007), le risque pathogène lié aux boues industrielles concerne essentiellement les industries agro-alimentaires traitant des produits animaux (ex : abattoirs, charcuteries, industries de produits laitiers, en particulier fromageries). Peu de données sont disponibles dans les effluents bruts et les boues non traitées de ces industries. Quelques données sont fournies dans les tableaux ci-dessous (Ademe *et al.*, 2007).

Toujours d’après cette étude, pour les autres types de boues, la présence de pathogènes pour l’Homme est extrêmement faible mais, les boues organiques produites dans les secteurs de la distillerie, amidonnerie / féculerie constituent un milieu de développement favorable à certains microorganismes thermophiles (levures, champignons).

Agent pathogène	Concentration dans les boues non traitées	← Charge en pathogènes de boues non traitées en abattoirs (Ademe <i>et al.</i> , 2007)		
<i>Campylobacter jejuni et coli</i>	<2,8 à 7,3 log UFC/g MS boues flocculées et <2,8 à 4,7 log UFC /g MS boues activées 3.10 ² NPP/mL			
<i>Salmonella spp.</i>	Max 137,5 UFC /mL sur boues biologiques 125 UFC/mL sur boues physico-chimiques (58 % des prélèvements) 84 à 92 % selon le type de boues 10 ² et 10 ³ NPP/mL			
<i>Listeria monocytogenes</i>	Max 125 UFC /mL sur boues physico-chimiques, 31 UFC/mL sur boues biologiques 4,8 à 21 NPP/mL			
<i>Pseudomonas spp.</i>	6-7 log UFC / g de MS boues physico-chimiques, 8 log UFC / g de MS boues biologiques 9,5.10 ³ à 9,5.10 ⁵ UFC/mL boues non traitées			
<i>Aeromonas hydrophila</i>	10 ⁴ -10 ⁷ UFC /mL			
<i>Yersinia spp.</i>	Aucune détectée Aucune souche de <i>Yersinia</i> isolée			
<i>Y. enterocolitica</i>	29 à 48 % selon le type de boues			
<i>Staphylococcus spp.</i>	5-6 logUFC / g de MS boues physico-chimiques, 4 logUFC / g de MS boues biologiques 10 ⁴ UFC /mL en moyenne			

Résultats de mesures microbiologiques de boues de laiteries (Ademe <i>et al.</i> , 2007).			
Paramètre mesuré	1 ^{ère} campagne (n=15 échantillons)	2 ^{ème} campagne (n= 11 échantillons)	
Œufs d'helminthes pathogènes viables	Absence	Absence	
Entérovirus	Absence	Absence	
<i>Staphylococcus aureus</i>	2/15 échantillons positifs (13%) 1300 et 11 /g MS	2/11 échantillons positifs (18%) 1600 et 88/ g MS	
<i>Listeria monocytogenes</i>	2/15 échantillons positifs 14 et 33 /g MS	/	
<i>Salmonella spp.</i>	3/15 échantillons positifs (20%) 10 ; 140 et 320 /g MS	Absence	
Coliformes thermotolérants	13/15 échantillons positifs 2800 à 4,5.10 ⁷ /g MS	/	
Bactéries anaérobies sulfito-réductrices	13/15 échantillons positifs 3700 et 4,4.10 ⁵ /g MS	/	

Aucune donnée en microorganismes quantifiés n’est disponible dans les digestats issus d’installations de méthanisation industrielle. D’après l’ADEME (2011) qui a étudié les teneurs en Entérobactéries, Salmonelles, *Campylobacter*, Entérocoques, *Escherichia coli*, *Clostridium perfringens* et *Listeria* sur 87 installations de méthanisation agricoles (teneurs non précisées), les installations avec des présences prouvées de Salmonelles traitaient toutes des graisses ou des huiles alimentaires.

De façon générale, la digestion anaérobie est toutefois un procédé qui permet la réduction des concentrations en germes pathogènes, avec une efficacité beaucoup plus importante en conditions thermophiles qu’en conditions mésophiles (ADEME, 2011). La digestion mésophile avec un taux d’abattement en pathogènes de l’ordre de 80 % n’assure pas forcément une hygiénisation suffisante pour prévenir le développement ultérieur des microorganismes pathogènes lors du stockage. Une hygiénisation supplémentaire peut alors être apportée, si nécessaire, par un prétraitement ou un post traitement ad hoc (le compostage par exemple). Le stockage d’au minimum un mois des digestats liquides diminue aussi nettement les risques de présence de germes pathogènes.

Les agents pathogènes les plus résistants sont les *Clostridium* et les *Bacillus cereus* qui peuvent subsister à la digestion thermophile (espèces sporulantes) ainsi que les *Enterovirus* et les *Parvovirus* qui résistent à la digestion mésophile (Couturier, 2002).

Les normes NFU 44-051 et NFU 44-095 définissent des seuils pour des indicateurs de contamination et agents pathogènes, variables selon la destination du produit.

Seuils en microorganismes des normes 44-051 et 44-095 NFU 44-095.

		Cultures maraîchères	Toutes autres cultures	
Seuils de la norme NFU 44-051	Agents indicateurs de traitement (non obligatoire)	<i>Escherichia coli</i>	10 ² /g MB	
		Entérocoques	10 ⁴ /g MB	
	Agents pathogènes :	Œufs d'helminthes viables	Absence dans 1,5 g MB (toutes cultures)	
		Salmonelles	Absence dans 25 g MB	Absence dans 1 g MB
Seuils de la norme NFU 44-095	Agents indicateurs de traitement :	<i>Escherichia coli</i>	10 ³ /g MB	10 ⁴ /g MB
		<i>Clostridium perfringens</i>	10 ² /g MB	10 ³ /g MB
		Entérocoques	10 ⁵ /g MB	10 ⁵ /g MB
	Agents pathogènes :	Œufs d'helminthes viables, <i>Listeria monocytogenes</i> , <i>Salmonella</i>	Absence dans 25 g MB	Absence dans 1 g MB

NB : Ces valeurs de micropolluants et microorganismes dans les substrats et digestats sont fournies à titre indicatif mais ne sont :

- *ni représentatives de l'ensemble des matières entrantes et digestats, des variations étant liées aux type de substrats traités, mais aussi pour un même type de substrat dans le temps,*
- *ni représentatives de l'exposition potentielle des opérateurs via ces matières. A noter que, dans le cas d'évaluations de risques sanitaires (à des substances chimiques ou microorganismes), les voies d'exposition étudiées sont l'ingestion, l'inhalation et le contact cutané.*

Cette dernière est souvent considérée comme négligeable au regard des autres voies (barrière cutanée), bien que certaines substances (ex : toluène) sont reconnues avoir une pénétration cutanée pouvant être importante. Cependant, moins de valeurs toxicologiques de référence sont disponibles pour cette voie et, en santé du travail, les valeurs limites ne concernent que la voie inhalation. De plus, dans les filières de méthanisation, la majorité des opérations est effectuée aux moyens de matériels ; les opérateurs n'entrent donc pas en contact direct avec les matières et, si cela devait être le cas, des moyens de protections (gants, combinaisons) sont employés.

Concernant l'ingestion, s'agissant de travailleurs, il est peu probable que les matières en question soient ingérées volontairement. Un portage main-bouche est envisageable mais a priori il y a peu de manipulations directes : un lavage des mains est en tous les cas indispensable. L'exposition peut aussi se faire par ingestion de poussières. A titre d'exemple, un groupe d'experts a évalué les risques liés aux microorganismes pathogènes présents dans les boues d'épuration et a notamment considéré un scénario d'exposition de l'agriculteur épandant les boues et travaillant son champ. Selon ce scénario, sur une journée de 8H de travail, l'agriculteur, dans son tracteur ouvert (scénario majorant) peut ingérer 216 mg de poussières/jour (ADEME et al., 2007).

Par ailleurs, les travailleurs peuvent être exposés à des substances chimiques et microorganismes par inhalation. Une attention doit donc être portée aux dangers volatiles, aérosolisés ou adsorbés sur des particules inhalables, thoraciques ou alvéolaires⁴⁴. Comme déjà indiqué, les valeurs limites d'exposition en santé du travail concernent cette voie inhalation.

Sur ces bases, il est donc possible de considérer qu'un opérateur d'une filière de méthanisation industrielle peut être exposé à des dangers chimiques et microbiologiques, par inhalation ou ingestion de poussières, lors des étapes de gestion des matières (substrats et digestats).

Dangers « inhalables » issus des substrats et digestats

Même si peu de données (en particulier d'ambiances de travail) sont disponibles, des **composés volatiles** peuvent être émis par les différents substrats traités en méthanisation industrielle.

⁴⁴ En santé au travail, les fractions de particules devant être contrôlées sont majoritairement les fractions inhalables et dans certains cas, les fractions thoraciques ou alvéolaires (INRS, 2007).

Les acides gras volatils (acides propionique, butyrique, valérique, caproïque...) représentent la famille principale des **composés malodorants** des effluents vinicoles. D'autres composés malodorants : amines, ammoniac, mercaptans et sulfures, peuvent être également produits à partir des constituants organiques (composés azotés, soufrés...) et minéraux (sulfate) des effluents (Bories, 2006).

Les effluents industriels, en particulier issu de l'agro-alimentaire et, encore plus spécifiquement, les effluents vinicoles sont très chargés en matières organiques rapidement biodégradables. De l'H₂S peut donc être produit. Peu (2011) identifie les secteurs des IAA et des papeteries comme des secteurs majeurs d'émissions d'H₂S. Pour rappel, des accidents mortels ont déjà été observés dans ces secteurs, liés à la maintenance, lavage de cuves notamment (cf. descriptif accidents bases ARIA et EPICEA).

Concernant les **bioaérosols**, Goyer et al. (2001) fournissent des indications quant aux espèces dominantes en fonction des substrats, et notamment pour des denrées alimentaires et papier (cf. tableau ci-contre).

Les auteurs rapportent des niveaux de concentrations en bactéries totales, bactéries gram négatives, actinomycètes thermophiles, moisissures et endotoxines présentées dans le tableau ci-dessous.

Bioaérosols dominants en fonction des substrats (Goyer et al., 2001).

Fruits et légumes	<i>Penicillium, Phomopsis, Diplodia, Botrytis, Geotrichum, Monilia, Trichotecium, Fusarium Alternaria, Aspergillus, Paecilomyces</i>
Œufs	<i>Penicillium, Aspergillus, Cladosporium, Mucor</i>
Produits laitiers : fromage	<i>Mucor, Penicillium, Cladosporium, Scopulariopsis, Epicoccum, Trichoderma, Alternaria, Botrytis, Trichothecium</i>
Produits laitiers : beurre et margarine	<i>Alternaria, Aspergillus, Eurotium, Moniliella, Phialophora, Phoma, Penicillium</i>
Viandes et charcuteries	<i>Aspergillus, Chrysonilia, Geotrichum, Cladosporium, Geomyces, Penicillium</i>
Papier	<i>Aspergillus, Penicillium, Chaetomium, Acremonium, Beauveria, Cladosporium, Epicoccum, Papulospora, Phoma, Scopulariopsis, Ulocladium</i>

Concentrations de bioaérosols mesurés dans des ambiances de travail (Goyer et al., 2001).

	bactéries totales	bactéries Gram négatives	actinomycètes thermophiles	moisissures	endotoxines
	en UFC/m ³				en UE/m ³
extérieur	10 ²	10 ¹	10 ²	10 ³	np
effluents des papetières	10 ⁴	10 ³	10 ¹	10 ⁴	/
papetières	10 ⁶	10 ²⁻³	/	10 ³	1-760
transformation de sucre	10 ⁵	10 ³	10 ²	10 ³	/
production de riz	/	/	/	/	48-1 340
préparation de pommes de terre	/	/	/	/	45 000 -1 893 000

/ non documenté

Aucune valeur limite professionnelle n'est disponible en France pour les microorganismes et endotoxines. Pour ces dernières des valeurs sont proposées en Allemagne (50 UE/m³) et aux Pays-Bas (200 UE/m³) (INRS, 2011) (1 ng/m³ = 1 UE/m³).

D'après ces résultats de mesures ainsi que dans d'autres ambiances de travail, les concentrations en bactéries totales sont élevées, de l'ordre de 10⁶ UFC/m³ dans les secteurs suivants : agriculture, fabrication du compost pour la culture de champignons, utilisation fluides de coupes, papetières et porcheries (Goyer et al., 2001). S'agissant des concentrations en actinomycètes, moisissures, endotoxines, l'industrie papetière n'est pas mentionnée parmi les secteurs présentant les niveaux les plus élevés. Les concentrations d'endotoxines les plus fortes ont été mesurées dans une usine de préparation de pommes de terre. D'après l'INRS (2011), une exposition des travailleurs aux microorganismes et associés est possible lorsque des aérosols d'eau sont générés (tamisage d'effluents, lavage de surface notamment à haute pression, ...).

A notre connaissance aucune étude relative aux composés chimiques volatils et bioaérosols potentiellement émis par des digestats issus de procédés de méthanisation en industries n'est disponible. En revanche, pour rappel, même en conditions mésophiles, les digestats devraient contenir des charges en microorganismes pathogènes plus faibles que les substrats non méthanisés. Par ailleurs, les composés odorants devraient avoir été réduits.

Aucune **étude épidémiologique** n'a semble-t-il été menée pour étudier les effets liés à l'exposition à des composés chimiques ou microbiologiques chez des professionnels des différents secteurs en question ici.

Même si peu documenté, les activités avant ou après méthanisation de gestion des matières sont susceptibles de provoquer des expositions des opérateurs à des composés chimiques ou microbiologiques. Il faut ainsi souligner l'importance de respecter les précautions minimales (gants, vêtements de protection, aération) en particulier lors des manipulations de matières, ou lors par exemple d'opération de maintenance, réparation, lavage.

Données sur la composition chimique des biogaz des filières de méthanisation industrielle

Comme déjà indiqué, d'après les données issues de 15 installations en France, la concentration en **méthane CH₄** du biogaz produit dans les industries recourant à la méthanisation varie de 55 à 87 % (moyenne 73 % environ) (ATEE, Club Biogaz, 2011). Le méthane est un gaz inflammable qui, s'il se retrouve en mélange stœchiométrique dans l'air, peut exploser en cas de source d'ignition.

L'autre composé majoritaire du biogaz est le **dioxyde de carbone CO₂** quant à lui inerte (ses concentrations varient de 25 à 49 % d'après l'INERIS, 2008).

D'après l'INERIS (2008), la LIE - limite inférieure d'explosivité se situe autour de 5 % v/v et la LSE - limite supérieure d'explosivité varie de 15 % pour du méthane pur à 11,4 % /v, si le méthane n'est présent dans le biogaz qu'à une proportion de 50 %.

LIE et LSE pour différentes compositions de biogaz en terme de mélange CH₄ - CO₂ (INERIS, 2008).

CH ₄ - CO ₂ (%v/%v)	LIE (%v/vCH ₄)	LSE (%v/vCH ₄)
100 - 0	5	15
60 - 40	5,1	12,4
55 - 45	5,1	11,9
50 - 50	5,3	11,4

D'autres composés sont présents à l'état de **traces** dans le biogaz. Ils sont suffisamment peu abondants pour n'avoir qu'une influence négligeable sur les caractéristiques d'**explosivité** du mélange biogaz/air. En revanche ces divers composés peuvent présenter une certaine toxicité.

S'agissant de biogaz issu de méthanisation industrielle, peu de données sont disponibles. L'AFSSET (2008) a recueilli la composition d'un biogaz issu de déchets industriels (non précisés). Peu de composés ont été recherchés et un seul échantillon a été analysé. Les teneurs observées sont fournies dans le tableau ci-dessous.

Teneurs en micropolluants recueillis part l'AFSSET (2008) dans un biogaz issu de méthanisation de déchets industriels (non précisés).

HALOGENES	mg/m ³
Méthane, dichloro	<0.33
Ethylène, 1,2 dichloro	<0.08
Ethylène, trichloro	35
Ethylène, tetrachloro	15

HA MONOCYCLIQUES	mg/m ³
benzène	<0.17
Toluène	8,2
Benzène, Ethyl	9,5
Xylènes (m/p+o)	<0.23

HAP	µg/m ³
Naphtalène	0,56
Acénaphtylène	1,5
Acénaphène	<0.0234
Fluorène	<0.0117
Phénanthrène	0,25
Anthracène	0,15
Fluoranthène	0,075
Pyrène	<0.0585
Benzo-a-Anthracène	<0.007
Chrysène	0,031
Benzo-b-Fluoranthène	<0.0117
Benzo-k-	<0.0005
Benzo-a-Pyrène	<0.0047
Dibenzo-a,h-Anthracène	<0.007
Benzo-g,h,i pérylène	<0.014
Indéno-1,2,3,c,dpyrène	<0.0468

METAUX	µg/m ³
Cd	<0.2
Tl	<0.2
As	<2.2
Se	<2.2
Sb	<2.2
Cu	1,8
Co	<0.2
Cr	<3.4
Sn	<0.2
Mn	1,3
Ni	1,8
Pb	2,6
V	<0.4
Te	0,2
Hg	4,9

Concernant l'**H₂S**, gaz pouvant être mortel en quelques minutes à fortes concentrations (963 mg/m³ pendant 10 minutes), *a priori* aucune valeur d'H₂S mesurée dans des biogaz issu de la méthanisation d'effluents vinicoles n'est disponible. Une valeur de 1000 mg/m³ dans le biogaz brut issu de déchets industriels (non précisés) est reportée par l'AFSSET (2008) et une valeur de 720 mg/m³ dans une industrie papetière reportée par l'INERIS (2002).

Valeurs limites d'exposition professionnelles (VLEP) et valeurs toxicologiques de référence (VTR) de substances observées dans les biogaz et/ou les digestats issus de la méthanisation industrielle

Les VLEP disponibles pour les composés mesurés dans le biogaz issu d'un procédé de méthanisation de déchets industriels (non précisés) sont présentées à titre indicatif (*cf.* tableau ci-après) et, afin de les comparer aux valeurs mesurées dans le biogaz. Il faut toutefois noter qu'un opérateur ne sera jamais

exposé à une atmosphère composée de 100 % de biogaz. Si tel était le cas, l'asphyxie par absence d'oxygène interviendrait avant tout effet toxique des substances. Rappelons également que la méthanisation se déroule en système clos. Les opérateurs ne devraient pas être exposés à des dangers du biogaz en fonctionnement normal. Des expositions sont potentielles lors d'un dysfonctionnement, fuite notamment dans un local confiné ou éventuellement lors d'opérations de maintenance (ex : purges de réseau) au cours desquelles une courte exposition à une petite quantité de biogaz pourrait être possible.

Les valeurs rencontrées dans le biogaz sont inférieures, voire largement inférieures (cf. tableau page précédente) aux valeurs limites professionnelles disponibles, sauf pour l'H₂S pour lequel la VME est de 7 mg/m³. Dans le biogaz non épuré des valeurs jusque 1 000 mg/m³ ont déjà été mesurées. Pour un tel biogaz, il suffirait d'environ 0,7 % de biogaz dilué dans une atmosphère. Ce scénario semble plausible, d'autant plus qu'en France la désulfuration du biogaz est peu répandue en industrie (d'après le Club Biogaz, 2011).

Au vu de ces éléments on ne peut que recommander l'emploi de détecteur en continu de l'H₂S dans les lieux confinés et de détecteur portatif individuel lors de la maintenance par exemple des bassins et digesteurs ou encore lors de purges de réseau. Le biogaz n'étant pas épuré en H₂S, la détection du méthane à une teneur correspondant à 25 % de la LIE n'est pas suffisante pour se prémunir contre les effets de l'H₂S. Cette démarche serait valable si les teneurs du biogaz en H₂S étaient maintenues inférieures à 100 mg/m³ (INERIS, 2008).

Pour rappel des cas d'intoxications à l'H₂S, pas liés à la méthanisation proprement dite, sont recensés dans les bases de données ARIA et EPICEA et concernent des industries agroalimentaires et papeterie.

Concernant le chrome, il n'a pas été quantifié mais la limite de quantification (= 3,4 µg/m³) est plus élevée que la VME du chrome VI (= 1 µg/m³). Cependant la valeur reportée par l'AFSSET (2008) correspond probablement à une valeur de chrome total.

Valeurs limites professionnelles disponibles pour des composés mesurés dans le biogaz (INRS, 2012 a) – en mg/m³

Composés organiques	VME ⁴⁵	VLCT ⁴⁶	Composés inorganiques	VME ²⁴	VLCT ²⁵	Autres	VME ²⁴	VLCT ²⁵
benzène	3,25	/	Pb métallique	0,1		H ₂ S	7	14
toluène	76,8	384	Cd et composés	0,05	/	CO₂	9000	/
éthylbenzène	88,4	442	dioxyde de Ti, en Ti	10	/	Ammoniac	7	14
xylènes (somme ou o, m, p)	221	442	trioxyde d'As, en As	0,2	/	Poussières totales	10	/
dichlorométhane	178	356	Ni (métal)	1	/	Poussières alvéolaires	5	/
dichloroéthylène (1,1)	20	/	hexafluorure de Se	0,2	/			
trichloroéthylène	405	1080	Cu (fumées)	0,2	/			
tétrachloroéthylène	138	275	Cu (poussières)	1	2			
benzo(a)pyrène	0,150 *	/	Cr (Chrome VI)	0,001	0,005			
naphtalène	50	/	Cr inorganique (II / III)	2	/			
			Mn (fumées)	1	/			
			Hg (composés alkylés), en Hg	0,01	/			

En noir gras, valeurs réglementaires contraignantes ; En bleu gras, valeurs réglementaires indicatives ; En noir, valeurs indicatives

* valeur recommandée par la CNAM (pas de VLEP fixée).

Cases en rosé : substances CMR avérées, assimilées ou possibles

Pour compléter la réflexion, concernant les composés parfois présents dans les digestats issus de méthanisation en industries, et, considérant un agriculteur pouvant être exposé *via* ingestion de poussières lorsqu'il les épand et travaille son champs (scénario déterminé dans l'étude de l'ADEME *et al.*, 2007), les valeurs toxicologiques de référence (orale - chronique⁴⁷) des métaux, HAP et PCB quantifiés sont fournies ci-dessous à titre indicatif.

Même selon un scénario semble-t-il très majorant (*tracteur ouvert : ingestion de 216 mg/j de poussières*⁴⁸ ; – considération que l'agriculteur réalise le travail de son champs sur lequel a été épandu le digestat tous les jours,), les concentrations limites en composés étudiés ne devant pas être dépassées dans les poussières ingérées par l'agriculteur pour qu'aucun effet chronique à seuil ou sans seuil soit à craindre, sont,

⁴⁵ VME : Valeur moyenne d'exposition correspondant à des valeurs limites sur 8 H d'exposition

⁴⁶ VLCT : valeur limite court terme destinée à protéger des pics d'exposition.

⁴⁷ Les VTR chroniques ont été sélectionnées, elles sont plus faibles que les valeurs aiguës et permettent de se placer dans un scénario majorant. De plus lorsque plusieurs VTR étaient disponibles, la plus faible a été sélectionnée.

⁴⁸ Tracteur fermé, les experts estiment que la quantité de poussières ingérées diminue à 12 mg/j (ADEME *et al.*, 2007).

supérieures, voire très largement aux teneurs mesurées et aux seuils des normes NFU pour les HAP, métaux et PCB (cf. tableau ci-après).

VTR chroniques par voie orale des composés HAP, PCB et métaux quantifiés dans des digestats – évaluation des concentrations limites ne devant pas être dépassées pour qu'aucun effet pour l'agriculteur exposé ne soit à craindre.

	VTR orales chroniques en mg/kg/j		Doses journalières maximales pour un opérateur de 70 kg en mg/j		Concentrations limites ne devant pas être dépassées dans les poussières ingérées par l'agriculteur épandant un digestat et travaillant son champs - en mg/kg MS		Valeurs maximales (moyennes) quantifiées (ADEME, 2011) / seuils des normes NFU 44015 ou NFU 44095 en mg/kg MS
	effet avec seuil (ES)	effet sans seuil (SS)	ES	SS	ES	SS	
fluoranthène	0,04	ND	2,8	-	12 963	-	np (moy : 0,008)/ 4
benzo(b) fluoranthène	ND	1,2	-	84	-	388889	np (moy : 0,008) / 2,5
benzo(a)pyrène	ND	7,3	-	511	-	2365741	np (moy : 0,008)/ 1,5
PCB	ND	0,00001	-	0,0007	-	3,24	np (moy : 0,070) / 0,8
As	0,0003	1,5	0,021	105	97	486111	NR / 18
Cd	0,0005	ND	0,035		162		2,54 (moy : 0,69) / 3
Cr (VTR du Cr VI)	0,003	ND	0,21		972		199 (moy : 36,14)/ 120
Cu	0,14	ND	9,8		45370		2 756 (moy :353,5)/ 300
Hg	0,0003	ND	0,021		97		0,4 (moy : 0,14)/ 2
Ni	0,005	ND	0,35		1620		68,7 (moy : 20,45) / 60
Pb	0,0036	0,0085	0,252	0,595	1167	2755	41,8 (moy : 10,74)/ 180
Zn	0,3	ND	21		97222		902 (moy : 237) / 600

NR : non recherché ; np : non précisé

Données sur la composition microbiologique des biogaz

En fonction des intrants, la composition microbiologique du biogaz varie. Toutefois, la composition de la flore des biogaz n'est, en proportion, pas la même que celle du digesteur dont il est issu (AFSSET, 2008).

En effet, même si le biogaz apparaît être un vecteur capable de transporter n'importe laquelle des espèces microbiennes présentes dans la source (les densités de micro-organismes sont généralement de l'ordre de 10^6 à 10^7 cellules procaryotes/m³ et 10^4 cellules d'eucaryotes/m³), l'aérosolisation est variable en fonction des espèces (Moletta, 2006, Moletta *et al.*, 2008 et 2010) :

- certaines sont préférentiellement aérosolisées (ex : *Staphylococcus spp.*, *Propionibacterium acnes*, phylums des *alphaproteobacteria*, *betaproteobacteria*, *gammaproteobacteria*) (aérosolisation active),
- certaines sont préférentiellement non-aérosolisées (phylums des *Deltaproteobacteria*, *Spirochaetes*, *Thermotogae*, *Chloroflexi* et groupes sulfato-réducteurs) (non-aérosolisation active),

Les auteurs évoquent aussi un comportement d'aérosolisation passive qui peut conduire n'importe lequel des groupes de micro-organismes présents dans la source à se retrouver dans l'aérosol (ex : phylums des *Actinobacteria*, *Firmicutes* et *Bacteroidetes*).

Vinneras et Nordin (2007) ont étudié la flore de biogaz issus de stations d'épurations. Ils ont conclu que le risque microbiologique lié à l'utilisation du biogaz valorisé était probablement insignifiant. Les risques liés au contact avec le gaz brut et les eaux condensées sont probablement plus élevés. Cependant les systèmes étant généralement fermés, les auteurs rapportent que, selon les professionnels, les travailleurs sont rarement exposés. *A noter que dans cette étude, une des sources de microorganisme dans le biogaz était l'eau usée utilisée pour désulfurer le biogaz.*

Diagramme de fonctionnement des installations de méthanisation d'effluents vinicoles (exemple) / identification de points critiques pour la santé/sécurité des opérateurs

Un diagramme de fonctionnement d'une filière de méthanisation d'effluents vinicoles est présenté ci-après. Il illustre les principales étapes de cette filière. Il est représentatif des installations les plus répandues en France (d'après les données de l'ATEE, Club Biogaz, 2011).

Sur ce diagramme, les points critiques pour les opérateurs vis-à-vis de différents dangers identifiés sont représentés aux moyens de logos illustratifs et d'un code couleur représentatif d'un niveau de criticité.

En effet, une hiérarchisation des points critiques pour les opérateurs des filières biogaz a été proposée. Elle est fondée sur la base d'une méthodologie dans laquelle des niveaux de criticité sont définis en croisant :

- des niveaux d'enjeux (en terme de conséquences) et,
- des niveaux de retour d'expérience (l'évènement a-t-il déjà été décrit, est-il probable ou non, ... ?).

Pour chacun de ces niveaux, des scores ont été attribués : plus le score est élevé, plus le niveau est élevé c'est-à-dire par exemple, plus l'évènement peut avoir des conséquences importantes.

Dans le cadre de cette étude, nous avons arbitrairement considéré 3 niveaux d'enjeux et 3 niveaux de retour d'expérience : niveau faible – score 1 / niveau modéré – score 2 / niveau fort – score 3. La matrice suivante a ainsi été élaborée :

niveaux de retour d'expérience	Elevé- 3	Moyen -2	Faible - 1
niveaux d'enjeux			
Important - 3	$3 \times 3 = 9$	$3 \times 2 = 6$	$3 \times 1 = 3$
Modéré - 2	$2 \times 3 = 6$	$2 \times 2 = 4$	$2 \times 1 = 2$
Faible - 1	$1 \times 3 = 3$	$1 \times 2 = 2$	$1 \times 1 = 1$

Dans le cas de situations particulières, des scores en général de 0,5, voire 1 peuvent ensuite avoir été ajoutés ou retranchés aux résultats de criticité « Enjeux x Retour d'expérience ».

Trois niveaux de points critiques sont ainsi identifiés :

- les points critiques majeurs avec des notes supérieures ou égales à 6 (couleur rouge),
- des points critiques modérés avec des notes variant de 3 à inférieures à 6 (couleur jaune),
- des points critiques mineurs avec des notes inférieures à 3 (couleur verte).

Les différents éléments rapportés dans cette synthèse ont permis de proposer des niveaux d'enjeux et des niveaux de retour d'expérience, selon des critères propres à chacun des dangers et, explicités dans le tableau argumentaire associé au diagramme. Ce tableau argumentaire est indissociable du diagramme.

A noter que les données étant différentes pour les dangers étudiés, cela introduit un certain biais, notamment si l'on souhaite les comparer entre eux. Par ailleurs dans certains cas (dangers, filières étudiées), les données sont rares voire inexistantes, ce qui peut aussi introduire un biais par rapport aux cas où des données sont disponibles.

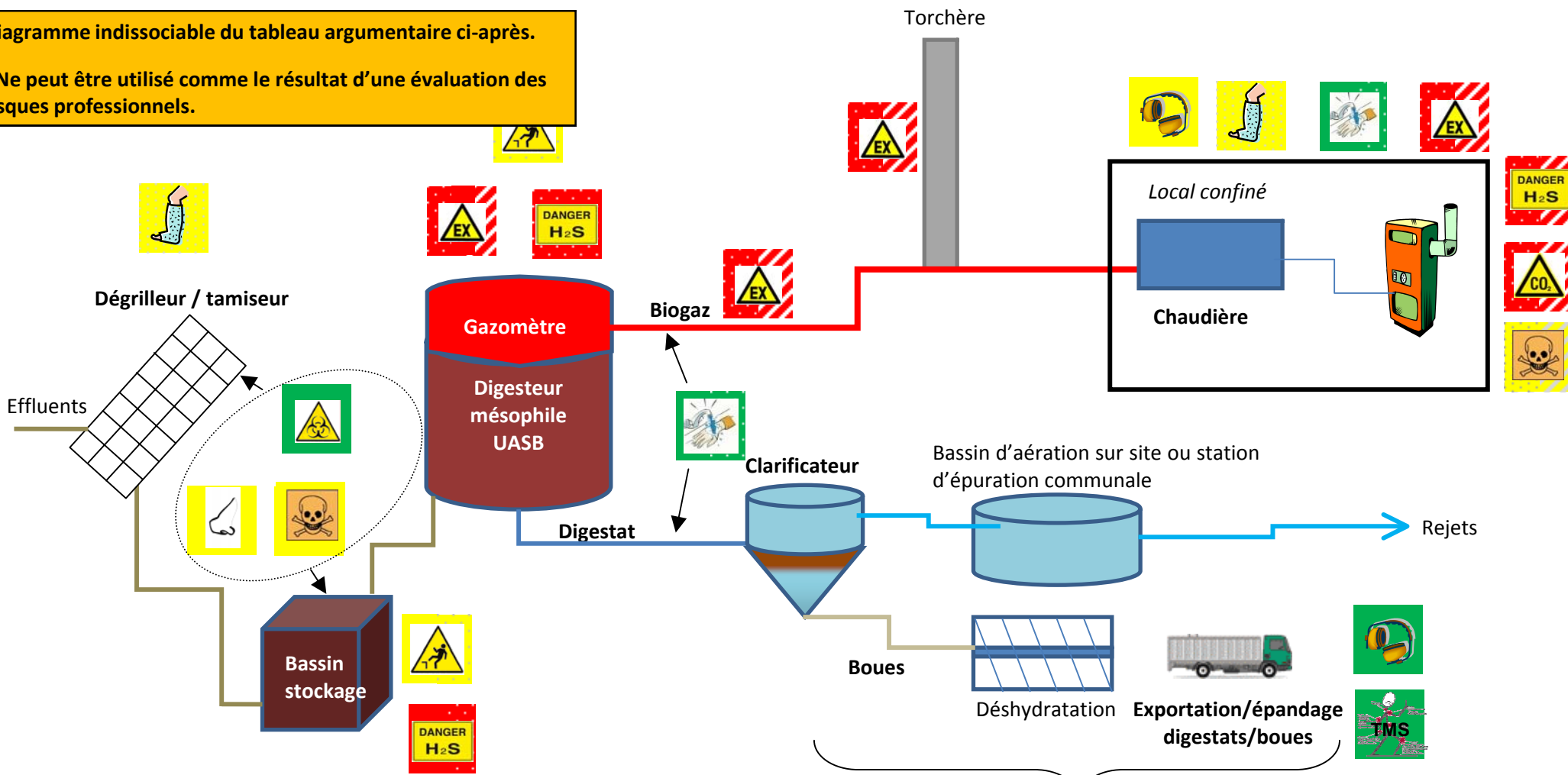
Pour plus de détails sur la méthodologie, se reporter en section 9/ du rapport.

Remarque importante : le contenu de cette synthèse, du diagramme et du tableau présentés ci-après, ne peut être utilisé en l'état par une entreprise ou un site comme le résultat d'une analyse des risques professionnels. Il s'agit uniquement d'une sensibilisation des acteurs, et lecteurs sur des points critiques des filières de production, valorisation de biogaz, en termes de santé et sécurité des opérateurs. Ces points critiques constituent des alertes sur des points au niveau desquels il convient de mettre en œuvre les mesures de maîtrise des risques existantes et/ou d'approfondir les données en réalisant des évaluations de risques plus détaillées.

Filière de méthanisation industrielle: Ex : effluents vinicoles

Diagramme indissociable du tableau argumentaire ci-après.





! Ne peut être utilisé comme le résultat d'une évaluation des risques professionnels.








	Phase de fonctionnement		Phase de maintenance		En cas de dysfonctionnement (en particulier fuite de biogaz)
	Point critique majeur (notes ≥ 6) fonctionnement		Point critique modéré (notes ≥ 3 et < 6)		Point critique mineur (notes < 3) fonctionnement







Gestion des digestats

Points critiques identifiés	Lieux / étapes	Phases	Niveaux d'enjeux (E)	Niveaux de retour d'expérience (R)	Résultats E X R	Situations particulières	Principales mesures de maîtrises /autres commentaires
Risque électrique 	Local de cogénération / armoire électrique – raccordement au réseau EDF	Mise en service / Maintenance / Dys-fonctionnement	3 - D'après l'INRS (2012 b), des accidents graves, notamment mortels peuvent survenir.	1 - D'après l'INRS (2012 b), ces accidents sont de plus en plus rares (toutes professions confondues, 10 morts / an par électrocution). <i>A noter qu'à ce jour, les filières de méthanisation industrielles valorisent principalement en chaleur, en général réutilisée sur le site. Sur le schéma le risque électrique n'apparaît donc pas.</i>	3 x 1 = 3 		Habilitations Normes
Risque d'explosion / incendie d'une ATEX 	Local confiné où arrivée de biogaz (local chaudière) Digesteur / post-digesteur / gazomètre / torchère (soupapes) Brides / raccords /pots de purges canalisations	Dys-fonctionnement (fuite) / Maintenance (ex : purges) / Fonctionnement du digesteur : en phase démarrage / arrêt	3 - L'explosion d'une ATEX engendre de nombreux dégâts et potentiellement des morts. Les incendies ou feux torches en particulier lié à des fuites de gaz peuvent aussi être dévastateurs (INERIS, 2008).	3 - Quelques cas d'explosion / incendie ont été recensés dans des secteurs industriels réalisant de la méthanisation. Aucun cas ne concerne spécifiquement les effluents vinicoles. Cependant, au même titre que dans les autres filières, des zones ATEX existent et des dysfonctionnements peuvent survenir. Les phases de maintenance sont aussi probablement sensibles.	3 x 3 = 9 	+ 0,5 dans local confiné - 0,5 au niveau des canalisations (volume ATEX moins important)	Identifications des zones ATEX Formation, mesures de sécurité (soupapes détecteurs de CH ₄ , ventilation) Appareils dédiés zones ATEX
Risque blessures / chutes  	Endroits où des chutes en particulier de hauteur sont possibles Manipulation d'objets, d'outils Chargement digestat	Fonctionnement / Maintenance	1 - Même si ces accidents du travail peuvent avoir une gravité très variable, les plus fréquents (tout secteur d'activité confondu, pas de code spécifique aux filières industrielles concernées par notre étude) sont des accidents peu graves entraînant des douleurs, lumbagos, contusions, plaies et entorses (CNAMTS, 2010)	3 - Ce type d'accidents de travail est le plus fréquent. Ces AT sont notamment liés à la manipulation d'objet (27 % des cas), des accidents de plain-pied (25 % des cas) et des chutes avec dénivellation (11 % des cas) (pour 658 847 AT recensés en 2010 chez les salariés des 9 branches d'activités étudiées par la CNAMTS (base de 18 299 717 salariés) (CNAMTS, 2010).	1 x 3 = 3 	+ 0,5 en cas maintenance	Règles de sécurité (ex : barrières, utilisations de cordes), de conception des locaux. Notices machines, ...

Points critiques identifiés	Lieux / étapes	Phases	Niveaux d'enjeux (E)	Niveaux de retour d'expérience (R)	Résultats E X R	Situations particulières	Principales mesures de maîtrises /autres commentaires
Brûlures 	Canalisations non enterrées du biogaz/digestat Local cogénération Séchages des digestats / emploi d'acides	Fonctionnement Maintenance (ex : sur chaudière)	1 – La gravité de ces brûlures (hors incendies) est considérée comme faible (proportion du corps touchée faible (ex : mains))	1 – Aucune information relative aux éventuelles brûlures n'est disponible. Toutefois leur nombre est probablement faible.	1 x 1 = 1 	+ 0,5 si digestion thermophile au niveau des canalisations + 0,5 en cas de maintenance	Règles de bon sens et de sécurité (ex : attendre refroidissement avant maintenance) / repérage canalisations selon normes, calorifugeage canalisations, pièces machines
Intoxications aiguës à H ₂ S 	Stokage des effluents Digesteur / gazomètre Local confiné	→ Fonctionnement → Fonctionnement / Maintenance → Dys-fonctionnement (fuite, non efficacité de la désulfuration) / maintenance (purges)	3 – L'exposition à l'H ₂ S peut être très rapidement mortelle.	3 – Les effluents industriels, en particulier issu de l'agro-alimentaire et, encore plus spécifiquement, les effluents vinicoles sont très chargés en matières organiques rapidement biodégradables. De l'H ₂ S peut donc être produit. Peu (2011) identifie les secteurs des IAA et des papeteries comme des secteurs majeurs d'émissions d'H ₂ S. Des accidents mortels ont déjà été observés dans ces secteurs, liés à la maintenance, lavage de cuves notamment. A priori aucune valeur d'H ₂ S mesurée dans des biogaz issu de la méthanisation d'effluents vinicoles n'est disponible. Une valeur de 1000 mg/m ³ dans le biogaz brut issu de déchets industriels (non précisés) est reportée par l'AFSSET (2008) et de 720 mg/m ³ dans une industrie papetière (INERIS, 2002). (VME = 7 mg/m ³)	3 x 3 = 9 	+ 0,5 en cas de maintenance + 0,5 en milieu confiné - 1 si désulfuration (d'après l'ATEE, Club Biogaz (2011) les installations sont souvent anciennes et ne désulfurent pas le biogaz.)	Règles de sécurité : détecteur gaz, H ₂ S, ventilation, formation Penser à vérifier l'efficacité du traitement de désulfuration

Points critiques identifiés	Lieux / étapes	Phases	Niveaux d'enjeux (E)	Niveaux de retour d'expérience (R)	Résultats E X R	Situations particulières	Principales mesures de maîtrises /autres commentaires
Anoxie liée aux CO ₂ du biogaz 	Local confiné	Dys-fonctionnement (fuite) / Maintenance (purges)	3 – L'anoxie peut conduire à la mort rapide.	2 - Concentrations en CO ₂ plus fortes que l'H ₂ S (15 % environ soit 150 000 ppm) mais rapport des « concentrations maximales relevées dans biogaz / VME » plus élevé pour l'H ₂ S (143) que pour le CO ₂ (30).	3 X 2 = 6 	+ 0,5 en cas maintenance	Détecteur 4 gaz
Intoxications chroniques à des substances chimiques autres qu'H ₂ S par inhalation de biogaz 	Local confiné	Dys-fonctionnement (fuite) / Maintenance (purges)	3 – Les pathologies liées à des expositions chroniques à des substances en question (notamment CMR) peuvent être graves (cancers) et entraîner la mort.	1 – Les concentrations déjà mesurées dans les biogaz sont inférieures aux VLEP. Un opérateur ne sera de plus, jamais exposé à une atmosphère composée de 100 % de biogaz et de manière chronique. L'exposition au biogaz est donc probablement très faible même si elle peut <i>a priori</i> arriver de manière répétée lors par exemple des opérations de purges.	3 x 1 = 3 		Peu de résultats disponibles. Il serait pertinent de réévaluer les conclusions à mesures de l'obtention de nouveaux résultats
Intoxications chroniques par inhalation / ingestion de poussières et de composés organiques volatiles 	Réception/ tamisage / stockage des effluents	Fonctionnement	3 – idem ci-dessus	1 – Aucune donnée n'est disponible. Des composés volatiles sont toutefois émis lors de ces étapes. L'exposition ne devrait cependant pas être importante (milieu en général non confiné, étapes ne nécessitant <i>a priori</i> pas la présence d'un opérateur en permanence)	3 x 1 = 3 	+ 0,5 en milieu confiné	Idem ci-dessus Règles de sécurité (ex : engins équipés de filtres à poussières ; masques) et d'hygiène.
	Gestion des digestats / Epanchage	Fonctionnement / maintenance (lavage surface)	3 – idem ci-dessus	1 – Même avec l'exemple d'un scénario semble-t-il très majorant, il semble peu probable que les valeurs toxicologiques de référence soient dépassées. Les seuils des normes NFU permettent <i>a priori</i> d'être sécuritaire.	3 x 1 = 3 	+ 0,5 en milieu confiné	

Points critiques identifiés	Lieux étapes /	Phases	Niveaux d'enjeux (E)	Niveaux de retour d'expérience (R)	Résultats E X R	Situations particulières	Principales mesures de maîtrises /autres commentaires
Risque micro-biologique (infection, allergie, inflammation) 	Réception/ tamisage / stockage des effluents Gestion des digestats : Epandage	Fonctionnement / Maintenance (lavage)	2 - Des pathologies de gravités différentes peuvent survenir, cependant les majeures sont sans doute des pathologies courtes et traitables (ex : diarrhées). Des allergies, inflammations des voies respiratoires peuvent aussi survenir (notamment liées à l'exposition à des bioaérosols).	1 – aucune donnée n'est disponible concernant spécifiquement des effluents vinicoles. D'après l'INRS (2011), une exposition des travailleurs est possible lorsque des aérosols d'eau sont générés. D'après des résultats de mesures dans des ambiances de travail, les concentrations en bactéries totales sont élevées, de l'ordre de 10^6 UFC/m ³ dans les secteurs suivants : agriculture, fabrication du compost pour la culture de champignons, utilisation fluides de coupes, papetières et porcheries (Goyer <i>et al.</i> , 2001). S'agissant des concentrations en actinomycètes, moisissures, endotoxines, l'industrie papetière n'est pas mentionnée parmi les secteurs présentant les niveaux les plus élevés. Les concentrations d'endotoxines les plus fortes ont été mesurées dans une usine de préparation de pommes de terre.	2 x 1 = 2 	- 0,5 pour les digestats par rapport aux substrats (réduction des pathogènes) - 0,5 si hygiénisation des entrants / hygiénisation post-méthanisation ou digestion thermophile + 0,5 en milieu confiné	Vêtements, dispositifs de protection ; bonnes pratiques d'hygiène. Seuils de la norme NFU 44-015
	Exposition au biogaz Exposition aux condensats des canalisations	Dys-fonctionnement Maintenance	2 – idem précédent. Cependant la flore du digestat n'est pas représentative de celle du biogaz – peu d'éléments sont disponibles sur celle-ci	0 – Les concentrations dans les biogaz semblent relativement faibles et de l'ordre de la contamination de l'air ambiant. Très peu d'études ont néanmoins été conduites. D'après l'état actuel des connaissances, les opérateurs ne devraient pas être exposés à des doses importantes pouvant engendrer des pathologies.	2 x 0 = 0	+ 0,5 si utilisation d'eau contaminée pour la désulfuration par lavage (Vinerras, 2007) + 0,5 si présence identifiée / possible de bactéries <i>Legionella</i> pathogène par inhalation dans les substrats	Très peu de résultats disponibles. A réévaluer à mesures de l'obtention de nouveaux résultats

Points critiques identifiés	Lieux / étapes	Phases	Niveaux d'enjeux (E)	Niveaux de retour d'expérience (R)	Résultats E X R	Situations particulières	Principales mesures de maîtrises / autres commentaires
TMS  Risques liés aux postures, vibrations, port de charges notamment	Utilisation d'engins pour la gestion des digestats	Fonctionnement	1 – Ces troubles même s'ils peuvent être très perturbants au quotidien sont considérés comme de faible gravité.	2 – Les TMS sont les maladies professionnelles les plus fréquentes des salariés des 9 branches d'activité étudiées par la CNAMTS. Le tableau « affections péri articulaires » représente en 2010 près de 79 % des MP recensées (sur 50 688). A noter que les TMS représentent 95% des MP dans l'agroalimentaire. Un salarié de l'agroalimentaire a 2 fois plus de risques de déclarer un TMS que les salariés des autres secteurs. Cependant cela semble concerner les activités proprement dites de l'industrie et non pas la production / valorisation du biogaz.	1 x 2 = 2 		Amélioration du confort des appareils, des postes de travail. Règles à respecter
Bruits 	Local de valorisation du biogaz (chaudière / moteur) Utilisation de véhicules pour la gestion des digestats.	Fonctionnement	1 – Même si les impacts sur la santé liés au bruit sont souvent sous-estimés, on peut considérer qu'ils sont généralement de faible gravité.	2 – Aucune donnée disponible mais les moteurs (camions, circulation digestats) engendrent automatiquement du bruit, celui-ci n'étant cependant, pas forcément nuisible, d'autant plus si les règles constructeurs sont respectées. 3 – Dans les locaux de valorisation, les niveaux déjà enregistrés (cas d'une autre filière) sont élevés (95 à 110 dB(A))	1 x 2 = 2 ou 1 x 3 = 3 	+ 0,5 transport des digestats hors site	Règles : isolation phonique du local de cogénération, port de casques, cabines engins fermées, isolées, règles machines
Odeurs 	Réception/ tamisage / stockage des effluents Gestion des digestats	Fonctionnement	1 – Les odeurs même si elles peuvent être incommodantes sont considérées comme des nuisances de faible gravité. A noter, qu'en particulier, pour des riverains, les nuisances olfactives peuvent cependant avoir des conséquences psychologiques non négligeables.	3 - La plupart des matières traitées en méthanisation émettent par nature des composés malodorants (dégradation de la matière organique). Les acides gras volatils (acides propionique, butyrique, valérique, caproïque...) représentent la famille principale des composés malodorants des effluents vinicoles. Le biogaz quant à lui en système clos n'engendre pas en fonctionnement normal de nuisances olfactives. (En cas de dysfonctionnement d'autres points critiques que les odeurs sont nous semble-t-il à privilégier donc non retenu comme critique vis-à-vis des odeurs).	1 x 3 = 3 	+ 0,5 en milieu confiné - 1 pour les digestats par rapport aux substrats : la méthanisation réduit les odeurs	

Bibliographie citée dans cette synthèse

ADEME. 2005. Impacts environnementaux de la gestion biologique des déchets. Bilan des connaissances. 331 p.

ADEME, 2011. Qualité agronomique et sanitaire des digestats. Etude réalisée par RITMO 250 p.

ADEME, SYPREA, Les Entreprises de l'Eau, INERIS. 2007. Evaluation des risques sanitaires des filières d'épandage des boues des stations d'épurations. Base scientifique de l'évaluation des risques sanitaires liés aux agents pathogènes. 172 p.

AFSSET. 2008. Risques sanitaires du biogaz : Evaluation des risques sanitaires liés à l'injection de biogaz dans le réseau de gaz naturel, Rapport d'expertise collective « Groupe de travail Biogaz », Saisine Afsset n°« 2006/010 », 174 p.

ARAVIS, CARSAT Rhône-Alpes, caisses départementales de la MSA. 2011. Prévenir les TMS dans l'agroalimentaire : comprendre et agir. SP1171. 2 p

ATEE, Club Biogaz. 2011. État des lieux de la filière méthanisation en France, 61 p.

COUTURIER C. 2002. Effets de la digestion anaérobie sur les micropolluants et germes pathogènes. SOLAGRO. 5 p

COUTURIER C., GALTIER L.; POUËCH P , BRUGERE H. ; MARACHE L., KAEMMERER M. 2000. Etat des connaissances sur le devenir des germes pathogènes et des micropolluants au cours de la méthanisation des déchets et sous-produits organiques, rapport ADEME n° 98-93-024, 100 p.

GOYER N., LAVOIE J., LAZURE L., MARCHAND G. 2001. Les bioaérosols en milieu de travail : guide d'évaluation, de contrôle et de prévention. Etudes et Recherches. Guide technique. IRSST. 72 p.

INERIS. 2002. Caractérisation des biogaz: Bibliographie, Mesures sur site, 31 p.

INERIS. 2006. Etude comparative des dangers et des risques liés au biogaz et au gaz naturel, rapport N° 46032, 34 pages.

INERIS. 2008. Etude des risques liés à l'utilisation des méthaniseurs agricoles, Rapport d'étude n° DRA-07-88414-10586B réalisé pour le Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables, 91 p

INERIS. 2012. Retour d'expérience relatif aux procédés de méthanisation et à leurs exploitations. EAT DRA DRC- 93 - Opération A. 148 p.

INRS, 2011. Endotoxines en milieu de travail. II. Exposition, risques, prévention. Dossier médico-technique. 19 p.

INRS. 2012. a) Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France. ED 984. Aide-mémoire Technique. 32 p

MOLETTA M. 2006. Caractérisation de la diversité microbienne aéroportée des biogaz. Déchets-revue francophone d'écologie industrielle – cahier spécial du n° 44. pp 18-20.

MOLETTA-DENAT M., BRU-ADAN V., DELGENES JP., HAMLIN J., WERY N., GODON JJ. 2010. Selective microbial aerosolization in biogas demonstrated by quantitative PCR. Bioresource Technology. Vol 101. pp 7252-7257.

MOLETTA M. WERY N., DELGENES JP., GODON JJ. 2008. Water Science & Technology. Vol 57, n°4. pp 595-599.

PEU P. 2011. La gestion des effluents d'élevage et la production d'hydrogène sulfuré, cas particulier de la méthanisation. Thèse Ecole Doctorale SDLM. Université de Rennes 1. 173 p.

TROSSAT S., LEBEGUE J. OLIVIER S. 2003. Traitement des effluents vinicoles. Polytech ' Montpellier et Office International de l'Eau. 19 p.

VINNERAS B. NORDIN A. 2007. Microbiological community in biogas systems and evaluation of microbial risks from gas usage. Energie - wasser-praxis 12/2007 – DVGW Jahresrevue. pp 50-53.

Sites internet, bases de données :

Base de données EPICEA de l'INRS. <http://www.inrs.fr/accueil/produits/bdd/epicea.html> ; consulté le 02/10/2012.

Base de données ARIA du BARPI <http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/> ; consulté le 02/10/2012.

INRS, 2012, b) article « Electricité » <http://www.inrs.fr/accueil/risques/phenomene-physique/electricite.html> ; consulté le 08/10/2012.

CNAMTS, 2010. Statistiques par numéro de risque ou par code APE-NAF. <http://www.risquesprofessionnels.ameli.fr/chiffres-cles-et-statistiques/nos-statistiques.html> ; consulté le 18/12/2012.

**Filière « production et valorisation de biogaz en
ISDND »**

Description de la filière production et valorisation de biogaz en ISDND en France

A noter en préambule que seules les installations de stockage de déchets non dangereux - ISDND (ex centre de classe 2 - CET 2) sont concernées par la production de biogaz. Les autres installations de stockage acceptent des déchets dangereux peu réactifs ou stabilisés pour les ex CET 1 ou, inertes (ex : gravats) pour les ex CET 3, ceux-ci ne produisant donc pas de biogaz (déchets non fermentescibles).

D'après les dernières données disponibles datant de 2008, 301 installations de stockage de déchets non dangereux (ISDND) produisaient du biogaz (ADEME et GrDF, 2010). Une mise à jour de l'enquête ITOM est *a priori* en cours et devrait actualiser les données disponibles (ATEE, Club Biogaz, 2011).

En ISDND, les intrants sont les déchets non dangereux, soit, les déchets domestiques et municipaux ainsi que les déchets non dangereux de toute autre origine (ex : DIB : déchet industriel banal). Ceux-ci sont donc relativement hétérogènes.

Les ISDND, sont dorénavant constitués en casiers (éventuellement subdivisés en alvéoles) dans lesquels les déchets sont déversés. Du fait du passage de conditions aérobies à des conditions anaérobies (consommation de l'oxygène par tassement des déchets et lors de la fermeture des alvéoles), du biogaz est produit. Celui-ci doit réglementairement être capté. Des réseaux de captages du biogaz sont installés dans les massifs de déchets.

A noter que, depuis quelques années, la gestion en mode bioréacteur tend à se développer, même si aucune donnée n'est disponible à ce jour sur le nombre d'installations fonctionnant ainsi. La gestion en mode bioréacteur est une technique qui consiste à accélérer les processus de dégradation et de stabilisation des déchets dans une enceinte confinée (ADEME et FNADE 2007). Elle est opérée par la maîtrise des principaux facteurs d'optimisation de l'activité microbienne : humidité, température, nature du déchet.

Dans ce secteur des ISDND, le biogaz ne peut pas ou n'est pas toujours valorisé. Il doit alors être torché. Lorsqu'il y a valorisation (cas de 90 sites sur une quatre-centaine d'après Marchais, 2011), la production d'électricité seule, semble être à ce jour la voie la plus répandue. Il est toutefois probable que la cogénération se développe de plus en plus en particulier, pour utiliser la chaleur produite pour le chauffage (traitements) des lixiviats.

En terme de traitement du biogaz capté, peu de données sont disponibles. Il semble que l'élimination de composés tels que les siloxanes ou composés organohalogénés volatiles se fasse par charbon actif. Celui-ci permet aussi l'élimination de l'hydrogène sulfuré (H₂S).

Principaux textes / dispositifs réglementaires

Règlementation ICPE – les ISDND sont soumis automatiquement à une autorisation ICPE (rubrique 2760-2). Lorsque l'installation qui produit le biogaz est un centre de stockage de déchets soumis à autorisation et que l'exploitant valorise le biogaz à l'intérieur du périmètre autorisé, l'installation de combustion peut être considérée comme connexe au centre de stockage de déchets. Les torchères doivent également être considérées comme des installations connexes, quelle que soit leur localisation.

L'arrêté du **9 septembre 1997**⁴⁹, précise les dispositions relatives à la production, collecte et à la gestion du biogaz en centre de stockage de déchets.

Aucun **digestat** n'est produit en ISDND. A la fin de l'exploitation, les casiers sont recouverts et les déchets restent en place.

Concernant la **santé des salariés** des ISDND, elle relève du régime général et est donc suivie par la Caisse Nationale de l'Assurance Maladie des Travailleurs Salariés (CNAMTS). Celle-ci coordonne les organismes du réseau des branches maladie et accidents du travail - maladies professionnelles, soit les caisses primaires d'assurance maladie (CPAM) et caisses d'assurance retraite et de la santé au travail (CARSAT, ex CRAM). La CNAMTS élabore des statistiques par secteur d'activité ou code CTN (Comité Technique National). Elle dispose notamment de données pour le secteur « entreprises de traitement des ordures ménagères et des déchets industriels et commerciaux banals – code 900 BC » incluant *a priori* les ISDND.

⁴⁹ Arrêté du 09/09/97 relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux.

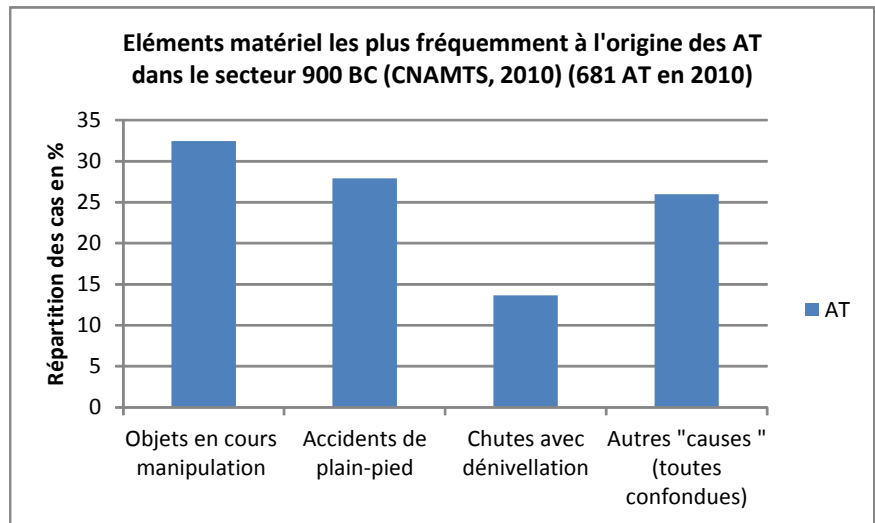
Données sur les ATMP (Accidents du Travail – Maladies Professionnelles) du secteur « entreprises de traitement des ordures ménagères et des déchets industriels et commerciaux banals – code 900 BC » (Source : CNAMTS, 2010)

Parmi les données disponibles à ce jour, la production de biogaz n'est jamais mentionnée.

En 2010, 681 accidents du travail ont été recensés chez les salariés du secteur « 900 BC » (sur 8 287 salariés).

Les principales causes sont : des objets en cours de manipulation (221 cas), des accidents de plain-pied (190 cas) et des chutes avec dénivellation (93 cas).

Douleurs / lumbagos, contusions, plaies et entorses sont les types de lésions les plus fréquemment rencontrés (dans plus de 10 % des AT).



En 2010, 47 maladies professionnelles ont aussi été recensées chez les salariés du secteur 900BC. Il s'agit de troubles musculo-squelettiques (TMS) dont :

- 45 cas d'affections péri articulaires dues à des gestes et postures,
- 2 cas d'affections du rachis lombaire liées aux vibrations.

Données sur les accidents / incidents recensés dans les filières de production / valorisation de biogaz en ISDND

Données issues d'un retour d'expérience mené par l'INERIS (2012) :

L'INERIS a mené, en 2011 et 2012, une analyse sur l'accidentologie en France et en Allemagne des procédés de méthanisation, et de leurs exploitations. Ce retour d'expérience a mis en évidence la difficulté à recueillir des informations sur les incidents et accidents dans les deux pays.

Il apparaît cependant que certaines unités fonctionnelles (centrales de cogénération, systèmes d'injection des solides, pompes, tuyaux, vannes et agitateurs) sont particulièrement vulnérables entraînant des défaillances en termes de sécurité telles que des fuites ou la perte de confinement. Ces conclusions se rapportent à l'ensemble des filières de production de biogaz en digesteurs. *A priori* les ISDND n'étaient pas inclus dans l'enquête. Cependant certains des risques évoqués ci-dessus peuvent aussi survenir dans ces centres. Une différence majeure existe cependant par rapport aux autres filières, la méthanisation ne se déroule pas en digesteur clos mais dans des casiers notamment encore en cours de remplissage. Accidents incidents liés au méthaniseur ou gazomètre ne concernent donc pas cette filière.

Autres bases de données :

Dans la base EPICEA⁵⁰ de l'INRS, trois accidents sont décrits dans des centres de stockage de déchets. Il s'agit d'accidents au moment du déchargement des déchets (chute, basculement camion). (*Pour en savoir plus, se reporter aux n° de dossiers suivants de la base EPICEA : 18794 / 17536 / 16446*). Le biogaz n'est jamais mentionné.

Depuis 1995, dans la base de données ARIA⁵¹ du BARPI, 17 accidents en ISDND sont recensés actuellement incluant les mots-clés biogaz ou méthanisation. La plupart (13) concerne des déclarations de

⁵⁰ EPICEA est une base de données nationale gérée par l'INRS (Institut Nationale de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles) rassemblant plus de 18 000 cas d'accidents du travail survenus, depuis 1990, à des salariés du régime général de la Sécurité sociale. Ces accidents sont mortels, graves ou significatifs pour la prévention. <http://www.inrs.fr/accueil/produits/bdd/epicea.html> ; consulté le 02/10/2012

⁵¹ La base ARIA (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents) recense les incidents ou accidents qui ont, ou auraient, pu porter atteinte à la santé ou la sécurité publiques, l'agriculture, la nature et l'environnement. Elle est gérée par le BARPI (Bureau d'Analyse des risques et Pollutions Industriels) au sein de la Direction Générale de la Prévention

feu (incendies d'alvéoles en général en cours d'exploitation, fuite de méthane enflammée). Deux cas de migrations latérales de biogaz hors du site sont aussi rapportés, ainsi qu'une explosion dans un local de valorisation et une électrification liée à l'alternateur de l'installation de traitement du biogaz.

Mot-clé : biogaz



N°41946 - 30/03/2012 - FRANCE - 47 - NICOLE

E38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux

Un feu se déclare vers 18h10 dans une alvéole de 5 000 m² d'un centre d'enfouissement de déchets ménagers et dégage un important panache de fumée. Un employé ferme les vannes alimentant le réseau enterré de captage de biogaz (méthane) depuis l'alvéole (casier) sinistré. Les pompiers, intervenant avec 2 fourgons et 4 camions citernes, arrosent les flammes tandis que les employés du centre, à l'aide d'engins compacteurs, remuent les déchets en les ramenant vers un point commun afin de réduire la surface de feu. Les pompiers protègent aussi la végétation aux alentours et éteignent l'incendie vers 22h45 avec 4 lances alimentées par la citerne incendie du site. Le lendemain, un nouveau départ de feu est maîtrisé par arrosage et utilisation d'une pelle mécanique pour déplacer les déchets et éliminer les foyers couverts. La géomembrane permettant l'étanchéité de l'alvéole et les drains de récupération du biogaz se sont enflammés, produisant de petites explosions selon certains témoins. La géomembrane est détruite ainsi que plusieurs équipements du réseau de collecte de lixiviat et de biogaz (sections de canalisations, drains de dégazage, vannes de conduite de biogaz), de 2000 à 3000 m² de déchets ont brûlé. L'ensemble des eaux d'extinction, environ 120 m³, rejoignent le bassin de rétention des lixiviats du centre d'une capacité de 4000 m³. Dans l'attente des réparations, le biogaz dégagé par le casier sinistré se dégage directement à l'atmosphère. L'exploitant définit une bande de 10 m sans dépôt de déchets autour de la géomembrane qui est décaissée et remplacée, il reçoit son protocole de coordination avec les pompiers en cas d'incendie.



N°40663 - 23/07/2011 - FRANCE - 39 - COURLAUX

E38.11 - Collecte des déchets non dangereux

Un feu se déclare vers 15h30 (heure déterminée avec l'aide de la caméra de surveillance) dans le casier en exploitation d'un centre d'enfouissement de déchets industriels et ménagers ultimes. Les premières fumerolles peuvent être confondues avec des nuages et une période de pluie vers 17 h retarde l'apparition des flammes à 21 h. L'alerte n'est donnée que le lendemain vers 8h30 par un agent d'exploitation habitant à proximité qui a aperçu des fumées montant du casier.

Les pompiers, sur place à 9 h, éteignent l'incendie vers 12 h à l'aide de 400 à 600 m³ d'eaux de ruissellement puisées dans le bassin de rétention du site situé à 50 m. Durant l'extinction, un employé retourne les déchets avec une pelle sur chenille pour les aérer en surface et faciliter la pénétration de l'eau, puis la zone sinistrée est recouverte de 120 m³ de matériaux inertes : mâchefers, limons et sables grossiers. La surface de déchets concernée est de 200 m² (10x20).

Selon l'exploitant, le feu aurait pris en surface des déchets, mélange de tout-venant de déchetterie, refus de tri et déchets d'entreprises ; le massif était recouvert sur la surface et le talus par un mélange de limons et mâchefers. Retardé par la faible quantité de combustibles et les conditions météorologiques, le feu s'est peu étendu. Aucun signe avant-coureur du feu n'avait été détecté et l'alvéole n'avait pas été réalimentée depuis près de 2 mois. Plusieurs origines sont envisagées : auto-combustion liée à un apport d'air dans le massif de déchets (mais le feu semble avoir pris en surface), auto-inflammation du biogaz se propageant aux déchets (mais le biogaz du casier est déjà capté et la torchère fonctionnait normalement), effet loupe par la présence de débris de verre (peu probable au vu de la météo) ou acte malveillant (les caméras n'ont rien détecté mais un engin incendiaire a pu être lancé depuis l'extérieur du site).



N°40619 - 05/07/2011 - FRANCE - 08 - ETEIGNIERES

E38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux

Une fuite enflammée de méthane se produit en plein air, vers 9h40, dans une société d'enfouissement des déchets industriels et ménagers non dangereux. Le méthane, provenant de la fermentation des déchets organiques enterrés sur le site (biogaz), est capté pour être valorisé en électricité et chaleur. L'exploitant isole le puits de récupération du biogaz, puis alerte les services de secours pour contrôler les risques de propagation. Les pompiers (15 hommes et 2 fourgons) évacuent les employés et éteignent les foyers résiduels.

Aucun impact sur l'environnement et aucun chômage technique ne sont à déplorer.



N°37851 - 04/10/2009 - FRANCE - 11 - NARBONNE

E38.11 - Collecte des déchets non dangereux

Un incendie sur un centre de stockage de déchets non dangereux est découvert par les pompiers vers 12h45 alors qu'ils sont alertés pour « feu dans le massif des corbières ». L'incendie n'a pas été détecté par la société de gardiennage du site. Le personnel de l'exploitation et un sous-traitant, appelés dans le cadre de la procédure d'astreinte de la société, ne parviennent pas à maîtriser l'incendie, le casier "grand vent" étant couvert de flammes à leur arrivée vers 13h30. Une extension de l'incendie aux déchets, voire au massif à l'extérieur du site est crainte. Les pompiers combattent le feu à l'eau ; les flammes sont résorbées à 19h30 et l'incendie sera finalement limité au "casier grand vent". Sous l'effet d'un vent léger, les fumées se sont dirigées vers une zone heureusement non urbanisée.

Les filets du "casier grand vent" servant à prévenir les envois des déchets par vent fort sont détruits et les dispositifs limitrophes de réinjection de lixiviats et de collecte du biogaz du bioréacteur sont dégradés. La dégradation des barrières actives et passives (notamment GSB pour compenser l'absence d'argile) est redoutée.

L'exploitant estime que le feu s'est initié au sein des déchets livrés les 2 jours précédents. Aucun chargement à risque n'était prévu, mais l'exploitant émet des réserves sur des chargements d'encroûtements non valorisables issus de déchetteries côtières (fusée de détresse ? déchet chaud ?), des dépôts de feu ayant déjà eu lieu avec ces produits. Le tapage de déchets légers (notamment des morceaux de plastique émergeant) sur les flans du casier a favorisé la propagation de l'incendie à son ensemble. L'exploitant :

- réalisera des contrôles thermographiques pour s'assurer de l'absence de feu couvant,
- augmentera la fréquence des contrôles par la société de gardiennage en dehors des heures d'ouverture
- reconstruira un casier grand vent de meilleure conception (notamment avec des flans d'1m de terre) et dans l'attente, augmentera la fréquence de recouvrement des déchets pour prévenir les envois,
- remet en état les moyens de traitement du biogaz (arrêtés pendant l'incendie pour éviter les entrées d'air et la propagation de l'incendie) pour prévenir les odeurs,
- améliore en collaboration avec le SDIS le plan d'intervention sur le site et programme un exercice.

La solution d'équiper le personnel d'exploitation avec du matériel de détection infra-rouge pour vérifier l'absence de points chauds en fin de journée est écartée en raison des difficultés d'interprétation des photos prises par ce matériel, de sa fragilité et de sa sensibilité aux intempéries.

N°40347 - 28/05/2011 - FRANCE - 64 - HASPARREN
E38.21 - Traitement et élimination des déchets non dangereux
 En période de fortes chaleurs, un feu se déclare vers 15h15 dans un centre d'enfouissement des déchets ménagers et industriels non dangereux, au niveau du front de taille d'une alvéole de 3 000 m² contenant des déchets à l'air libre, en cours d'enfouissement. Les employés du site étouffent le feu en le couvrant de terre avec une tractopelle et une vingtaine de pompiers refroidit avec des lances la zone sinistrée qui comporte des poches de biogaz (gaz de fermentation) et de nombreux conduits pour le canaliser. Une épaisse fumée noire se dégage de l'incendie mais les réseaux de drain et de transport du biogaz ne sont pas touchés. Un technicien extérieur, spécialisé dans le contrôle d'émanations toxiques, effectue des mesures de toxicité dans l'air qui s'avèrent négatives. Le sinistre est maîtrisé vers 19 h. Le feu reprend 3 jours après en soirée et se propage sur le flanc de l'alvéole déjà accidentée, provoquant l'exaspération des riverains qui bloquent le site pour exiger une meilleure surveillance de celui-ci, les deux incendies ayant été détectés par des voisins. Pour lever le blocage, l'exploitant prend les mesures suivantes :

- travaux d'urgence pour empêcher le renouvellement de l'incendie : couverture de l'alvéole accidentée avec des matériaux inertes après étalement de ses déchets, séparation de la zone chaude de l'alvéole avec celle de poursuite d'exploitation par une digue de 1 x 0,8 m, réparation de la géomembrane superficielle de la digue qui a été endommagée par l'incendie ;
- mise en place d'une surveillance permanente du site et d'un système d'astreinte pendant la durée des travaux, une solution définitive de surveillance et d'astreinte est proposée à l'issue des travaux

Un contrôle thermique nocturne effectué 21 jours après l'accident montre qu'un secteur de l'alvéole dépasse encore les 40° C sur le flanc de talus d'où s'échappent des fumerolles et une odeur de déchets brûlés par des fissures ouvertes en partie haute. L'exploitant surveille cette zone pour limiter les entrées d'air dans le confinement car l'oxygène peut réactiver l'incendie, recharge en matériaux la zone de fissure pour parfaire le confinement et suit l'évolution de celui-ci (température, état de surface, tassements)

L'exploitant modifie également la procédure à appliquer en cas de forte chaleur sur ses différents sites d'enfouissement de déchets: disponibilité d'un stock de matériaux facilement accessible permettant de recouvrir la zone ouverte de l'alvéole en exploitation d'une couche de 0,2 m en cas de problème, disponibilité des engins du site en dehors des heures de fonctionnement avec masque à cartouche dans les cabines, réduction des surfaces en exploitation dans la mesure du possible, recouvrement des talus et front de taille par des matériaux à l'avancement.

L'inspection des IC demande également à l'exploitant de contrôler l'intégrité des drains de collecte des lixiviats dans l'alvéole, l'étanchéité des géomembranes de flancs et de fond du casier en exploitation à l'occasion de la réparation de la géomembrane de la digue de séparation. Un contrôle des eaux souterraines en aval hydraulique de l'alvéole est également demandé pour vérifier l'absence de fuite de lixiviats.

N°40305 - 15/04/2011 - FRANCE - 03 - MAILLET
E38.11 - Collecte des déchets non dangereux
 Dans un centre d'enfouissement de déchets, un employé pèse un poids lourd chargé de déchets quand il détecte vers 18 h un départ de feu sur la zone d'exploitation recouverte de matériaux de couverture intermédiaire (matériaux inertes). Le feu se propage à la tranchée drainante voisine dont le biogaz n'est pas encore connecté au réseau de collecte du site et redouble d'intensité. Voyant qu'il ne peut maîtriser le feu, il prévient trop tardivement sa hiérarchie qui alerte les services de secours et fait apporter de la terre par un chargeur pour recouvrir la zone en feu. Les 25 pompiers engagés arrosent le feu à partir de 18h33 pendant que l'exploitant épand de la terre sur l'alvéole de stockage touchée par l'incendie. Il demande des moyens d'épandage supplémentaires à une exploitation agricole et une société voisines ainsi qu'à la commune : 2 tracteurs avec remorques et une tractopelle sont ainsi utilisés pour épandre de la terre jusqu'à ce que le feu soit maîtrisé vers 21h40. Les pompiers n'ont pas réussi à utiliser la prise d'eau du bassin incendie pour des raisons inconnues et doivent se ravitailler en eau au village. L'exploitant assure la surveillance nocturne de l'alvéole et fait appel à plusieurs reprises aux pompiers dans la nuit et les 48 h suivantes après avoir détecté des fumerolles, qui sont arrosées et recouvertes de terre. L'incendie est resté localisé en surface de l'alvéole et n'a pas endommagé sa membrane d'étanchéité, écartant ainsi des risques de pollution des sols et de la nappe.

L'exploitant envisage d'installer une colonne sèche le long de la piste menant à l'alvéole incendiée, de mettre en place un stock de matériaux de recouvrement à proximité immédiate de la zone d'exploitation et étudie l'achat d'une motopompe pour pallier à l'indisponibilité de la prise d'eau du bassin.

N°34001 - 14/12/2007 - FRANCE - 54 - PONT-A-MOUSSON
E38.11 - Collecte des déchets non dangereux
 Un accident de travail se produit vers 14h30 dans une décharge d'ordures ménagères. Un employé est grièvement brûlé par un arc électrique provenant d'un alternateur de l'installation de traitements des biogaz.

N°33744 - 09/10/2007 - FRANCE - 77 - CHATEAU-LANDON
E38.11 - Collecte des déchets non dangereux
 Un feu se déclare vers 10h30 dans une décharge d'ordures ménagères. Un employé détecte des fumées provenant du flanc ouest du centre de stockage n° 2. Les pompiers sont alertés pour réaliser des mesures toxicologiques.

Les investigations commencent à 16 h à l'aide d'une pelle mécanique pour déterminer l'origine des fumées. Les secours arrosent les déchets par intermittence. A 21 h, l'un des puits de captage du biogaz proche est isolé pour éviter toute dépression et appel d'air susceptible d'attiser le foyer. Les excavations à la pelle mécanique sont interrompues vers 1h15 le lendemain en l'absence de fumées. L'incendie qui reprend une première fois vers 6 h sera éteint par les pompiers à 7 h, un 2ème départ à 14h30 sera maîtrisé par un épandage de terre. La couverture en terre des déchets est alors enlevée sur une surface de 20 m² pour permettre l'arrosage des déchets. La situation est finalement maîtrisée vers 16h30. Une thermographie par caméra infrarouge réalisée à 19 h confirme l'absence de point chaud résiduel.

L'origine de l'incendie pourrait être soit un phénomène interne lié à la fermentation des ordures, soit la présence de résidus déjà incandescents au moment du stockage et qui auraient couvés pendant 10 mois. Un acte de malveillance n'est cependant pas exclu.

N°31654 - 23/03/2006 - FRANCE - 63 - CLERMONT-FERRAND
E38.11 - Collecte des déchets non dangereux
 Une déflagration se produit dans le poste électrique de la centrale de valorisation des biogaz d'un centre d'enfouissement technique de classe 2. Les dommages matériels sont importants : détérioration de l'ensemble des cellules électriques contenues dans le poste, fissurations de l'enveloppe en béton du local, porte d'accès soufflée, centre de stockage privé d'électricité. Un premier groupe électrogène est mis en place afin d'alimenter ponts-basculés, matériel informatique et éclairages, le second est destiné au fonctionnement de la torchère. Des experts sont diligentés afin de déterminer les causes de cette explosion.

**N°25244 - 02/08/2003 - FRANCE - 70 - VAIVRE-ET-MONTOILLE***E38.11 - Collecte des déchets non dangereux*

Un incendie se déclare dans une alvéole d'un centre de stockage de déchets de classe II, à l'origine d'un même sinistre 15 jours auparavant. Les personnels riverains du site alertent les secours et se rendent sur place. L'exploitant organise l'intervention : 3 pelles mécaniques et 2 tracteurs bennes sont utilisés pour épandre 800 m³ de terre sur les 1000 m² embrasés et ainsi circonscrire le feu. Les pompiers assurent eux, la sécurité du personnel intervenant. Une fois l'incendie éteint, des rondes sont organisées pour éviter la reprise de feu. La zone concernée est inexploitable mais aucun puits de collecte de biogaz n'est atteint, la géomembrane est intacte et aucune incidence sur les infrastructures de l'établissement n'est à signaler. L'origine de l'accident est inconnue, une enquête de gendarmerie est menée. Un sinistre de même nature portant sur la même parcelle a eu lieu 15 jours auparavant : l'arrêté préfectoral pris à ce moment reste valable, l'exploitant doit fournir un rapport d'accident, une évaluation précise des dommages, une proposition de travaux précisant les remèdes à apporter.

**N°25169 - 19/07/2003 - FRANCE - 70 - PUSEY***E38.11 - Collecte des déchets non dangereux*

Un incendie se déclare dans une alvéole d'un centre de stockage de classe 2. Le personnel du site et les habitants alertent les pompiers. Arrivé 15 min plus tard, le chef de centre aidé du personnel du site finalise l'organisation de l'intervention à l'aide de 3 pelles mécaniques et 2 ensembles tracteurs bennes. Les pompiers maîtrisent l'incendie et quittent le site vers 9 h. 1 000 m³ de terre ont été utilisés pour étouffer le feu qui s'est étendu sur 1 500 m². Le site reste sous surveillance. Le lendemain, vers 7 h, le gardien observe des fumées et alerte de nouveau le chef de centre qui organise une nouvelle intervention mobilisant 2 pelles mécaniques et 2 ensembles tracteurs bennes. Le feu est éteint vers 9 h ; 3 puits de collecte des biogaz sont remblayés et recouverts pour éviter toute entrée d'air dans le massif de déchets. Le feu s'est étendu sur 300 m². Cette fois-ci, 300m³ de terre ont été nécessaires pour arrêter toute combustion et protéger les abords sur environ 5 m de large autour de la zone incriminée. Les fumées des incendies se sont dirigées vers une zone habitée sur environ 5 km. Le grillage face sud de l'alvéole a été endommagé pour laisser un libre passage. Un acte de malveillance, consistant à récupérer des câbles de cuivre dans l'alvéole seraient à l'origine de l'incendie, les personnes ayant mis le feu aux gaines de protection des fils de cuivre. En effet, un stock conséquent de fils de cuivre a été retrouvé par le personnel du site arrivé en premier sur le lieu de l'incendie. A la suite de cet incendie, une société doit remettre en état la clôture dans les meilleurs délais, une surveillance du site doit être assurée dans un premier temps jusqu'à fin juillet. Les experts techniques de l'entreprise doivent passer pour diagnostiquer la présence éventuelle de zones chaudes ou encore en combustion. Un plan d'action pour garantir la sécurité de l'installation doit être élaboré. Malgré l'absence de procédure écrite de plan d'intervention en cas d'incendie, le personnel du site sous la direction du chef de centre a été efficace. Il est prévu de rédiger un plan d'intervention dans les meilleurs délais. Un arrêté préfectoral complémentaire prescrit le faire évaluer par l'exploitant les conséquences de l'incendie sur l'exploitation. Les 3 puits de dégazage devront être forés à la fin d'exploitation dans le cadre du réaménagement du site.

**N°22695 - 02/06/2002 - FRANCE - 51 - BEINE-NAUROY***E38.11 - Collecte des déchets non dangereux*

Un riverain alerte en soirée les pompiers après avoir remarqué des fumées suspectes sur un centre d'enfouissement technique de déchets urbains (CET 2). Les déchets en combustion sont contenus dans un casier dont l'exploitation a pris fin depuis plusieurs années ; ce dernier est recouvert d'une couverture d'argile et équipé d'un réseau de dégazage et de collecte de biogaz. La remise à l'air libre accidentelle d'un ancien puits de collecte de lixiviats, normalement condamné par une chape en béton mais d'où s'échappaient les fumées, serait à l'origine du sinistre constaté. Selon l'exploitant, cette chape se serait rompue sous la couverture d'argile quelques jours plus tôt vraisemblablement à la suite des passages d'engins. L'apport d'oxygène frais a favorisé la combustion des déchets enfouis. Les services d'incendie et de secours déversent dans un premier temps 4 000 l d'eau dans l'ouvrage. Cette intervention restant sans effet, des travaux de terrassement sont entrepris le lendemain pour rechercher et tenter d'extraire le foyer. Ces travaux auront pour effet d'attiser la combustion et après extraction de 200 m³ de déchets, l'excavation ainsi creusée sera finalement comblée avec de la craie provenant du site pour étouffer l'incendie.

**N°22485 - 03/01/2002 - FRANCE - 43 - SAINT-PAUL-DE-TARTAS***E38.22 - Traitement et élimination des déchets dangereux*

Un feu se déclare le 3 janvier sur le talus des dépôts de déchets broyés dans une décharge. L'intervention des pompiers dure 48 h et des entreprises de travaux publics recouvrent le foyer de terre. Des reprises de feu seront constatées les 27 janvier, 2, 9 et 16 février nécessitant de nouvelles interventions des pompiers et des entreprises. Le sinistre est considéré comme définitivement maîtrisé à la fin du mois de mars. Un acte de malveillance semble écarté. La production de biogaz liée à une mise en couche trop épaisse et pas assez espacée des déchets broyés est probablement à l'origine de la combustion du tas. L'incendie n'a pas eu de conséquences notables sur le site, les forêts environnantes et la population assez éloignée (plus de 200 m).

**N°18378 - 01/07/1999 - FRANCE - 77 - CREGY-LES-MEAUX***E38.11 - Collecte des déchets non dangereux*

Du biogaz gagne les canalisations, les caves et les vides sanitaires d'un lotissement construit récemment à 10 m d'une ancienne décharge de déchets ménagers. Des odeurs alertent la municipalité et les habitants du lotissement qui sont relogés dans un hôtel durant 10 jours, temps nécessaire aux pompiers et aux experts pour identifier l'origine de l'incident et déterminer les suites à donner. Des piézomètres sont posés pour effectuer des mesures, puis une ceinture de puits de ventilation mécanisée permet d'assainir le terrain et les habitations. Les travaux d'urgence sont évalués à 6 MF. La décharge en fin d'exploitation avait été réaménagée en coulée verte durant l'été 1999 ; une couverture de 5 m de terre a entraîné la mise en pression des déchets et la migration du biogaz insuffisamment drainé par les failles truffant le terrain (anciennes carrières de gypse). Des travaux sont envisagés (8 à 10 MF) : captage/traitement du biogaz à améliorer, lixiviats et eaux pluviales à collecter, etc.

**N°6760 - 02/07/1995 - FRANCE - 65 - RABASTENS-DE-BIGORRE***E38.11 - Collecte des déchets non dangereux*

Un feu dans une décharge d'ordures ménagères (OM) est combattu durant 4 jours. Des lagunes sont creusées pour retenir les effluents pollués qui sont pompés et dirigés sur la station d'épuration. Une chute importante d'ordures dans une lagune provoque un débordement des lixiviats. L'ARROS est pollué, une station de pompage est arrêtée dans le Gers. La sécurité civile installe citernes souples (capacité totale 25 m³), rampes de distribution et pompes pour alimenter en eau 800 personnes durant 24 h, les agriculteurs cessent toute irrigation. La commune et le SICTOM font appel à d'importants moyens privés. La décharge était arrivée en fin de vie. Les déchets non compactés, non recouverts, généraient une importante quantité de biogaz à l'origine de nombreux incendies. L'intervention fut inadaptée : utilisation d'une trop grande quantité d'eau dont une partie s'est déversée en rivière. Les dommages sont évalués à 3 MF. La décharge sera réhabilitée en 4 ans (coût total : 8,2 MF, frais de fonctionnement 0,93 MF/an).



N°7054 - 12/06/1995 - FRANCE - 95 - LE PLESSIS-GASSOT

E38.11 - Collecte des déchets non dangereux

Un agriculteur perçoit depuis longtemps une odeur de gaz dans sa propriété. Du gaz s'enflamme quand il présente une allumette au niveau de la couverture d'un ancien puits placé au centre de la cour de son exploitation. Une torchère est mise en place pour brûler le gaz dont le débit est évalué à 40 m³/h (1 à 2 mbar). Le mélange gazeux (57 % CH₄, 30 % CO₂ et 13 % N₂) a pour origine la dégradation anaérobie de déchets organiques enfouis dans l'une des alvéoles, en fin d'exploitation et non drainée en biogaz, d'une importante décharge située à 250 m de l'exploitation agricole. L'exploitant de la décharge collecte le gaz à l'aide d'une station de pompage de 1 000 m³/h jusqu'à mise en place des mesures de protection définitives (drainage, etc.).

Mot-clé : méthanisation (hors redondance avec précédente recherche)



N°35889 - 21/02/2009 - FRANCE - 13 - SAINT-MARTIN-DE-CRAU

E38.11 - Collecte des déchets non dangereux

Un feu se déclare vers 0h15 dans une décharge d'ordures ménagères, 3 000 m³ de déchets sont enflammés. Les secours et les services techniques de la ville réalisent une tranchée sur 150 m pour isoler le feu. Ils étalent les déchets brûlés avec des bulldozers, les noient et les recouvrent de 800 t de terre. D'après l'exploitant, l'humidité due à la pluviométrie de ces dernières semaines a accéléré la dégradation et donc la méthanisation des déchets, rendus plus inflammables.

Données sur les postes de travail dans la filière production, valorisation de biogaz en ISDND

A noter : des informations sur les postes de travail et le temps passé sont recherchées dans le but d'évaluer l'exposition à des dangers des opérateurs.

Une des particularités de cette filière est, comme déjà évoqué, le fait que la production de biogaz se fait de manière spontanée dans les alvéoles remplies de déchets et non pas en système entièrement clos comme dans les autres filières utilisant des digesteurs. Même si le réseau de biogaz a pour objectif de canaliser et éviter les émissions diffuses de biogaz, il ne peut capter l'ensemble du biogaz produit.

Les opérateurs intervenant sur les alvéoles en cours d'exploitation (pour le chargement, le nivellement de déchets) sont donc exposés à du biogaz et occupent, d'après les professionnels du secteur, ce poste toute la journée. Ces opérateurs ne sont en revanche jamais piétons mais sont dans des engins avec cabines ventilées et équipées de médias filtrants.

A noter que la gestion en mode bioréacteur se développe et constitue la pratique de stockage qui présente le plus faible taux d'émission atmosphérique de gaz. Il est considéré que la performance globale est supérieure à 90 % de captage des gaz produits (ADEME et FNADE, 2007). Dans les autres centres, 60 à 80 % du biogaz serait capté (INERIS, 2006).

Par ailleurs comme dans les autres filières, des opérations de suivi et maintenance du réseau de biogaz mais aussi de pose doivent être effectuées en ISDND. D'après des professionnels du secteur, ces opérations sont de plus en plus filialisées. Des opérateurs sont ainsi dédiés à ces postes et interviennent sur plusieurs sites. Ils sont donc potentiellement exposés à du biogaz, tout au long de la journée lorsqu'ils posent, réparent ou purgent les réseaux. Ils pourraient aussi être sujets à des TMS liés à des postures lors de la pose de ces réseaux.

Données sur la composition chimique et microbiologique des substrats des filières de production, valorisation de biogaz en ISDND

Pour rappel, la filière en ISDND ne conduit pas à la production d'un digestat. Contrairement aux autres filières, seules des données relatives aux matières intrantes sont donc fournies ici.

Éléments traces métalliques (ETM) et micropolluants organiques dans les substrats (déchets)

Les déchets non dangereux entrant en ISDND sont des matériaux hétérogènes qui ont des propriétés chimiques variables en fonction de leur composition. Celle-ci a évolué en fonction du type de déchets enfouis, de l'évolution de l'économie et des modes de vie (Gourc et Staub, 2009).

Cependant d'après l'étude MODECOM (ADEME, 2009), entre 1993 et 2007, la composition globale des ordures ménagères a peu changé. Les grandes catégories sont les déchets putrescibles (32,2 %), les papiers-cartons (21,5 %), le verre (12,7 %), les plastiques (11,2 %), les textiles (10,6 %, dont les textiles sanitaires), les métaux (3 %) et divers matériaux composites ou non classés (8,9 %).

En terme de composition en ETM, le rapport ADEME (2005) fournit des concentrations moyennes (issues de la 1^{ère} enquête MODECOM en 1993) en indiquant qu'elles ont diminué depuis. Les niveaux sont indiqués dans le tableau ci-dessous.

Teneurs en ETM des ordures ménagères en France (ADEME, 2005, d'après 1^{ère} étude MODECOM en 1993).

ETM	As	B	Cd	Cr	Co	Cu	Mn	Hg	Mn	Ni	Se	Zn
Concentrations moyennes des ordures ménagères en mg/kg MS	4	14	4	162	119	1108	427	3	1	817	0	1060

Concernant les micropolluants organiques, ils peuvent être divers et dépendent aussi des déchets et de l'évolution de nos modes de consommation. L'étude RECORD (2012) présente par exemple une analyse et prospective des substances émergentes présentes dans les déchets (ex : nanoparticules, ...).

Microorganismes présents dans les substrats (déchets)

L'étude RECORD (2003) fournit un tableau des principaux microorganismes pathogènes susceptibles de se retrouver dans les déchets (d'après Schwartzbrod *et al.*, 1998). Ces différents agents pathogènes (bactéries virus et parasites) ont pour origine les couches jetables, serviettes hygiéniques, mouchoirs, nourriture, papier....

Les déchets constituent un milieu favorable à la prolifération de certains microorganismes (bactéries et champignons). Les ordres de grandeur en bactéries viables peuvent varier de 4.10^6 à 7.10^8 UFC/g (RECORD, 2002). Après quelques semaines les genres bactériens principalement représentés sont *Bacillus*, *Citrobacter*, *Agrobacter*, *Enterobacter* et *Pseudomonas*.

S'agissant des champignons, les genres *Aspergillus* et *Penicillium* sont les principaux.

Les espèces de *Candida albicans* sont les levures majoritairement observées.

Par ailleurs, d'après un médecin du travail du secteur, les déchets pourraient aussi être propices à la présence de nuisibles (ex : rats) pouvant être vecteurs de maladies telle que la leptospirose.

Pour les grosses installations, les installations de refroidissements (Tours aéroréfrigérantes) pourraient aussi être à l'origine de la présence de Légionelles.

Principaux microorganismes susceptibles de se retrouver dans des déchets d'après Schwartzbrod *et al.* (1998) cité par RECORD (2003).

MICROORGANISMES (classés dans le Groupe 2 sauf ceux noté d'une *)	PATHOLOGIE	TEMPS DE SURVIE
Bactéries entériques (G-) <i>Salmonella sp</i> <i>Shigella sp</i> <i>Yersinia sp</i> <i>Campylobacter jejuni</i> <i>Escherichia coli</i> (souches pathogènes)	Salmonellose Dysenterie bacillaire Gastro-entérite Gastro-entérite Gastro-entérite	< 70 jours mais généralement < 20 jours
Virus Entériques Virus de l'Hépatite A et E* Rotavirus Entérovirus Poliovirus Coxsackievirus Astrovirus	Hépatite infectieuse Gastro-entérite Gastro-entérite Poliomyélite Infect respiratoire, Gastro-entérite Gastro-entérite	< 100 jours mais généralement < 20 jours dans le sol
Virus autres Virus des Hépatites B*, C* Virus de l'immunodéficience humaine acquise (HIV)*	Hépatite infectieuse SIDA	Dans le sang ou les liquides humains 8 jours qqs h à 24 h
Parasites Protozoaires <i>Cryptosporidium sp</i> <i>Giardia intestinalis</i> <i>Entamoeba histolytica</i> <i>Balantidium coli</i> <i>Toxoplasma gondii</i> Helminthes <i>Ascaris lumbricoï des</i> <i>Trichuris trichiura</i> <i>Toxocara sp</i> <i>Taenia sp</i>	Gastro-entérite Diarrhée Dysenterie Diarrhée et Dysenterie Toxoplasmose Troubles gastro-intestinaux Diarrhée, douleurs abdominales Diarrhée, douleurs abdominales Nervosité, Insomnie, Troubles digestifs, Anorexie	< 20 jours mais généralement < 10 jours Plusieurs mois

* microorganismes appartenant au Groupe 3 (arrêté du 18 juillet 1994)

NB : Ces valeurs de micropolluants et microorganismes dans les déchets sont fournies à titre indicatif mais ne sont :

- *ni représentatives de l'ensemble des déchets,*
- *ni représentatives de l'exposition potentielle des opérateurs via ces matières.*

Dans le cas d'évaluations de risques sanitaires (à des substances chimiques ou microorganismes), les voies d'exposition considérées sont l'ingestion, l'inhalation et le contact cutané.

- *Le contact cutané est souvent considéré comme négligeable au regard des autres voies (barrière cutanée), bien que certaines substances (ex : toluène) sont reconnues avoir une pénétration cutanée pouvant être importante. Cependant, moins de valeurs toxicologiques de référence sont disponibles pour cette voie et, en santé du travail, les valeurs limites ne concernent que la voie inhalation. De plus, dans les ISDND, la majorité des opérations est effectuée aux moyens de matériels ; les opérateurs n'entrent donc pas en contact direct avec les matières et, si cela devait être le cas, des moyens de protections (gants, combinaisons) sont employés.*
- *Concernant l'ingestion, s'agissant de travailleurs, il est peu probable que les matières en question soient ingérées volontairement. Un portage main-bouche est envisageable mais a priori il y a peu de manipulations directes : un lavage des mains est en tous les cas indispensable. L'exposition peut aussi se faire par ingestion de poussières.*
- *Par ailleurs, les travailleurs peuvent être exposés à des substances chimiques et microorganismes par inhalation. Une attention doit donc être portée aux dangers volatiles, aérosolisés ou adsorbés sur des particules inhalables, thoraciques ou alvéolaires⁵². Comme déjà indiqué, les valeurs limites d'exposition en santé du travail concernent cette voie inhalation.*

Sur ces bases, il est donc possible de considérer qu'un opérateur d'une filière de production, valorisation de biogaz en ISDND peut être exposé à des dangers chimiques et microbiologiques, par inhalation ou ingestion de poussières, lors des étapes de gestion des déchets entrants ou *via* le biogaz.

Dangers « inhalables » issus des déchets

Quelques études ont été menées afin de caractériser les polluants émis dans les installations de stockage de déchets. Le rapport INVS *et al.* (2004) propose un bilan des **composés volatiles** pouvant être retrouvés ; ils représentent les polluants du biogaz (*cf.* section suivante).

L'étude de RECORD (2001) peut notamment être citée : elle concerne deux centres de stockage d'ordures ménagères en France, au niveau desquels des mesures aux postes de travail et en différentes ambiances ont été réalisées. Des COV, majoritairement représentés par des **cétones, aldéhydes et alcools** ont été mis en évidence. Certains sont des composés odorants.

Le poste « conducteur d'engins de l'alvéole (en exploitation) » est souvent identifié comme celui au niveau duquel les concentrations en micropolluants sont les plus élevées. Cela concerne le benzène (5 à 63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), l'éthanol (392 à 3007 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), le trichloréthylène (234 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), le formaldéhyde (7 à 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), les poussières totales (0,358 à 1,060 mg/m^3). Cependant les niveaux restent relativement faibles, au regard des mesures en ambiance urbaines ou des VME⁵³ fixées (ex : [trichloréthylène] < 0,3 % de sa VME). Seules les poussières totales dépassent parfois, pour des prélèvements de longue durée les valeurs guides de l'OMS (0,12 mg/m^3 sur 24H). A noter que concernant les HAP, les concentrations sont du même ordre qu'en ambiance urbaine et seraient principalement liées aux mouvements des véhicules sur les sites d'après RECORD (2001).

Le rapport d'experts (ORS, 2010) présentent quelques **études épidémiologiques** relatives aux troubles de santé chez les travailleurs d'installations de stockage de déchets. Très peu de données concernent uniquement des déchets non dangereux, c'est pourquoi, à ce jour, soit il n'y a pas de donnée, soit elles sont insuffisantes pour conclure quant au niveau de preuves. Dans le cas d'études à l'étranger concernant des centres de stockages de déchets ménagers et industriels, les experts ont attribué un niveau de preuve

⁵² En santé au travail, les fractions de particules devant être contrôlées sont majoritairement les fractions inhalables et dans certains cas, les fractions thoraciques ou alvéolaires (INRS, 2007).

⁵³ VME : valeur moyenne d'exposition (valeur limite d'exposition professionnelle définie pour 8 H d'exposition)

possible entre les troubles respiratoires et des symptômes généraux (gastro-intestinaux, dermatologiques, oculaires, neurologiques) et l'exposition des travailleurs de ces centres.

Niveaux de preuves attribués, par les experts ayant élaboré le rapport ORS (2010), aux liens entre exposition des professionnels des centres de stockage de déchets et des effets sanitaires.

Pathologies	Niveau de preuve Professionnels	
	uniquement déchets ménagers	Déchets ménagers et industriels à l'étranger
Tous cancers	Pas de données	Pas de données
Troubles du développement fœtal : petits poids à la naissance	Pas de données	Pas de données
Malformations congénitales	Pas de données	Pas de données
Troubles respiratoires	Conclusion impossible	Possible
Symptômes généraux (gastro-intestinaux, dermatologiques, oculaires, neurologiques)	Conclusion impossible	Possible

L'étude de Gelberg (1997) rapportée par l'INVS *et al.* (2004) peut aussi être mentionnée. La prévalence de différents symptômes a été estimée chez des employés d'une décharge en comparaison à d'autres salariés. En particulier, une analyse a été réalisée en fonction du poste occupé. Les conducteurs d'engins représentent les opérateurs présentant le plus de symptômes.

Concernant les **bioaérosols** dans des milieux de travail, Goyer *et al.* (2001) indiquent que les bioaérosols dominants pour le tri des déchets domestiques sont *Aspergillus*, *Penicillium*, Bactéries *Actynomyces*. Les auteurs rapportent des niveaux de concentrations en bactéries totales, bactéries gram négatives, actinomycètes thermophiles, moisissures et endotoxines présentées dans le tableau ci-contre.

Concentrations de bioaérosols mesurés dans des ambiances de travail (Goyer *et al.*, 2001).

		Extérieur	Tri déchets domestiques
bactéries totales	UFC/m ³	10 ²	10 ⁴
bactéries Gram négatives		10 ¹	10 ³
actinomycètes thermophiles		10 ²	10 ⁰
moisissures		10 ³	10 ⁴
endotoxines	UE/m ³	np	0-990*

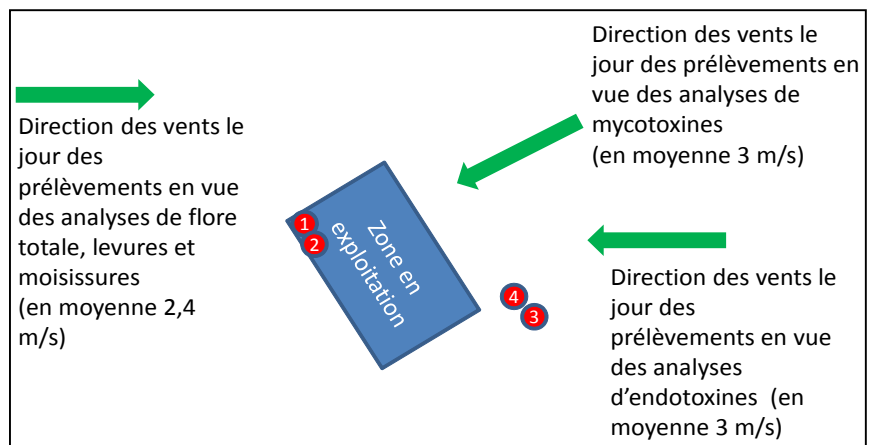
*np : non précisé ; * milieu de travail : traitement de déchets (détails non fournis)*

Aucune valeur limite professionnelle n'est disponible en France pour les microorganismes et les endotoxines. Pour les endotoxines des valeurs de 50 UE/m³ et 200 UE/m³ sont proposées respectivement en Allemagne et aux Pays-Bas (INRS, 2011).

Dans l'étude RECORD (2001), des niveaux de 2,0.10⁴ à 1,8.10⁵ CFU/m³ en bactéries ont été relevés au niveau de l'ambiance de l'alvéole ou à une vingtaine de mètres au-dessus. Les niveaux en champignons varient de 0,4 à 2,0.10⁴ CFU/m³ au niveau de l'alvéole (< 500 CFU/m³ 20 m au-dessus) et ,en endotoxines de 1,3 à 12 EU/m³ au niveau de l'alvéole et de 1,5 à 7 EU/m³ 20 m au-dessus.

A titre de complément, il nous a été fourni des résultats d'analyses de bioaérosols au niveau d'un site de stockage actuellement en exploitation en France.

Des mesures de bioaérosols ont été réalisées en 4 points. Deux points (1 et 2) sont situés sur une zone en cours de remplissage et, deux autres (3 et 4) en limite du site. Des teneurs moyennes (2 mesures de quelques minutes) de 1 355, >1 500 et >1 500 UFC/m³ ont été relevées respectivement en flore totale, levures et moisissures au niveau du point n°1. Les valeurs pour le deuxième point sont plus faibles (respectivement 610, 145 et 305 UFC/m³) ceci pouvant être expliqué par l'hétérogénéité des déchets.



Au niveau des deux autres points situés en limite de propriété, les valeurs sont plus faibles encore et de l'ordre des valeurs ambiantes en milieu rural (d'après les rédacteurs du rapport d'étude).

Concernant les endotoxines, la seule valeur nettement supérieure à la limite de quantification a été relevée au niveau du point 1 (1,19 EU/m³). (Les valeurs pour les points 2, 3 et 4 sont respectivement de 0,40 - 0,46 et < 0,48 EU/m³). S'agissant des mycotoxines, aucune valeur n'a été quantifiée (< 0,02 ng/m³).

A noter que lors de ces prélèvements, les vents dominants étaient tels que pour les analyses de flore totale, moisissures et levures les points de prélèvements 3 et 4 pouvaient être influencés par les déchets alors que pour les analyses d'endotoxines et mycotoxines, ils ne l'étaient pas (cf. figure ci-dessus).

Les valeurs obtenues ne sont pas représentatives d'une exposition sur 8h de travail, mais restent des valeurs instantanées que l'on ne peut extrapoler.

Données sur la composition chimique des biogaz des filières de production, valorisation de biogaz en ISDND

Au cours de la phase méthanogène stable en ISDND, il est admis que les teneurs des deux composants majeurs du biogaz se situent autour de 55 ± 5 % pour le méthane **CH₄** et de 45 ± 5 % pour le dioxyde de carbone **CO₂** (INVS *et al.*, 2004). Cependant dans certaines conditions, ces teneurs peuvent varier. D'après Rasi *et al.*, (2007), la concentration en **CH₄** du biogaz produit en centre de stockages de déchets varie de 37 à 68 %.

Le méthane est un gaz inflammable qui, s'il se retrouve en mélange stœchiométrique dans l'air, peut exploser en cas de source d'ignition. Le dioxyde de carbone est quant à lui inerte.

Les autres composés présents dans le biogaz sont suffisamment peu abondants pour n'avoir qu'une influence négligeable sur les caractéristiques d'**explosivité** du mélange biogaz/air (INERIS, 2008).

D'après l'INERIS (2008), la LIE - limite inférieure d'explosivité se situe autour de 5 % v/v et la LSE - limite supérieure d'explosivité varie de 15 % pour du méthane pur à 11,4 % /v, si le méthane n'est présent dans le biogaz qu'à une proportion de 50 %.

**LIE et LSE pour
différentes
compositions de
biogaz en terme de
mélange CH₄ - CO₂
(INERIS, 2008).**

CH ₄ - CO ₂ (%v/%v)	LIE (%v/vCH ₄)	LSE (%v/vCH ₄)
100 - 0	5	15
60 - 40	5,1	12,4
55 - 45	5,1	11,9
50 - 50	5,3	11,4

Concernant les composés présents à l'état de **traces** dans le biogaz, quelques études ont été réalisées mais elles ne sont pas toutes comparables en termes de composés recherchés et limites de quantification appliquées.

D'après Rasi *et al.* (2007), la concentration totale en **composés organiques volatiles** dans le biogaz produit en centre de stockage de déchets (ci-après nommé CET) varie de 13 à 268 mg/m³. A titre de comparaison les concentrations sont plus faibles dans le biogaz issu d'installations agricoles (5 à 8 mg/m³) et relativement comparables dans le biogaz produit en STEP (45 à 176 mg/m³). Les auteurs indiquent également qu'en STEP et CET, les composés volatils majoritairement mis en évidence dans le biogaz sont des **hydrocarbures aliphatiques et aromatiques**. En CET, plus de composés aromatiques et halogénés qu'en STEP sont observés. Pour l'installation agricole, les composés volatils du biogaz sont principalement des **composés soufrés réduits** et quelques hydrocarbures aliphatiques et aromatiques.

Concernant l'**H₂S**, gaz pouvant être mortel en quelques minutes à fortes concentrations (ex : à 840 mg/m³ pendant 15 minutes), les données disponibles dans le biogaz de CET montrent des variations allant de 21 à 599 mg/m³ selon Rasi *et al.* (2007 et 2009), jusque 900 mg/m³ selon l'ADEME (1995) rapporté par l'INVS *et al.*, (2004), jusque 610 mg/m³ dans un biogaz non épuré et < 0,0002 mg/m³ après épuration selon l'AFSSET (2008) et, jusque 2600 mg/m³ selon l'INERIS (2002).

D'après les données disponibles pour des centres de stockage de déchets en France (AFSSET, 2008 ; INERIS, 2002), de nombreux composés divers ont déjà été quantifiés dans le biogaz. Des données (valeurs maximales reportées) sont fournies à titre indicatif pour certains composés dans le tableau ci-après.

Des **composés organiques de silicium** (COVSi) dont les siloxanes sont aussi présents dans les biogaz produit en CET (concentrations de 0,7 à 4,0 mg/m³) et en STEP (concentrations de 1,5 à 10,6 mg/m³). Dans le biogaz agricole, leurs teneurs restent inférieures à 0,4 mg/m³ (Rasi *et al.*, 2007). Ces composés sont issus de la dégradation des silicones utilisées dans de nombreux produits de consommation courante (ex : cosmétiques). Selon Ohannessian (2008), les silicones ne posent pas de problème de santé publique mais constitue un frein majeur à la valorisation du biogaz. En effet, quand le biogaz est brûlé pour produire de l'électricité, les siloxanes se transforment en dioxyde de silicium (SiO₂), qui peut se déposer sur les différents équipements en contact avec le gaz brûlé, sous forme de dépôt blanchâtre apparenté à de la céramique. La présence de siloxanes dans le biogaz provoque des dégâts considérables sur les équipements de production d'électricité (moteurs, microturbines, piles à combustible...) et ainsi une baisse des performances (Record, 2009).

Ces COVSi ne constituent donc *a priori* pas un danger direct pour les opérateurs des filières mais peuvent constituer un danger indirect lié à la dégradation progressive du matériel des filières (maintenance

nécessaire). Des systèmes d'épuration sont de plus en plus mis en œuvre pour éliminer ces composés du biogaz.

Concentrations en micropolluants organiques et inorganiques déjà mesurées dans du biogaz issu de centres de stockage de déchets en France (d'après AFSSET, 2008 et INERIS, 2009) (valeurs maximales reportées).

Composés halogénés	mg/m³	METAUX	µg/m³
Méthane, dichloro	190	Cd	47
Méthane, trichloro (chloroforme)	70	As	49
Ethylène, 1,2 dichloro	302	Se	1,7
Ethylène, 1,1 dichloro	6	Sb	72
Ethylène, trichloro	150	Cu	44
Ethylène, tetrachloro	260	Cr	91
Ethane, 1,1,1 trichloro	18	Sn	50
méthane, tétrachloro	21	Mn	59
Ethane, dichloro	130	Ni	10
Ethylène, chloro (chlorure de vinyl)	87	Pb	4,4
Ethane, 1,1,2,2 tetrachloro	2,35	Te	0,6
Propane, 1,2 dichloro	0,21	Hg	37
Benzène, chloro	16	Ar	3
Ethane, chloro	46	Bi	0,89
Méthane, chloro	396	Ba	1,7
Benzène, 1,2 dichloro	16	Al	1100
Benzène, 1,3 dichloro	16	Ag	12
Benzène, 1,4 dichloro	92	Mo	7
Ethane, 1,1 dichloro	62	Fe	81
Ethane, 1,2 dichloro	7	Zn	1300
Benzène, 1,2,3 trichloro	0,389	Hydrocarbures aliphatiques	µg/m³
Benzène, 1,2,4 trichloro	0,389	Ethane	300000
Ethane, 1,1,1 trichloro	177	Butane	9900
Hydrocarbures monocycliques	mg/m³	Butane, iso	21000
benzène	39	Propane	26000
Toluène	758	Hexane	27000
Toluène, isopropyl	74	Décane	335000
Benzène, Ethyl	428	Octane	675000
Xylènes (m/p+o)	470	Nonane	270000
m-Xylène	0,01	Undécane	164000
o-Xylène	11	Butane, 2methyl	12000
Styrène	370	Octane, 3 methyl	33
Benzène, 1,3 diéthyl	8,7	Pentane	44000
Benzène, 1,4 diéthyl	16	Pentane, 3 méthyl	30000
Benzène, triméthyl	190	Pentane, 2 methyl	9,2
Benzène, 1,3,5 triméthyl	78	Heptane	29000
Benzène, 1,2,4 triméthyl	78	Dodecane	6400
Benzène, 1ethyl 2methyl	0,056	Hexadecane	100
Benzène, 1 ethyl 4methyl	0,05	Alcools	mg/m³
Benzène, 2 methyl 1 propenyl	0,36	méthanol	360
Benzène, 1ethyl 3 methyl	0,13	éthanol	190
Benzène, propyl	11	autres composés	10 à 17
Benzène, n-butyl	9	Aldéhydes	mg/m³
Benzène, t-butyl	30	Acétaldéhyde	290
HAP	µg/m³	Benzaldéhyde	620
Naphtalène	200	Formaldéhyde	75
Acénaphtylène	731	Cétones	mg/m³
Acénaphène	3,9	Acetone	110
Fluorène	1,6	autres composés	2,6 à 61
Phénanthrène	0,75	Alcènes/terpènes	mg/m³
Anthracène	3,9	Limonene	680
Fluoranthène	0,08	Camphène	260
Pyrène	0,02	Pinène, bêta	1200
Chrysène	0,011	Composés soufrés	mg/m³
Benzo-b-fluoranthène	0,04	Sulfure, dimethyl ou methyl	30
Benzo-k- fluoranthène	0,0006	Disulfure, dimethyl ou methyl	40
Benzo-a-Pyrène	0,03	Methanethiol	87
Benzo-g,h,i pérylène	0,04	autres composés	0,2 à 5,5
Indéno-1,2,3,c,d pyrène	0,03		
Naphtalène, méthyl	0,058		
Naphtalène, diméthyl (non précisé)	0,066		

Valeurs limites d'exposition professionnelles (VLEP) de substances observées dans les biogaz d'ISDND

Les VLEP disponibles pour des composés mesurés dans le biogaz produit en ISDND sont présentées à titre indicatif (cf. tableau ci-après), afin de les comparer aux valeurs mesurées dans le biogaz. Il faut toutefois noter qu'un opérateur ne sera jamais exposé à une atmosphère composée de 100 % de biogaz. Si tel était le cas, l'asphyxie par absence d'oxygène interviendrait avant tout effet toxique des substances.

Dans le cas particulier de cette filière, la production de biogaz ne se déroule pas en système entièrement clos, bien que les réseaux de captage limitent les émissions diffuses, et d'autant plus pour les centres gérés en mode bioréacteur.

Des expositions au biogaz sont donc possibles en cours d'exploitation, notamment pour les opérateurs intervenant sur les alvéoles. Lors d'opérations de construction de réseaux de biogaz et de leur maintenance (ex : purges), des expositions à des petites quantités de biogaz pourrait aussi être possibles. Pour rappel, d'après les professionnels du secteur, ces opérations sont de plus en plus réalisées par des travailleurs dédiés intervenant sur plusieurs sites.

Pour un certain nombre de composés, les valeurs mesurées dans le biogaz sont supérieures aux valeurs limites professionnelles disponibles. C'est le cas pour :

- des composés halogénés : en particulier le dichlorométhane, le trichlorométhane, le chloroéthylène, le tétrachloréthylène et le 1,4 dichlorobenzène : concentrations respectives dans le biogaz de 190 – 70 – 87 – 260 et 94 mg/m³ pour des VME respectives de 178 – 10 – 2,59 – 138 et 4,5 mg/m³ (soit des rapports de concentrations mesurées/VME de respectivement 1,1 – 7 – 34 -1,9 et 21),
- les composés benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes (concentrations respectives dans le biogaz de 39 – 758 – 428 et 470 mg/m³ pour des VME respectives de 3,25 – 76,8 – 88,4 et 221 mg/m³), (soit des rapports de concentrations mesurées/VME de respectivement 12 – 10 – 4,8 et 2,1),
- le chrome quantifié à une valeur de 91 µg/m³ et en considérant la VME du Cr VI, soit 1 µg/m³. Toutefois, il est probable que la concentration reportée par l'AFSSET (2008) et mesurée par l'INERIS (2002) correspond à du Cr total,
- le mercure mesuré à un niveau de 37 µg/m³ en considérant la VME des composés alkylés fixée à 10 µg/m³ (en Hg),
- l'H₂S pour lequel la VME est de 7 mg/m³. Dans le biogaz non épuré des valeurs jusque 2600 mg/m³ ont déjà été mesurées (INERIS, 2002).

Valeurs limites professionnelles disponibles pour des composés mesurés dans le biogaz (INRS, 2012 a) – en mg/m³

Composés organiques	VME ⁵⁴	VLCT ⁵⁵	Composés inorganiques	VME ⁴⁰	VLCT ⁴¹	Autres	VME ⁴⁰	VLCT ⁴¹
benzène	3,25	/	Pb	0,1		H ₂ S	7	14
toluène	76,8	384	Cd	0,05	/	CO₂	9000	/
éthylbenzène	88,4	442	dioxyde de Ti, en Ti	10	/	Ammoniac	7	14
xylènes (somme ou o, m, p)	221	442	trioxyde d'As, en As	0,2	/	Poussières totales	10	/
benzène triméthyl (1,3,5 - 1,2,3 - 1,2,4)	100	250	Ni (métal)	1	/	Poussières alvéolaires	5	/
dichlorobenzène (1,2)	122	306	hexafluorure de Se	0,2	/			
dichlorobenzène (1,4)	4,5	306	Cu (fumées)	0,2	/			
dichlorométhane	178	356	Cu (poussières)	1	2			
trichlorométhane	10	250	Co (fumées)	0,1	/			
dichloroéthylène (1,1)	20	/	Cr (Chrome VI)	0,001	0,005			
trichloréthylène	405	1080	Cr inorganique (II et III)	2				
tétrachloréthylène	138	275	Mn (fumées)	1	/			
Ethylène, chloro	2,59	/	Hg (composés alkylés), en Hg	0,01	/			
Benzène, chloro	27	70						
butane	1900	/	bismuth (tellure de,	5	/			
nonane	1050	/	dopé au Se), en Bi					
octane	1450	/						
heptane	1168	2085						
pentane	3000	/						
naphtalène	50	/						
benzo(a)pyrène		0,150 *						
cyclohexane	700	1300						
cyclopentane	1720	/						
cyclohexane, méthyl	1600	/						

En noir gras, valeurs réglementaires contraignantes

En bleu gras, valeurs réglementaires indicatives

En noir, valeurs indicatives ;

** valeur recommandée par la CNAM (pas de VLEP fixée).*

Cases en rosé : substances CMR avérées, assimilées ou possibles

⁵⁴ VME : Valeur moyenne d'exposition correspondant à des valeurs limites sur 8 H d'exposition

⁵⁵ VLCT : valeur limite court terme destinée à protéger des pics d'exposition.

Pour rappel **les teneurs mesurées dans le biogaz ne constituent pas les concentrations d'exposition des opérateurs**. Une dilution du biogaz s'opère, en particulier à l'extérieur. Par ailleurs, les cabines d'engins intervenant sur les alvéoles sont équipées de médias filtrants.

D'après les quelques données disponibles, les concentrations d'exposition ne dépasseraient pas les valeurs limites professionnelles (d'après communication personnelle). Les résultats rapportés par RECORD (2001) peuvent aussi être rappelés. Les valeurs maximales ont été mesurées chez les conducteurs d'engins (au niveau des alvéoles *a priori*) et sont les suivantes :

- 0,063 mg/m³ pour le benzène (VME = 3,25 mg/m³),
- 0,234 mg/m³ pour le trichloréthylène (VME = 405 mg/m³),
- 0,61 µg/m³ pour le benzo(a)pyrène (valeur recommandée par la CNAM = 150 µg/m³).

Il faut cependant souligner le faible nombre de données disponibles mais également la difficulté d'évaluer les risques, d'autant plus que la composition du biogaz est variable d'un site à l'autre (fonction nature des déchets, âge du massif, ..). L'évaluation précise du risque nécessiterait des mesures sur chaque site. Aussi, le principe de précaution quant au risque chronique lié à l'exposition au biogaz doit s'appliquer : l'exposition doit être réduite au maximum.

A noter que les mesures d'exposition en ambiance de travail et individuelles se développent de plus en plus et devraient permettre de mieux évaluer les risques pour les opérateurs. Par ailleurs après épuration, les teneurs en ces composés sont réduites dans le biogaz (d'après AFSSET, 2008).

Concentrations rapportées par l'AFSSET (2008) dans du biogaz de décharge brut et épuré (en mg/m³ sauf pour le mercure en µg/m³).

	brut	épuré		brut	épuré
H ₂ S	610	<0,0002	Benzène, 1,2 dichloro	14	0,065
éthanol	190	0,2	Benzène, 1,3 dichloro	12	0,042
acétone	110	19	Benzène, 1,4 dichloro	92	0,15
limonene	680	3,4	Ethane, 1,1 dichloro	62	0,013
Ethylène, 1,1 dichloro	6	0,63	Benzène, 1,2,4 trichloro	0,15	0,026
Ethylène, trichloro	150	0,028	Ethane, 1,1,1 trichloro	0,14	0,056
Ethylène, tetrachloro	260	0,011	Hg	37	18
Benzène, chloro	16	0,092			

Données sur la composition microbiologique des biogaz

En fonction des intrants, la composition microbiologique du biogaz varie. Toutefois, la composition de la flore des biogaz n'est, en proportion, pas la même que celle du digesteur dont il est issu (AFSSET, 2008).

En effet, même si le biogaz apparaît être un vecteur capable de transporter n'importe laquelle des espèces microbiennes présentes dans la source (les densités de micro-organismes sont généralement de l'ordre de 10⁶ à 10⁷ cellules procaryotes/m³ et 10⁴ cellules d'eucaryotes/m³), l'aérosolisation est variable en fonction des espèces (Moletta, 2006, Moletta *et al.*, 2008 et 2010) :

- certaines sont préférentiellement aérosolisées (ex : *Staphylococcus spp.*, *Propionibacterium acnes*, phylums des *alphaproteobacteria*, *betaproteobacteria*, *gammaproteobacteria*) (aérosolisation active),
- certaines sont préférentiellement non-aérosolisées (phylums des *Deltaproteobacteria*, *Spirochaetes*, *Thermotogae*, *Chloroflexi* et groupes sulfato-réducteurs) (non-aérosolisation active),

Les auteurs évoquent aussi un comportement d'aérosolisation passive qui peut conduire n'importe lequel des groupes de micro-organismes présents dans la source à se retrouver dans l'aérosol (ex : phylums des *Actinobacteria*, *Firmicutes* et *Bacteroidetes*).

Vinneras et Nordin (2007) ont étudié la flore de biogaz issus de stations d'épurations. Ils ont conclu que le risque microbiologique lié à l'utilisation du biogaz valorisé était probablement insignifiant. Les risques liés au contact avec le gaz brut et les eaux condensées sont probablement plus élevés. Cependant les systèmes étant généralement fermés, les auteurs rapportent que, selon les professionnels, les travailleurs sont rarement exposés. *A noter que dans cette étude, une des sources de microorganismes dans le biogaz était l'eau usée utilisée pour désulfurer le biogaz.*

L'étude RECORD (2001) mentionne des concentrations en bactéries totales de 1,5 à 1,7.10⁵ et en champignons de 0,2 à 4.10⁴ mesurées dans le gaz interstitiel de deux décharges d'ordures ménagères.

Le très faible nombre de données, l'absence de valeurs règlementaires pour les microorganismes ainsi que les difficultés supplémentaires pour évaluer les risques microbiologiques (pas de valeur de référence,

notions de virulence, infectiosité, sensibilité) ne permettent pas aujourd'hui de proposer une démarche similaire à celle proposée pour les substances chimiques.

Seules les valeurs limite d'exposition professionnelle proposées en Allemagne et aux Pays-Bas pour les endotoxines peuvent être rappelées : respectivement 50 et 200 EU/m³ (INRS, 2010).

Diagramme de fonctionnement des ISDND / identification de points critiques pour la santé/sécurité des opérateurs

Un diagramme de fonctionnement d'une ISDND produisant / valorisant du biogaz est présenté ci-après. Il illustre les principales étapes de cette filière.

Sur ce diagramme, les points critiques pour les opérateurs vis-à-vis de différents dangers identifiés sont représentés aux moyens de logos illustratifs, d'un code couleur représentatif d'un niveau de criticité.

En effet, une hiérarchisation des points critiques pour les opérateurs des filières biogaz a été proposée. Elle est fondée sur la base d'une méthodologie dans laquelle des niveaux de criticité sont définis en croisant :

- des niveaux d'enjeux (en terme de conséquences) et,
- des niveaux de retour d'expérience (l'évènement a-t-il déjà été décrit, est-il probable ou non, ... ?).

Pour chacun de ces niveaux, des scores ont été attribués : plus le score est élevé, plus le niveau est élevé c'est-à-dire par exemple, plus l'évènement peut avoir des conséquences importantes.

Dans le cadre de cette étude, nous avons arbitrairement considéré 3 niveaux d'enjeux et 3 niveaux de retour d'expérience : niveau faible – score 1 / niveau modéré – score 2 / niveau fort – score 3. La matrice suivante a ainsi été élaborée :

niveaux de retour d'expérience	Elevé- 3	Moyen -2	Faible - 1
niveaux d'enjeux			
Important - 3	3 x 3 = 9	3 x 2 = 6	3 x 1 = 3
Modéré - 2	2 x 3 = 6	2 x 2 = 4	2 x 1 = 2
Faible - 1	1 x 3 = 3	1 x 2 = 2	1 x 1 = 1

Dans le cas de situations particulières, des scores en général de 0,5, voire 1 peuvent ensuite avoir été ajoutés ou retranchés aux résultats de criticité « Enjeux x Retour d'expérience ».

Trois niveaux de points critiques sont ainsi identifiés :

- les points critiques majeurs avec des notes supérieures ou égales à 6 (couleur rouge),
- des points critiques modérés avec des notes variant de 3 à inférieures à 6 (couleur jaune),
- des points critiques mineurs avec des notes inférieures à 3 (couleur verte).

Les différents éléments rapportés dans cette synthèse ont permis de proposer des niveaux d'enjeux et des niveaux de retour d'expérience, selon des critères propres à chacun des dangers et, explicités dans le tableau argumentaire associé au diagramme. Ce tableau argumentaire est indissociable du diagramme.

A noter que les données étant différentes pour les dangers étudiés, cela introduit un certain biais, notamment si l'on souhaite les comparer entre eux. Par ailleurs dans certains cas (dangers, filières étudiées), les données sont rares voire inexistantes, ce qui peut aussi introduire un biais par rapport aux cas où des données sont disponibles.

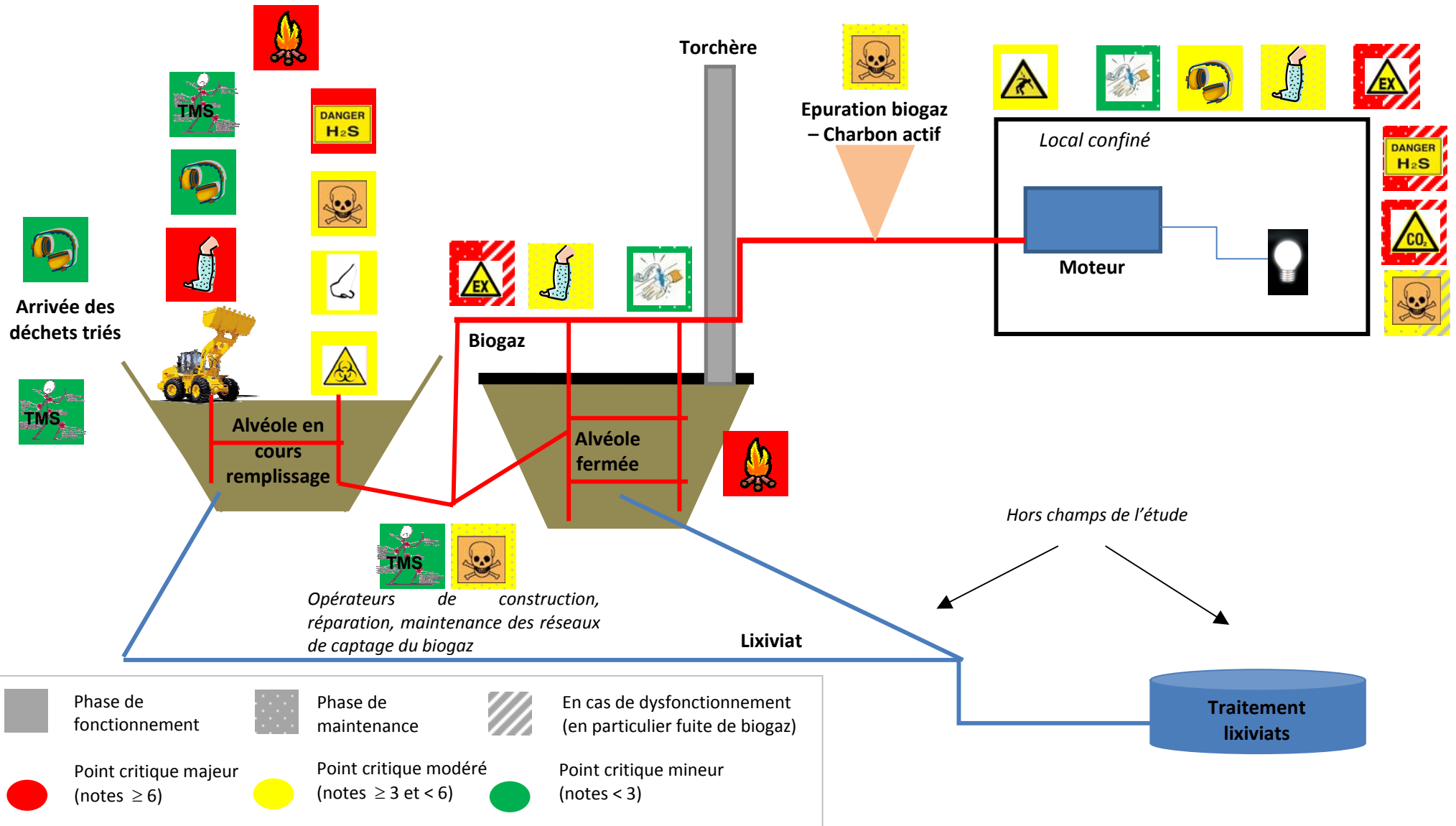
Pour plus de détails sur la méthodologie, se reporter en section 9 du rapport.






Remarque importante : le contenu de cette synthèse, de ce diagramme et du tableau argumentaire ne peut être utilisé en l'état par une entreprise ou un site comme le résultat d'une analyse des risques professionnels. Il s'agit uniquement d'une sensibilisation des acteurs, et lecteurs sur des points critiques des filières de production, valorisation de biogaz, en termes de santé et sécurité des opérateurs. Ces points critiques constituent des alertes sur des points au niveau desquels il convient de mettre en œuvre les mesures de maîtrise des risques existantes et ou d'approfondir les données en réalisant des évaluations de risques plus détaillées.







Filière production / valorisation de biogaz en ISDND




Diagramme indissociable du tableau argumentaire ci-après.

! Ne peut être utilisé comme le résultat d'une évaluation des risques professionnels.









Points critiques identifiés	Lieux / étapes	Phases	Niveaux d'enjeux (E)	Niveaux de retour d'expérience (R)	Résultats E X R	Situations particulières	Principales mesures de maîtrises /autres commentaires
Risque électrique 	Local de valorisation / armoire électrique – raccordement au réseau EDF	Mise en service Maintenance Dys-fonctionnement	3 - D'après l'INRS (2012 b), des accidents graves, notamment mortels peuvent survenir.	1 - D'après l'INRS (2012 b), ces accidents sont de plus en plus rares (toutes professions confondues, 10 morts / an par électrocution). <i>A noter qu'en 2007, une électrisation s'est produite dans une ISDND, due à un arc électrique provenant de l'alternateur de l'installation de traitement des biogaz (ARIA).</i>	3 x 1 = 3 		Habilitations Normes
Risque d'explosion d'une ATEX 	Local confiné où arrivée de biogaz (local de cogénération) Digesteur / post-digesteur / gazomètre / torchère (soupapes) Brides / raccords /pots de purges canalisations	Dys-fonctionnement (fuite) / Maintenance (purges)	3 - L'explosion d'une ATEX engendre de nombreux dégâts et potentiellement des morts.	3 – De nombreux feux se sont déjà déclarés dans des ISDND. Certains sont probablement liés à la production de biogaz qui s'enflamme. Une explosion a été enregistrée dans un local confiné. La mise aux normes et l'amélioration de la gestion de ces centres devraient cependant faire diminuer ces événements.	3 x 3 = 9 	+ 0,5 dans local confiné - 0,5 au niveau des canalisations (volume ATEX moins important)	Identifications des zones ATEX Formation, mesures de sécurité (soupapes détecteurs de CH ₄ , ventilation) Appareils dédiés zones ATEX
Risque d'incendie (lié au biogaz, combustion des déchets) 	Alvéoles	Fonctionnement, négligence, malveillance, mauvaise maîtrise de la méthanisation	2 - Les feux liés à l'inflammation du biogaz ou autres (en zone non ATEX) peuvent également provoquer de graves brûlures. Cependant on peut considérer que la gravité est cependant moindre qu'une explosion (et que les conséquences peuvent être plus maîtrisables). Ces événements semblent les plus fréquents au niveau des alvéoles d'ISDND, un logo représentant l'incendie est donc aussi utilisé ici.		2 x 3 = 6 		Surveillance continue (température, fumées)

Points critiques identifiés	Lieux / étapes	Phases	Niveaux d'enjeux (E)	Niveaux de retour d'expérience (R)	Résultats E X R	Situations particulières	Principales mesures de maîtrises /autres commentaires
Intoxications aiguës à H ₂ S 	Alvéoles ouvertes Opérateurs de construction maintenance des réseaux de captages de biogaz Local confiné	Fonctionnement Maintenance Dys-fonctionnement (fuite, non efficacité de la désulfuration) / Maintenance (purges)	3 – L'exposition à l'H ₂ S peut être très rapidement mortelle.	3 – Même si aucun cas d'intoxication à l'H ₂ S n'a semble-il été recensé dans des ISDND, au même titre que dans les autres filières de méthanisation, de l'H ₂ S peut être produit. Les concentrations déjà mesurés dans des biogaz bruts peuvent être plus élevées que la VLEP (2600 mg/m ³ – VME = 7 mg/m ³). Des traitements de désulfuration (et élimination des siloxanes) sont <i>a priori</i> fréquemment mis en œuvre. Les concentrations en H ₂ S du biogaz épuré seraient <0,2 µg/m ³ (AFSSET, 2008)	3 X 3 = 9 	+ 0,5 en cas de maintenance + 0,5 purge en milieu confiné - 1 si désulfuration + 0,5 quand mélange de substrats risquant d'être incompatibles	Règles de sécurités : détecteur gaz, H ₂ S, ventilation, formation Penser à vérifier l'efficacité du traitement de désulfuration
Risque blessures / chutes 	Endroits où des chutes, en particulier de hauteur, sont possibles. Manipulation d'objets, outils. Remplissage alvéoles (engins)	Fonctionnement Maintenance	1 – Même si ces accidents du travail peuvent avoir une gravité très variable, les plus fréquents sont des accidents peu graves entraînant des douleurs, lumbagos, contusions, plaies et entorses (CNAMTS, 2010) 3 - Un cas particulier est identifié au niveau des quais de vidage des déchets : des accidents de gravité plus importante semblent pouvoir survenir (retour professionnels, cas décrits dans base EPICEA)	3 – Ce type d'accidents de travail est le plus fréquent. Ces AT sont notamment liés à la manipulation d'objets (221 cas), des accidents de plain-pied (190 cas) et des chutes avec dénivellation (93 cas) (sur 681 AT recensés en 2010 chez les salariés des « entreprises de traitement des ordures ménagères et des déchets industriels et commerciaux banal »). (CNAMTS, 2010). <i>Une communication personnelle d'un acteur de la filière ISDND confirme que les accidents les plus fréquents sont des chutes de plain-pied et des blessures lors de la manutention, maintenance de pièces, utilisation d'outils portatifs.</i>	1 x 3 = 3 Ou 3 x 3 = 9 	+ 0,5 en cas maintenance	Règles de sécurité (ex : barrières, utilisations de cordes), de conception des locaux,
Brûlures 	Canalisations non enterrées du biogaz/ lixiviat Local de valorisation	Fonctionnement Maintenance (ex : sur chaudière)	1 – La gravité de ces brûlures (hors incendies) est considérée comme faible (proportion du corps touchée faible (ex : mains)	1 – Aucune information relative aux éventuelles brûlures n'est disponible. Toutefois leur nombre est probablement faible.	1 x 1 = 1 	+ 0,5 en cas maintenance	Règles de bon sens et de sécurité repérage canalisations selon normes, calorifugeage.

Points critiques identifiés	Lieux / étapes	Phases	Niveaux d'enjeux (E)	Niveaux de retour d'expérience (R)	Résultats E X R	Situations particulières	Principales mesures de maîtrises /autres commentaires
Intoxications chroniques à des substances chimiques autres qu'H ₂ S par inhalation de biogaz et ingestion de poussières 	Remplissage alvéoles Opérateurs de construction maintenance des réseaux de captages de biogaz Local confiné	Fonctionnement Maintenance Dys-fonctionnement (fuite) Maintenance (purges)	3 – Les pathologies liées à des expositions chroniques à des substances en question (notamment CMR) peuvent être graves (cancers) et entraîner la mort.	1,5 - des concentrations problématiques n'ont jamais été mises, jusqu'à ce jour, en évidence mais, elles sont plus probables que dans les autres filières d'où l'utilisation d'une note comprise entre 1 et 2. Certaines concentrations déjà mesurées dans les biogaz bruts sont proches, voire supérieures aux VLEP (ex : dichlorométhane, trichlorométhane). Cependant un opérateur ne sera jamais exposé à une atmosphère composée de 100 % de biogaz. Il est très difficile d'évaluer les émissions diffuses du biogaz en ISDND. Avec l'amélioration de la gestion des centres et des réseaux de biogaz, elles ont probablement diminué aux cours des années et devraient être encore plus limitées pour les centres gérés en mode bioréacteur. Les opérateurs remplissant les alvéoles semblent cependant aujourd'hui potentiellement exposés à du biogaz brut en mélange dans l'air. D'après l'étude RECORD (2001) les résultats de mesures à des postes de travail en ISDND montrent des teneurs < VLEP pour les particules, métaux, COV, HAP, aldéhydes. D'après une communication personnelle d'un acteur de la filière, les quelques résultats de mesures d'exposition individuelle réalisées seraient jusqu'à présents inférieurs aux VLEP. Cependant il semble, nécessaire d'approfondir la connaissance de l'exposition de tels opérateurs et d'appliquer le principe de précaution en limitant les expositions.	3 x 1,5 = 4,5 	- 1 lors des opérations de maintenance ou en cas de fuite (exposition moins longue que pour les opérateurs remplissant les alvéoles – étape, le cas échéant, après épuration du biogaz – pas d'ingestion de poussières) + 0,5 si biogaz non épuré	Peu de résultats disponibles. il serait pertinent de réévaluer les conclusions à mesurer de l'obtention de nouveaux résultats Médias filtrants dans les cabines d'engins
	Gestion du charbon actif utilisé pour l'épuration du biogaz	Maintenance	3 – idem ci-dessus	1 - Aucune information n'est disponible. Si les règles sont respectées, l'exposition par relargage du charbon actif devrait être faible. De plus il s'agit d'une opération ponctuelle.	3 x 1 = 3 		

Points critiques identifiés	Lieux étapes /	Phases	Niveaux d'enjeux (E)	Niveaux de retour d'expérience (R)	Résultats E X R	Situations particulières	Principales mesures de maîtrises /autres commentaires
Risque microbiologique (infection, allergie, inflammation) 	Remplissage alvéoles	Fonctionnement	2 - Des pathologies de gravités différentes peuvent survenir, cependant les majeures sont sans doute des pathologies courtes et traitables (ex : diarrhées). Des allergies, inflammations des voies respiratoires peuvent aussi survenir (notamment liées à l'exposition à des bioaérosols).	1,5 – de la même manière que précédemment, des concentrations problématiques n'ont jamais été mises, jusqu'à ce jour, en évidence mais, elles sont plus probables que dans les autres filières d'où l'utilisation d'une note comprise entre 1 et 2. Aucune étude épidémiologique n'a semblé-t-il été menée pour étudier spécifiquement un éventuel lien entre exposition à des microorganismes / bioaérosols et des troubles de salariés de la filière ISDND. De façon générale cependant, l'OMS considère que la filière de traitement des déchets municipaux est susceptible d'exposer les salariés à un risque de pathologies infectieuses, pulmonaires allergiques, bronchites chroniques et hépatites plus élevés que la population générale. Ces risques sont associés à des niveaux de bioaérosols dans l'air de 2 à 4 fois supérieurs dans une ambiance de décharge d'OM par rapport à une ambiance générale. D'après un professionnel du secteur, les risques microbiologiques liés à des vecteurs tels que les rats (ex : leptospirose) mais aussi liés aux installations de traitement (tour aéroréfrigérantes pouvant induire un risque Légionnelles) sont à considérer dans cette filière.	2 x 1,5 = 3 		Vêtements, dispositifs de protection ; bonnes pratiques d'hygiène.
Risque microbiologique (infection, allergie, inflammation)	Exposition au Biogaz Exposition aux condensats des canalisations	Dys fonctionnement / Maintenance	2 – idem précédent. Cependant la flore du digestat n'est pas représentative de celle du biogaz – peu d'éléments sur celles-ci	0 – Les concentrations dans les biogaz semblent relativement faibles et de l'ordre de la contamination de l'air ambiant. Très peu d'études ont néanmoins été conduites. En l'état actuel des connaissances, les opérateurs ne devraient pas être exposés à des doses importantes pouvant engendrer des pathologies.	2 x 0 = 0	+ 0,5 si utilisation d'eau contaminée pour la désulfuration par lavage (Vinerras, 2007) + 0,5 si présence possible de bactérie <i>Legionella</i> pathogène par inhalation	Très peu de résultats disponibles. A réévaluer à mesures de l'obtention de nouveaux résultats

Points critiques identifiés	Lieux / étapes	Phases	Niveaux d'enjeux (E)	Niveaux de retour d'expérience (R)	Résultats E X R	Situations particulières	Principales mesures de maîtrises /autres commentaires
TMS  Risques liés aux postures, vibrations, port de charges notamment	Utilisation d'engins pour le remplissage des alvéoles Opérateurs de construction et maintenance des réseaux de captages de biogaz	Fonctionnement Maintenance	1 – Ces troubles même s'ils peuvent être très perturbants au quotidien sont cependant considérés comme de faible gravité.	2 – Les TMS sont les maladies professionnelles les plus fréquentes des salariés du secteur « Entreprises de traitement des ordures ménagères et des déchets industriels et commerciaux banal (900 BC) » (47 sur 47 déclarées en 2010). Les MP sont toutefois moins nombreuses que les AT (47 MP contre 681 AT en 2010) (CNAMTS, 2010).	1 x 2 = 2 		Amélioration du confort des appareils, Règles à respecter
Bruits 	Utilisation de véhicules pour remplissage alvéoles Local de valorisation du biogaz (chaudière / moteur)	Fonctionnement	1 – Même si les impacts sur la santé liés au bruit sont souvent sous-estimés, on peut cependant considérer qu'ils sont généralement de faible gravité.	2 – Aucune donnée disponible mais les moteurs (camions) engendrent automatiquement du bruit, celui-ci n'étant cependant, pas forcément nuisible, d'autant plus si les règles constructeurs sont respectées. 3 – Dans les locaux de valorisation, les niveaux déjà enregistrés sont élevés (95 à 110 dB(A))	1 x 2 = 2 ou 1 x 3 = 3 	+ 0,5 pour les opérateurs de remplissage des alvéoles (exposé toute la journée).	Règles : isolation phonique du local de cogénération, des cabines engins, port de casques
Odeurs 	Remplissage alvéoles	Fonctionnement	1 – Les odeurs même si elles peuvent être incommodantes sont considérées comme des nuisances de faible gravité. <i>A noter, qu'en particulier, pour des riverains, les nuisances olfactives peuvent avoir des conséquences psychologiques non négligeables</i>	3 - Peu de données sont disponibles mais les déchets émettent par nature des composés malodorants (dégradation de la matière organique).	1 x 3 = 3 		

Bibliographie citée dans cette synthèse

- ADEME. 2005. Impacts environnementaux de la gestion biologique des déchets. Bilan des connaissances. 331 p.
- ADEME. 2007. Biogaz issu de la mise en décharge : comment optimiser son captage ? 158 p.
- ADEME. 2009. Campagne nationale de caractérisation des ordures ménagères (MODECOM) - Résultats 2007. 6p.
- ADEME, 2011. Qualité agronomique et sanitaire des digestats. Etude réalisée par RITMO. 250 p.
- ADEME, FNADE. 2007. État des connaissances techniques et recommandations de mise en œuvre pour une gestion des installations de stockage de déchets non dangereux en mode bioréacteur. 48 p.
- AFSSET. 2008. Risques sanitaires du biogaz : Evaluation des risques sanitaires liés à l'injection de biogaz dans le réseau de gaz naturel, Rapport d'expertise collective « Groupe de travail Biogaz », Saisine Afsset n° « 2006/010 », 174 p.
- ATEE, Club Biogaz. 2011. État des lieux de la filière méthanisation en France, 61 p.
- DEBRIEU C. 2004. Lutte contre les odeurs de l'assainissement. Document technique FNDAE
- GOYER N., LAVOIE J., LAZURE L., MARCHAND G. 2001. Les bioaérosols en milieu de travail : guide d'évaluation, de contrôle et de prévention. Etudes et Recherches. Guide technique. IRSST. 72 p.
- GOURC JP. STAUB M. 2009. L'actualisation nécessaire de la conception des couvertures de stockage de déchets. Rencontres Géosynthétiques. 10 p.
- INERIS. 2002. Caractérisation des biogaz: Bibliographie, Mesures sur site, 31 p.
- INERIS. 2006. Etude comparative des dangers et des risques liés au biogaz et au gaz naturel, rapport N° 46032, 34 p.
- INERIS. 2008. Etude des risques liés à l'utilisation des méthaniseurs agricoles, Rapport d'étude n° DRA-07-88414-10586B réalisé pour le Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables. 91 p.
- INERIS. 2012. Retour d'expérience relatif aux procédés de méthanisation et à leurs exploitations. EAT DRA DRC- 93 - Opération A. 148 p.
- INRS, 2011. Endotoxines en milieu de travail. II. Exposition, risques, prévention. Dossier médico-technique. 19 p.
- INRS. 2012. a) Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France. ED 984. Aide-mémoire Technique. 32 p
- MARCHAIS C. 2011. Biogaz et méthanisation en France.
http://www.fnccr.asso.fr/documents/2.%20ClubBiogaz%20ATEE_Caroline%20MARCHAIS.pdf
- MOLETTA M. 2006. Caractérisation de la diversité microbienne aéroportée des biogaz. Déchets-revue francophone d'écologie industrielle – cahier spécial du n° 44. pp 18-20.
- MOLETTA-DENAT M., BRU-ADAN V., DELGENES JP., HAMLIN J., WERY N., GODON JJ. 2010. Selective microbial aerosolization in biogas demonstrated by quantitative PCR. Bioresource Technology. Vol 101. pp 7252-7257.
- MOLETTA M. WERY N., DELGENES JP., GODON JJ. 2008. Water Science & Technology. Vol 57, n°4. pp 595-599.

OHANNESSIAN A. 2008. Composés Organiques Volatils du Silicium : Un frein à la valorisation énergétique des biogaz – « *Génèse et mécanismes de formations* ». Thèse INSA de Lyon. 305 p.

ORS (Observatoire Régional de la Santé – Rhône-Alpes). 2010. L'évaluation des effets sanitaires liés à la gestion des déchets ménagers et assimilés (DMA). Rapport scientifique. 184 p.

RASI. 2009. Biogas composition and upgrading to biomethane. Academic dissertation. Université de Jyväskylä. 79 p.

RASI S. VEIJANEN A., RINTALA J. 2007. Trace compounds of biogas from different biogas production plants. Energy , n° 32. pp 1375–1380

RECORD. 2001. Etude des polluants atmosphériques émis dans deux centres de stockage des ordures ménagères ; caractérisation et mesure des niveaux d'exposition ; mise au point d'outils de suivi en vue de l'évaluation des risques sanitaires. Synthèse. Etude n° 99-0654/3A. 21 p.

RECORD. 2009. Freins et développements de la filière biogaz : les besoins en recherche et développement, étude n°07-0418/1A. 134 p

RECORD 2012. Substances émergentes, polluants émergents dans les déchets : analyses et prospective, étude n°10-0143/1A. 183 p.

SOLAGRO. 2001. La digestion anaérobie des boues urbaines. Etat des lieux, état de l'art. 36 p.

VINNERAS B. NORDIN A. 2007. Microbiological community in biogas systems and evaluation of microbial risks from gas usage. Energie - wasser-praxis 12/2007 – DVGW Jahresrevue. pp 50-53.

Sites internet, bases de données :

Base de données EPICEA de l'INRS. <http://www.inrs.fr/accueil/produits/bdd/epicea.html> ; consulté le 02/10/2012.

Base de données ARIA du BARPI <http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/> ; consulté le 02/10/2012.

INRS, 2012, b) article « Electricité » <http://www.inrs.fr/accueil/risques/phenomene-physique/electricite.html> ; consulté le 08/10/2012.

CNAMTS, 2010. Statistiques par numéro de risque ou par code APE-NAF. <http://www.risquesprofessionnels.ameli.fr/chiffres-cles-et-statistiques/nos-statistiques.html> ; consulté le 18/12/2012.

11. Discussion, conclusion

Au travers la mise en œuvre de certaines étapes d'une démarche HACCP (analyses des dangers - points critiques pour leur maîtrise), une identification de points critiques vis-à-vis de la santé et sécurité des opérateurs intervenant dans les filières de production et valorisation de biogaz a été menée dans le cadre de cette étude.

Les **points critiques** identifiés ici ont pour objectif de sensibiliser les acteurs à des dangers potentiels au niveau de certaines étapes des filières, au cours des phases de fonctionnement, de maintenance ou en cas de dysfonctionnement des installations, afin qu'ils portent une attention particulière :

- à la maîtrise des risques par la mise en œuvre des mesures de gestion existantes (en premier lieu, les réglementations concernant par exemple le zonage ATEX, l'emploi d'appareils dédiés à ces zones, la réglementation sanitaire relative aux sous-produits animaux, ...mais aussi un certain nombre de règles d'hygiène, de sécurité, de bonnes pratiques doivent être suivies),
- à l'évaluation plus approfondie de ces risques potentiels pour les opérateurs, par des mesures adaptées d'ambiances de travail ou d'exposition individuelle.

Même si la démarche utilisée ici s'apparente dans certains cas à une démarche d'évaluation des risques, il ne s'agit en aucun cas d'une analyse des risques professionnels, celle-ci devant être établie par les employeurs et adaptée à chaque site, poste de travail. Les diagrammes constitués présentant les points critiques identifiés selon une hiérarchie, ne peuvent être utilisés tel quel, par une entreprise ou un site, comme le résultat de l'évaluation des risques professionnels.

Il ne s'agit pas non plus d'une étude des dangers au sens de la réglementation ICPE celle-ci étant aussi propre à un site.

Concernant la **démarche HACCP**, initialement développée pour assurer la sécurité alimentaire mais applicable à tous process, elle a l'intérêt de structurer la recherche et l'exploitation de données selon diverses étapes et principes.

Dans le cadre de cette étude, c'est le premier principe (comprenant 6 étapes) qui a pour objectif d'identifier et hiérarchiser les dangers qui a été mené.

Les étapes suivantes consistant à identifier des points critiques en tant que points pouvant être contrôlés et pour lesquels sont notamment définis des plages et/ou seuils en vue de maîtriser les risques, n'ont en revanche pas été transposées. Elles sont effectivement applicables lorsque l'on s'intéresse à une installation particulière et dans le détail mais non pas, comme cela a été le cas dans cette étude, à des filières de façon globale.

Les **filières** suivantes ont été étudiées :

- Méthanisation agricole : installations à la ferme et installations centralisées,
- Méthanisation des boues de stations d'épuration (STEP) urbaines,
- Méthanisation des ordures ménagères (OM),
- Méthanisation industrielle (ex : industries agroalimentaires, papeteries, industries chimiques),
- Production de biogaz en installation de stockage des déchets non dangereux (ISDND).

Pour répondre à l'objectif de l'étude, divers types de données ont été recherchés dans la bibliographie et au travers de contacts de différents experts (constructeurs d'unités de méthanisation, bureaux d'études, organismes publics français et allemands notamment, acteurs de la surveillance de la santé au travail, professionnels des secteurs étudiés, médecins du travail).

A noter qu'en premier lieu, des données spécifiques relatives à la santé et sécurité des opérateurs ont été recherchées (interrogation de moteurs de recherche avec des mots-clés tels que worker, health, biogas, ... ;) mais, il s'est avéré que **malgré le nombre important de travaux portant sur le biogaz ou la méthanisation, les données spécifiques à la santé et à la sécurité des opérateurs des filières de production, valorisation sont rares, aussi bien en France qu'à l'étranger, y compris**

dans les pays où l'expérience est plus importante. Les principaux phénomènes identifiés pour lesquels les acteurs semblent toutefois être particulièrement sensibilisés sont les dangers liés aux zones ATEX (pouvant engendrer des explosions ou feux torches). Seule la base de données BARPI et les travaux de l'INERIS (2008, 2006, 2012) évoquent spécifiquement les filières de méthanisation, production de biogaz.

Des données ont cependant été collectées et ont concerné en particulier :

- la description des installations en France (i)
- l'identification des postes de travail et de la durée des opérations liées à la méthanisation, valorisation du biogaz (ii)
- les retours d'expérience relatifs aux filières de production, valorisation de biogaz (iii)
- la composition chimique et microbiologique des matières et produits des filières (iv)
- des résultats de mesures en ambiances de travail ou d'exposition individuelle (v)
- les résultats d'études épidémiologiques ayant mis en évidence des liens entre exposition et effets sanitaires (vi)

i) Description des installations en France

Par filière étudiée, les informations suivantes, à l'échelle de la France, ont été recherchées et utilisées : nombre d'installations, principales étapes mises en œuvre dans les unités, types de digesteurs employés, température de digestion, pré et post-traitements appliqués, voies de valorisation du biogaz et du digestat.

Le but était d'identifier une « installation – type » par filière étudiée, en fonction des technologies les plus répandues à ce jour en France (principalement sur la base d'un état des lieux effectué en 2011 par le Club biogaz, il est donc probable qu'en particulier le nombre d'installations opérationnelles soit déjà obsolète).

ii) Identification des postes de travail ; durée des opérations liées à la méthanisation, valorisation du biogaz.

La recherche de ce type de données relatives aux postes de travail dans les installations devait nous aider à évaluer les voies d'exposition et, l'importance ou le niveau de cette exposition des opérateurs des filières.

Ces données sont très éparses. Quelques informations ont pu être recueillies auprès de professionnels des secteurs étudiés qui ont évoqué des fréquences d'opérations de maintenance notamment.

Il apparaît globalement que, pour notamment les filières agricoles à la ferme ou boues de STEP, les opérations liées à la méthanisation, valorisation du biogaz proprement dites ne nécessitent pas beaucoup de temps (quelques minutes par jour, voire plusieurs fois par jour). Des opérations de maintenance sur les équipements de valorisation (moteurs, chaudières) seraient en général effectuées par les constructeurs.

Un cas particulier dans le secteur des ISDND a été identifié : il s'agit des opérateurs de la construction, suivi, maintenance des réseaux de captage du biogaz. D'après les professionnels, ces opérations sont aujourd'hui de plus en plus réalisées par des filiales dédiées. Ces opérateurs sont donc potentiellement exposés tout au long de la journée aux risques liés au biogaz notamment.

A noter que l'ADEME avait réalisé une première étude dans une installation agricole visant notamment à définir les temps dédiés à la méthanisation. Suite à un appel d'offre lancé en 2011, d'autres données pour d'autres secteurs pourraient être disponibles prochainement.

Quoiqu'il en soit ces informations ne seraient qu'indicatives et ne pourraient être considérées comme représentatives des temps d'exposition potentiels pour toute installation.

A noter que, suite à quelques retours de professionnels, l'exposition aux composés issus de la combustion du biogaz en torchère et dans les équipements de valorisation, n'a pas été incluse dans l'étude, les rejets s'effectuant en général d'après eux à des hauteurs relativement importantes, n'engendrant ainsi *a priori* pas d'exposition des opérateurs sur site. Cependant, en fin d'étude, un professionnel a évoqué le cas des opérateurs de maintenance des moteurs/chaudières qui pourraient

être exposés à des polluants lors du nettoyage des pièces machines qui sont en contact permanent avec des polluants.

Cette situation n'a pas été analysée spécifiquement dans le cadre de cette étude. Elle peut toutefois se retrouver sous le danger chimique lors de la maintenance des équipements de valorisation (niveau critique en général évalué comme modéré -couleur jaune, sauf pour le secteur agricole).

iii) Retours d'expérience dans les filières de méthanisation

Les retours d'expérience recherchés ont concerné :

- d'une part, les **incidents / accidents** recensés dans les installations,
- d'autre part, les **accidents du travail (AT) et maladies professionnelles (MP)** éventuellement décrits chez des opérateurs de ces filières.

Ceci devait permettre d'évaluer par type de danger étudié un niveau de retour d'expérience c'est-à-dire d'évaluer si l'événement semble possible / plausible.

Une des difficultés a été qu'aucune donnée ATMP ne concerne spécifiquement les filières de production, valorisation de biogaz. Les statistiques utilisées concernent des secteurs professionnels plus larges tels que les « non salariés agricoles », les « professionnels du secteur des « entreprises de traitement des ordures ménagères et des déchets industriels et commerciaux banals – 900 BC », ...

S'agissant des retours d'incidents / accidents, les données sont principalement issues de :

- la base de données BARPI, qui décrit comme déjà indiqué des événements propres à des unités de méthanisation ou ISDND mais qui n'est toutefois probablement pas exhaustive. De plus, les informations décrivant les événements sont parfois très succinctes et peu explicatives. L'origine des événements n'est pas toujours connue ou renseignée. Par ailleurs, il faut souligner que certains incidents sont relativement anciens (années 90 par exemple), en particulier dans le secteur des ISDND et qu'ils ne sont plus réellement représentatifs de ceux qui pourraient survenir à l'heure actuelle, les modes de gestion ayant évolué (ex : amélioration du captage du biogaz),
- le rapport de retour d'expérience mené en 2011, 2012 par l'INERIS qui semble être aussi heurté à certaines difficultés pour recueillir des données. Sur la base du recueil effectué, l'INERIS a cependant identifié les principaux phénomènes dangereux à considérer, au cours des phases d'exploitation et/ou maintenance dans les unités de méthanisation (hors ISDND *a priori*). Ils sont les suivants :
 - les incendies,
 - les explosions,
 - l'émission imprévue de toxiques gazeux (H₂S),

L'évaluation des incidents menée par l'INERIS (2012 a) montre aussi que les unités fonctionnelles telles que les centrales de cogénération, les systèmes d'injection des solides, les pompes, les tuyaux, les vannes et les agitateurs, sont particulièrement vulnérables, ce qui peut impliquer des défaillances sur la sécurité des systèmes (perte de confinement, fuites...).

A noter que ce retour d'expérience était uniquement axé sur les phénomènes accidentels (tels que les explosions, les incendies).

iv) Composition chimique (concernant notamment les divers micropolluants pouvant se retrouver à l'état de traces dans les biogaz) et microbiologique.

Ont été recherchées des données relatives à la composition chimique et microbiologique :

- des substrats ou matières entrantes traités dans ces diverses filières (sous-produits animaux, déchets verts, déchets ménagers, boues de stations d'épuration, ...),
- des produits de la méthanisation à savoir d'une part le biogaz, et d'autre part le digestat (hormis pour la filière de production de biogaz ISDND pour laquelle il n'y a pas de digestat).

Le but était d'identifier les micropolluants, et microorganismes pouvant constituer des dangers pour la santé humaine et potentiellement présents dans les différentes matières / produits à partir desquels les opérateurs peuvent être exposés *via*, contact cutané, ingestion ou inhalation.

La population cible de cette étude étant les travailleurs, la voie inhalation a été la voie majoritairement considérée pour les raisons suivantes :

- les valeurs d'exposition professionnelles (VLEP) ne sont définies que pour celle-ci,
- des moyens de protection probablement plus simples à mettre en œuvre et plus efficaces existent pour les autres voies (ex : gants, vêtements de protection, lavage des mains),
- l'exposition cutanée est de plus classiquement considérée comme négligeable au regard des autres voies (barrière cutanée), bien que certaines substances (ex : toluène) sont reconnues avoir une pénétration cutanée pouvant être importante.

Globalement relativement peu de données, notamment concernant le biogaz sont disponibles, et de manière encore plus prononcée pour les paramètres microbiologiques.

Les données disponibles de composition chimique pour des biogaz d'origines diverses ne sont de plus, pas toutes comparables en terme de composés recherchés, limites de quantification appliquées. Parmi les données disponibles, certaines sont issues d'études conduites dans des pays étrangers, pour lesquels les modes de gestion ne sont pas précisés / connus (cas notamment pour les filières ordures ménagères et ISDND) et, peuvent ne pas être transposables à la situation française. De plus, une variabilité importante est notée dans la composition du biogaz concernant ces micropolluants minoritaires, entre les filières, mais aussi, au sein d'une même filière (ex : entre des biogaz issus de deux STEP différentes), voire au cours du temps dans une même installation (ceci pouvant être lié à la variabilité des substrats entrants, mais également par exemple pour l'H₂S, à la dégradation de l'efficacité des traitements de désulfuration).

Les informations présentées dans ce rapport sont donc informatives mais ne doivent pas être considérées comme représentatives d'une filière ou une autre.

Quelques tendances semblent toutefois se dégager :

- le biogaz agricole semble être composé de moins de composés organiques volatils, (en nombre) et en concentrations plus faibles que les biogaz issus de substrats d'origine urbaine (boues de STEP, ordures ménagères, ISDND) en particulier en ce qui concerne :
 - o les hydrocarbures aliphatiques et aromatiques,
 - o les composés organiques de silicium (ex : siloxanes) issus de nombreux produits de consommation courante (ex : cosmétiques),
- à l'inverse la méthanisation des déjections animales, en particulier porcines serait propice à de plus fortes teneurs dans le biogaz en H₂S. L'ammoniac serait aussi principalement émis après méthanisation de produits agricoles (notamment déjections aviaires).

S'agissant des digestats / composts, les données disponibles concernent principalement les paramètres disposant de seuils « d'innocuité » en cas d'épandage dans les normes NFU (44-051 et 44-095) soit, des éléments traces métalliques, quelques HAP, quelques PCB et quelques microorganismes pathogènes. A noter qu'en général ces seuils sont respectés.

v) Résultats de mesures en ambiances de travail et d'exposition individuelle

Ce type de données a été recherché pour les substances chimiques et paramètres microbiologiques également.

Plus que les données de composition de matières et produits de la méthanisation, ces mesures d'ambiances de travail ou d'exposition individuelle sont plus représentatives de l'exposition potentielle des opérateurs.

Elles sont toutefois très éparpillées également. Quelques études peuvent être rappelées :

- o étude RECORD (2001) dans des centres de stockages d'ordures ménagères,
- o travaux de Nadal *et al.* (2009) en Espagne dans un centre de méthanisation / compostage de la fraction organique des ordures ménagères (biodéchets),
- o travaux de Goyer *et al.* (2001) concernant les bioaérosols. A noter que pour ces derniers, aucun seuil tel que les VLEP définies pour les substances chimiques n'est à ce jour disponible. L'évaluation des risques microbiologiques est effectivement encore plus complexe que celle mise en œuvre pour les substances chimiques.

vi) Résultats d'études épidémiologiques.

Ces études ont pour intérêt d'évaluer si des liens significatifs existent entre l'exposition d'une population (ici travailleurs) et l'apparition d'effets sanitaires. Des données épidémiologiques ont notamment été utilisées pour les travailleurs de la collecte et du tri des déchets ménagers, des centres de compostage et de stations d'épuration. Les déterminants principalement mis en cause dans les études utilisées sont les bioaérosols auxquels peuvent être exposés les populations de travailleurs des secteurs cités ci-dessus. Les troubles musculo-squelettiques sont aussi évoqués pour des opérateurs de tri manuel des déchets et de leur collecte.

A noter que certaines de ces études ont aussi été effectuées à l'étranger et/ou il y a plusieurs années et, ne sont peut-être pas ou plus représentatives de la situation française actuelle. Pour certains troubles, des données sont manquantes (les experts ne peuvent se prononcer).

La collecte de ces données nous a donc ensuite permis pour les filières étudiées d'identifier et hiérarchiser des points critiques vis-à-vis de la santé et sécurité des opérateurs.

Remarque : Cette étude a l'intérêt de s'être penchée, si ce n'est sur tous, sur la plupart des dangers potentiels auxquels des opérateurs de la filière biogaz pourrait être confrontés (qu'ils soient liés à des phénomènes accidentels ou à des expositions aiguës, chroniques à des substances chimiques, microorganismes ou dérivés, nuisances sonores ou postures / gestes répétés).

Cependant nous ne pouvons assurer l'exhaustivité complète des dangers ou situations étudiés. Il est possible que dans le cas de situations particulières, des dangers ou étapes n'aient pas été identifiés dans le cadre de cette étude. Par exemple, sur les diagrammes réalisés les locaux de compression de biogaz, le cas échéant n'ont pas été représentés. Cependant, les mêmes points critiques que pour les locaux de valorisation peuvent a priori être identifiés (ex : nuisances sonores, risque de fuite dans un local confiné pouvant notamment engendrer la formation d'une ATEX, ...)

Concernant la méthodologie mise en œuvre pour identifier différents niveaux de points critiques, elle a été basée sur une méthodologie de scoring croisant des niveaux d'enjeu avec des niveaux de retour d'expérience.

A noter que les termes employés classiquement dans ce type de démarche de scoring, hiérarchisation des dangers (à savoir par exemple, gravité des conséquences, probabilité d'occurrence) ont été évités afin de ne pas prêter à confusion pour le lecteur. L'étude menée ne correspond ni à une évaluation des risques professionnels ni à une étude de dangers.

Ce sont les informations collectées et mentionnées précédemment qui ont servi à déterminer, pour chaque danger identifié, un niveau d'enjeu et un niveau de retour d'expérience, adaptés à chaque filière, voire étape et phase de fonctionnement. Les arguments issus de la collecte de données sont présentés par filière, dans des tableaux associés aux diagrammes illustrant les étapes des installations.

Il faut toutefois souligner l'existence de **certains biais** :

- Les données disponibles sont globalement rares et, certaines filières, substrats, biogaz ont bénéficié d'un plus grand nombre de travaux.

Par exemple s'agissant de la caractérisation chimique du biogaz, la synthèse de l'AFSSET (2008) porte sur un nombre variable d'analyses de biogaz (par exemple 1 analyse pour du biogaz agricole, contre 25 pour du biogaz brut issu d'ISDND et 2 concernant le biogaz épuré). De plus, comme déjà évoqué, les composés recherchés sont variables selon les études les résultats ne sont donc pas complètement comparables.

On peut également noter que des études épidémiologiques ayant mis en évidence des liens entre l'exposition des travailleurs à des bioaérosols et des effets sanitaires ont été réalisées dans les secteurs des STEP, de la collecte et du tri des ordures ménagères et, des centres de compostages, ce qui a conduit à attribuer un niveau de retour d'expérience modéré au danger microbiologique lié aux bioaérosols dans ces filières. Pour le secteur agricole, aucune étude n'ayant eu lieu, le niveau de retour d'expérience a été considéré comme faible mais il est pourtant probable que des effets sanitaires puissent aussi être engendrés chez des opérateurs agricoles exposés également à des bioaérosols relativement abondants.

- De plus, les données employées sont parfois non spécifiques des unités de méthanisation, production de biogaz. Pour rappel, par exemple, les données ATMP concernent des secteurs plus larges et, il n'est pas possible aujourd'hui de savoir s'ils se sont déroulés dans des unités de méthanisation et lors d'opérations liées à cette activité.
- Par ailleurs, comme déjà indiqué, les dangers étudiés sont de divers ordres (ex : accidentel, lié à une exposition chronique). Pour leur attribuer des niveaux d'enjeux et surtout des niveaux de retour d'expérience, différents types de données ont été employés (retour d'expérience relative aux accidents décrits, statistiques ATMP, niveaux dans les biogaz, retours de professionnels, ...) ce qui peut aussi introduire un biais, notamment si l'on souhaitait comparer les dangers entre eux.

Par exemple, le nombre d'événements accidentels tels que les incendies/explosions liés aux ATEX (tout au plus 1 à 2 cas par an) n'est pas comparable au nombre d'accidents du travail déclarés chez les salariés du secteur « autres services d'assainissements - 900 AA » (999 AT en 2010).

A noter cependant que rapportés, au nombre d'installations de méthanisation opérationnelles en France en 2011 (hors ISDND, environ 200), 2 accidents par an représentent une fréquence de 1%, et, rapportés au nombre de salariés (17854 en 2010), les 999 AT représentent une fréquence de 5,7 % environ. Ces fréquences ne paraissent pas si éloignées.

Il faut aussi noter que dans le cadre des contacts avec les experts et membres du comité de suivi, des échanges et retours plus importants ont eu lieu avec des professionnels de certains secteurs (notamment des ISDND) ce qui a permis d'approfondir les informations pour ce secteur mais a pu également introduire un certain biais par rapport aux autres filières.

En conclusion :

Gardant à l'esprit ces limites, cette étude a permis, non pas de comparer les filières entre elles, mais

- d'une part, de faire des observations plus ou moins généralisables à l'ensemble des filières et,
- d'autre part, d'identifier certaines situations particulières.

Ainsi de manière générale :

- les risques liés à la production de biogaz, gaz inflammable pouvant exploser s'il se retrouve en conditions stœchiométriques dans l'air en cas de source d'ignition, et liés à la présence potentielle de zones ATEX, sont à considérer dans toutes les filières en particulier, au niveau, des digesteurs y compris soupapes), des brides, raccords, pots de purges de canalisations, des torchères et des locaux confinés accueillant les équipements de valorisation du biogaz. Des détecteurs (ex : 4 gaz) semblent indispensables,
- dans la plupart des filières, la problématique de l'émission d'H₂S, à des concentrations pouvant être élevées doit être souligné. Le port de détecteurs permettant d'éviter une exposition à des concentrations trop élevées semble aussi indispensable au moins dans les locaux confinés et lors de maintenance,
- dans toutes les filières les opérations de maintenance exposent à des risques accrus (pour rappel non évalués) de blessures, chutes et exposition à des substances chimiques et microorganismes. Les opérations de mise en service (démarrage des digesteurs, raccordement électrique) sont aussi des situations pouvant générer des risques (ex : ATEX, électrisation),
- le niveau sonore dans les locaux de valorisation du biogaz est probablement commun à l'ensemble des filières et nécessite le port de protections auditives en cas d'entrée,
- la gestion des matières entrantes et sortantes (digestats) est susceptible de générer des expositions dans le cadre du fonctionnement normal des installations. L'exposition au biogaz est quant à elle susceptible de se produire plutôt lors d'opérations de maintenance ou lors de dysfonctionnements (fuites),

- la gravité des blessures est en général plus élevée lors de chutes de hauteur. Une attention doit donc être portée en bord de fosse ou lors de la montée sur les digesteurs par exemple.

S'agissant **des situations particulières** par filière, il semble nécessaire de devoir porter une attention spéciale à certains opérateurs / postes de travail :

- les opérateurs de construction, maintenance des réseaux de captage en ISDND, de plus en plus employés au sein de filiales dédiées à ces tâches, sont potentiellement exposés tout au long de la journée aux dangers liés au biogaz (possibilité de feux torches au niveau des brides / raccords de canalisations, exposition répétée/chronique à des substances chimiques dont des substances CMR et aux microorganismes présents dans le biogaz).
Le travail de pose de canalisations induit aussi probablement des gestes et postures pouvant entraîner chez ces opérateurs des troubles musculo-squelettiques. Des blessures liées à l'emploi de matériel peuvent aussi être plus fréquentes,
- les opérateurs remplissant / terrassant les alvéoles en ISDND opèrent en engins et, malgré l'équipement de ceux-ci de filtres destinés à diminuer l'exposition aux poussières, substances chimiques et bioaérosols, ils sont potentiellement exposés toute la journée aux émissions diffuses de biogaz (à noter cependant que celles-ci sont de plus en plus faibles avec les nouveaux modes de gestion des ISDND). Pour rappel, même si elles sont encore très rares, aucune mesure n'a révélé de dépassements de VLEP (valeurs limites d'exposition professionnelle) au niveau de ces postes de travail. Des approfondissements semblent toutefois nécessaires,
- le cas échéant (pas nécessairement le cas aujourd'hui ou en tout cas pas dans la majorité des installations), lorsque des opérations de tri en particulier manuel sont réalisées, notamment pour les filières de méthanisation des ordures ménagères, voire les filières agricoles centralisées où divers substrats arrivent et peuvent nécessiter un tri, les opérateurs présents sont susceptibles d'être exposés à des doses plus élevées (qu'à d'autres postes ou lieux) en poussières, bioaérosols et polluants chimiques.
Lors de la maintenance, lavage des équipements et locaux de réception, tri des substrats, ces expositions potentielles doivent aussi être considérées.
Le tri manuel représente également une opération susceptible de provoquer des troubles musculo-squelettiques,
- s'agissant des accidents du travail, d'après le retour de professionnels, confirmé par quelques cas décrits dans la base de données EPICEA, les opérations de déchargements, vidages de déchets (notamment en centre de méthanisation des ordures ménagères et ISDND) tend à montrer que de graves blessures, voire la mort, peuvent être provoquées. Une attention particulière doit donc être portée aux postes de travail dans ces zones,
- les opérations de compostage des digestats (notamment réalisées dans les filières de méthanisation des boues de STEP et des ordures ménagères) sont susceptibles de provoquer des expositions des opérateurs à des composés organiques volatils, en particulier l'ammoniac, des bioaérosols et poussières. Des teneurs en ambiance de travail supérieures aux VLEP ont notamment été observées pour l'ammoniac et, des liens entre des effets sanitaires et l'exposition de travailleurs aux bioaérosols émis dans les centres de compostage ont été mis en évidence. A noter que les opérateurs de compostage sont aussi la plupart du temps dans des engins équipés des filtres permettant de diminuer les expositions. L'INRS a cependant soulevé le problème de l'efficacité de certains de ces filtres notamment vis-à-vis de l'ammoniac.

A noter que les données recueillies n'ont pas permis de distinguer les unités en fonction des quantités de substrats traitées ou de biogaz produit. Des tailles très variables d'exploitation existent cependant. Les équipements de valorisation, stockage du biogaz doivent bien évidemment être adaptés à la production. Aucune information ne permet aujourd'hui de dire que des risques sont plus à craindre dans de grosses ou à l'inverse dans de petites unités.

Pour finir, on peut noter que les évolutions dans ces filières de production, valorisation de biogaz sont, du fait d'un contexte réglementaire et économique favorable, actuellement rapides.

D'autres substrats sont traités (ex : algues vertes, microalgues⁵⁶), certaines voies de valorisation s'ont amenées à se développer de manière importante (ex : injection de biométhane), d'autres technologies voient le jour (ex : méthanisation en batch).

Ceci nécessitera donc de s'y intéresser également.

A noter également que même si, d'après le bilan du Club Biogaz (2001), un certain nombre d'installations, en particulier dans les secteurs industriels et des stations d'épuration urbaines, ne désulfurent encore actuellement pas le biogaz, *a priori* toutes les nouvelles installations incluent ce type de traitement en vue notamment d'allonger la durée de vies des équipements de valorisation (en évitant les phénomènes de corrosion). L'épuration des composés organiques de silicium devrait également être plus systématiquement réalisée dans les secteurs concernés (secteurs traitant les substrats d'origine urbaine : ISDND, ordures ménagères, boues de STEP).

Par ailleurs, de nombreux travaux continuent d'être menés et permettront probablement d'affiner certains résultats obtenus dans le cadre de cette étude. La caractérisation microbiologique des biogaz est par exemple un sujet qui devrait être plus amplement traité dans les années à venir (ex : projet de recherche BIOVALSAN).

Signalons aussi le démarrage en 2013 d'une étude par l'INRS concernant également la santé et la sécurité des opérateurs dans certaines des filières étudiées ici avec, prévues, dans une second phase d'étude, des mesures sur sites.

Un travail de l'ANSES devrait également être prochainement remis au Ministère concernant la santé de la population générale complétant la première expertise menée en 2008 relatives aux effets sanitaires pour les utilisateurs liés à l'injection de biométhane dans le réseau de gaz naturel (pas d'information plus détaillée).

Depuis 2011, un groupe de travail européen piloté par EU-VRi et INERIS a été mis en place sur le thème de la sécurité du biogaz et de la réglementation. Ce groupe de travail a pour objectif d'accompagner le déploiement de la filière du biogaz en Europe de façon propre et sûre. Il pourra s'appuyer sur l'utilisation d'outils d'évaluation des risques développés dans le cadre du projet Européen INteg-Risk (Early Recognition, Monitoring and Integrated Management of Emerging, New Technology Related Risks (<http://www.integrisk.eu-vri.eu/>) et adaptés à la filière de la méthanisation afin de :

- identifier et caractériser les risques émergents liés au développement des procédés de production du biogaz en Europe,
- sensibiliser les décideurs et les gestionnaires de risques à ces risques émergents,
- fournir des documents de référence pour améliorer la sécurité des procédés mettant en œuvre du biogaz,
- créer le partage du retour d'expérience au sein du réseau européen du biogaz,
- contribuer à l'élaboration d'une stratégie européenne de gestion des risques émergents relatifs à la mise en œuvre du biogaz.

⁵⁶ Une étude a notamment été réalisée pour GrDF par le CRIGEN de GDF Suez sur le biométhane de microalgues (2013).

BIBLIOGRAPHIE

ADEME. 2005. Impacts environnementaux de la gestion biologique des déchets. Bilan des connaissances. 331 p.

ADEME. 2007. Biogaz issu de la mise en décharge : comment optimiser son captage ? 158 p.

ADEME. 2009. Campagne nationale de caractérisation des ordures ménagères (MODECOM) - Résultats 2007. 6 p.

ADEME. 2010 a. Expertise de la rentabilité des projets de méthanisation rurale. Etude réalisée par SOLAGRO, EREP, PSPC, SOGREAH, PERI G, 130 p.

ADEME, 2011. Qualité agronomique et sanitaire des digestats. Etude réalisée par RITTMO. 250 p.

ADEME. 2010 b. Suivi expérimental de l'installation de méthanisation du GAEC du Bois Joly. Bilan global - Rapport définitif. Etude réalisée par Biomasse Normandie et APESA. 119 p.

ADEME. 2012 a. Le cadre réglementaire et juridique des activités agricoles de méthanisation et de compostage. Étude réalisée pour le compte par l'APESA, BIOMASSE NORMANDIE et RITTMO et révisée par le Club biogaz. 83 p.

ADEME. 2012 b. Programme de recherche de l'ADEME sur les émissions atmosphériques du compostage – connaissances acquises et synthèse bibliographique. 243 p.

ADEME, AILE, SOLAGRO, TRAME. 2011. La méthanisation à la ferme. 20 p.

ADEME et FNADE. 2007. État des connaissances techniques et recommandations de mise en œuvre pour une gestion des installations de stockage de déchets non dangereux en mode bioréacteur. 48 p.

ADEME et GrDF. 2010. Etude de marché de la méthanisation et des valorisations du biogaz. Etude réalisée par Ernst & Young. 142 p.

ADEME, SYPREA, Les Entreprises de l'Eau, INERIS. 2007. Evaluation des risques sanitaires des filières d'épandage des boues des stations d'épurations. Base scientifique de l'évaluation des risques sanitaires liés aux agents pathogènes. 172 p.

AFSSET. 2008. Risques sanitaires du biogaz : Evaluation des risques sanitaires liés à l'injection de biogaz dans le réseau de gaz naturel, Rapport d'expertise collective « Groupe de travail Biogaz », Saisine Afsset n°« 2006/010 », 174 p.

Agence de l'eau Adour Garonne. 2006. Méthanisation des effluents industriels. 26 p.

Agricométhane, année non précisée. L'installation de biométhanisation de la ferme du Faascht – Belgique. Analyse technique. 6 p.

AILE, SOLAGRO, ADEME, TRAME. 2006. La méthanisation à la ferme. 16 p.

AMORCE et ADEME. 2011. Méthanisation des déchets ménagers (installations de traitement des biodéchets collectés sélectivement et installations de traitement mécano-biologique des ordures ménagères) - État des lieux – Mars 2011. 84 p.

APESA. 2007. Méthanisation et Production de Biogaz : Etat de l'art (version 1). 37 p.

ARAVIS, CARSAT Rhône-Alpes, caisses départementales de la MSA. 2011. Prévenir les TMS dans l'agroalimentaire : comprendre et agir. SP1171. 2 p.

ATEE, Club Biogaz. 2011. État des lieux de la filière méthanisation en France, 61 p.

ATEE, Club Biogaz. 2012. Biogaz : les voies de valorisation. [en ligne <http://www.atee.fr/biogaz/biogaz-les-voies-de-valorisation> ; consulté le 15 avril 2013].

Bio-Tox. 2009. Synthèse des connaissances sur les impacts environnementaux et les risques sanitaires de l'incinération, de la méthanisation, et des centres de stockage. 50 p.

BONNIER S. 2008. Etat de la valorisation du biogaz sur site de station d'épuration en France et en Europe. Synthèse technique. 19 p

BOYER S. LABRUNIE D. et SEGARD E. 2009. Fabrication de Biogaz : Synthèse de pétrole par fermentation à partir de déchets organiques, mémoire de fin d'étude, Groupe Esaip – Ecole d'ingénieurs : Sécurité et Prévention des risques, Angers, 32 p.

BUFFIERE P, CARRERE M, LEMAIRE O, VASQUEZ J. Guide méthodologique pour l'exploitation d'unités de méthanisation de déchets solide. 40 p.

Comité Européen de Normalisation. 2005. Lignes directrices sur le HACCP, les Bonnes Pratiques de Fabrication et les Bonnes Pratiques d'Hygiène pour les PME. 105 p.

COUTURIER C. 2002. Effets de la digestion anaérobie sur les micropolluants et germes pathogènes. SOLAGRO. 5 p

COUTURIER C., GALTIER L., POUECH P., BRUGERE H., MARACHE L., KAEMMERER M. 2000. Etat des connaissances sur le devenir des germes pathogènes et des micropolluants au cours de la méthanisation des déchets et sous-produits organiques, rapport ADEME n° 98-93-024, 100 p.
CULOT M. 2005. Filières de valorisation agricole des matières organiques. 73 p.

DEUBLEIN D., STEINHAUSER A. 2011. Biogas from waste and renewable resources: an introduction, 2nd revision and expanded edition, John WILEY and Sons, 578 p.

DEBRIEU C. 2004. Lutte contre les odeurs de l'assainissement. Document technique FNDAE n° 13.

EFFEBI K.R. 2009. Lagunage anaérobie : modélisation combinant la décantation primaire et la dégradation anaérobie. Thèse de Docteur en Sciences. Université de Liège. 235 p.

ENEA consulting. 2012. Facts & Figures. Le biométhane. Enjeux et solutions techniques. 16 p.

GDF SUEZ, IFP (Innovation Energie Environnement), ADEME. 2009. Etude Biogaz Etat des lieux et potentiel du biométhane carburant. 102 p.

GOYER N., LAVOIE J., LAZURE L., MARCHAND G. 2001. Les bioaérosols en milieu de travail : guide d'évaluation, de contrôle et de prévention. Etudes et Recherches. Guide technique. IRSST. 72 p.

GOURC JP. STAUB M. 2009. L'actualisation nécessaire de la conception des couvertures de stockage de déchets. Rencontres Géosynthétiques. 10 p.

GrDF et ADEME. 2011 Principes et procédés d'épuration du biométhane pour l'injection dans les réseaux de gaz naturel. Phase : Faisabilité du projet d'injection. Etape : Considérations générales 12 p.

HAHN H., HOFFSTEDE U. 2010. Final assessment report on residual materials. Projet BIOGASMAX. 251 p.

IEA (International Energy Agency). 2009. Biogas upgrading technologies – developments and innovations. 20 p.

INERIS, année non précisée. Émissions accidentelles de substances chimiques dangereuses dans l'atmosphère. Seuils de toxicité aiguë. Ammoniac. 3 p.

INERIS. 2000. Seuils de toxicité aiguë - Hydrogène Sulfuré (H₂S). 39 p.

- INERIS. 2002. Caractérisation des biogaz: Bibliographie, Mesures sur site, 31 p.
- INERIS. 2006. Etude comparative des dangers et des risques liés au biogaz et au gaz naturel, rapport N° 46032, 34 pages.
- INERIS. 2008 a. Etude des risques liés à l'utilisation des méthaniseurs agricoles, Rapport d'étude n° DRA-07-88414-10586B réalisé pour le Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables, 91 p.
- INERIS. 2008 b. De la méthodologie VTR à l'établissement des DNEL : Comparaison méthodologique et études de cas EATDRC 08 - Opération A. rapport d'étude N°DRC-08-94380-12195A. 152 p.
- INERIS. 2009. Risques sanitaires liés à l'injection de biogaz issu de boues de STEP dans un réseau de gaz naturel – travaux préliminaires. Rapport d'étude n° DRC-09-104115-15569A. 35 p.
- INERIS. 2012 a. Retour d'expérience relatif aux procédés de méthanisation et à leurs exploitations. EAT DRA DRC- 93 - Opération A. 148 p.
- INERIS. 2012 b. Etude comparative de la qualité de composts et de digestats issus de la fraction fermentescible d'ordures ménagères, collectée séparément ou en mélange. Rapport d'Etude N°INERIS – DRC – 12 – 125976 -02525 B. 124 p.
- INGERSOLL J.G. 2010. Biomethane: the alternative renewable fuel for transportation, Xlibris Corporation, 109 pages.
- INRS, 2007. Point de repères. Les risques biologiques en milieu professionnel – Hygiène et sécurité du travail – cahiers de notes documentaires – PR 28-207. pp 85- 96 .
- INRS, 2008. Point de repères. Prévention et risques industriels. Hygiène et sécurité du travail – Cahiers de notes documentaires. PR 36-212. pp 7 -88.
- INRS, 2010. Approche des risques chimiques et microbiologiques dans le secteur du compostage. Hygiène et sécurité du travail. ND 2336 – 221. 14 p.
- INRS, 2011. Endotoxines en milieu de travail. II. Exposition, risques, prévention. Dossier médico-technique. 19 p.
- INRS. 2012 a. Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France. ED 984. Aide-mémoire Technique. 32 p
- Institut de l'élevage. 2012. La méthanisation dans la filière laitière. Départements Techniques d'Elevage et qualité. Service Bâtiment-Environnement. Compte rendu 00 12 33 011.
- INVS (Institut de Veille sanitaires). 2004. Stockage des déchets et santé publique. 348 p.
- LAVOIE J., MASSE D., CROTEAU F., MASSE L. 2004. Évaluation de l'impact des additifs de lisier sur l'exposition des travailleurs et l'atténuation des odeurs. Etudes et Recherches – IRSST (Institut de Recherche Robert Sauvé en Santé et en Sécurité du Travail). 41 p.
- MARCHAIS C. 2011. Biogaz et méthanisation en France.
http://www.fnccr.asso.fr/documents/2.%20ClubBiogaz%20ATEE_Caroline%20MARCHAIS.pdf ;
 consulté le 15 mars 2013.
- MOLETTA M. 2006. Caractérisation de la diversité microbienne aéroportée des biogaz. Déchets-revue francophone d'écologie industrielle – cahier spécial du n° 44. pp 18-20.
- MOLETTA-DENAT M., BRU-ADAN V., DELGENES JP., HAMLIN J., WERY N., GODON JJ. 2010. Selective microbial aerosolization in biogas demonstrated by quantitative PCR. Bioresource Technology. Vol 101. pp 7252-7257.

MOLETTA M. WERY N., DELGENES JP., GODON JJ. 2008. Water Science & Technology. Vol 57, n°4. pp 595-599.

MOLETTA R. 2002. La méthanisation de la matière organique. Aspects généraux. 12 p.

MOLETTA R. 2003. La méthanisation des déchets municipaux. 16 p.

MSA (Mutualité Sociale Agricole) - Direction des Etudes des Répertoires et des Statistiques. 2011 Accidents du travail et maladies professionnelles des non-salariés agricoles 2005-2007. Données nationales. 105 p.

NADAL. M., INZA I., SCHUHMACHER M., FIGUERAS M., DOMINGO J. 2009. Health risks of the occupational exposure to microbiological and chemical pollutants in a municipal waste organic fraction treatment plant. International Journal of Hygiene and Environmental Health. Vol 212, N) 6. pp 661 – 669.

OFEV : Office fédéral de l'environnement suisse. 2007. Document « Compost et digestat en Suisse » Étude n° 1 : Micropolluants organiques dans le compost et le digestat ; Étude n° 2 : Influences des composts et des digestats sur l'environnement, la fertilité des sols et la santé des plantes. 126 p.

OHANNESSIAN A. 2008. Composés Organiques Volatils du Silicium : Un frein à la valorisation énergétique des biogaz – « *Génèse et mécanismes de formations* ». Thèse INSA de Lyon. 305 p.

ORS (Observatoire Régional de la Santé – Rhône-Alpes). 2010. L'évaluation des effets sanitaires liés à la gestion des déchets ménagers et assimilés (DMA). Rapport scientifique. 184 p.

PEU P. 2011. La gestion des effluents d'élevage et la production d'hydrogène sulfuré, cas particulier de la méthanisation. Thèse Ecole Doctorale SDLM. Université de Rennes 1. 173 p.

RASI. 2009. Biogas composition and upgrading to biomethane. Academic dissertation. Université de Jyväskylä. 79 p.

RASI S. VEIJANEN A., RINTALA J. 2007. Trace compounds of biogas from different biogas production plants. Energy, n° 32. pp 1375–1380

RECORD. 2001. Etude des polluants atmosphériques émis dans deux centres de stockage des ordures ménagères ; caractérisation et mesure des niveaux d'exposition ; mise au point d'outils de suivi en vue de l'évaluation des risques sanitaires. Synthèse. Etude n° 99-0654/3A. 21 p.

RECORD. 2003. Etat des connaissances sur les micro-organismes dans la filière déchets, étude 01-0657/1A

RECORD. 2009 a. Freins et développements de la filière biogaz : les besoins en recherche et développement, étude n°07-0418/1A. 134 p.

RECORD. 2009 b Techniques de production d'électricité à partir de biogaz et de gaz de synthèse, étude n°07-0226/1A, 253 p.

RECORD 2012 a. Substances émergentes, polluants émergents dans les déchets : analyses et prospective, étude n°10-0143/1A. 183 p.

RECORD 2012 b. Pratiques de suivi médical des salariés des filières déchets. Etat des lieux et avis d'experts, étude 10-0672/1A. 135 p

SOLAGRO. 2001. La digestion anaérobie des boues urbaines. Etat des lieux, état de l'art. 36 p.

SOLAGRO, ATEE, ALKAEST Conseil et ISCAM-production2004. Le biogaz info. 4.3 Le conditionnement du biogaz [en ligne <http://www.lebiogaz.info/site/034.html> ; consulté le 15 avril 2013].

VINNERAS B. NORDIN A. 2007. Microbiological community in biogas systems and evaluation of microbial risks from gas usage. Energie - wasser-praxis 12/2007 – DVGW Jahresrevue. pp 50-53.

Sites internet, bases de données :

Ademe : <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?id=11433&m=3&cid=96>

Base de données EPICEA de l'INRS. <http://www.inrs.fr/accueil/produits/bdd/epicea.html> ; consulté le 02/10/2012.

Base de données ARIA du BARPI <http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/> ; consulté le 02/10/2012.

CNAMTS, 2010. Statistiques par numéro de risque ou par code APE-NAF. <http://www.risquesprofessionnels.ameli.fr/chiffres-cles-et-statistiques/nos-statistiques.html> ; consulté le 18/12/2012.

HACCP. <http://www.haccp-guide.fr/>

INERIS, fiches de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques : <http://www.ineris.fr/rapports-d%C3%A9tude/toxicologie-et-environnement/fiches-de-donn%C3%A9es-toxicologiques-et-environnementales->

Injection biométhane : <http://www.injectionbiomethane.fr/>

INRS. 2012b. article « Electricité » <http://www.inrs.fr/accueil/risques/phenomene-physique/electricite.html> ; consulté le 08/10/2012.

Le biogaz info : <http://www.lebiogaz.info/>

Ministère de l'Agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt. Guides de Bonnes Pratiques d'Hygiène : <http://agriculture.gouv.fr/guides-de-bonnes-pratiques-d,10454>

Solagro : <http://www.solagro.org/>

ANNEXES

Annexe 1 : Principales définitions et notions relatives à la méthanisation, production de biogaz

1.1 Définitions principales

La **méthanisation**, ou digestion anaérobie, est définie comme « un procédé naturel de transformation, dégradation de la matière organique par des bactéries en absence d'oxygène » (<http://www.solagro.org>, consulté le 15/12/11).

Elle se produit de façon spontanée dans les marais par exemple ou dans les installations de stockage de déchets non dangereux (ISDND).

Elle peut également s'inscrire dans le cadre d'une production contrôlée. On parle d'unité de méthanisation. Les déchets organiques (ou « intrants ») préalablement triés, sont brassés et chauffés à température constante dans une enceinte privée d'oxygène. La digestion des matières organiques produit du biogaz ainsi qu'un résidu plus ou moins pâteux appelé digestat.

Le **biogaz** est « un gaz produit par la méthanisation ou digestion anaérobie de la matière organique » (<http://www.solagro.org>, consulté le 15/12/11). C'est un « mélange gazeux saturé en eau à la sortie du digesteur et composé d'environ 50 % à 70 % de méthane (CH₄), de 20 % à 50 % de gaz carbonique (CO₂) et de quelques gaz traces (NH₃, N₂, H₂S) ». Elle dépend en particulier des matières intrantes pour la production de biogaz, le pouvoir méthanogène de ces différentes matières pouvant aussi être différent.

Le terme « biogaz de décharge » a pu être employé pour décrire le biogaz issu des ISDND.

Combustible, le biogaz constitue une source d'énergie renouvelable pouvant être valorisé sous différentes formes telles que la combustion pour la production d'électricité et de chaleur, la production de carburant (<http://www.ademe.fr>, consulté le 15/12/11) et l'injection dans le réseau de gaz naturel. Pour ces deux dernières voies de valorisation, on parle de biométhane.

Le **biométhane** est du biogaz qui a été épuré pour être similaire à du gaz naturel (pouvoir calorifique, composition). Il a été débarrassé de ses impuretés et de ses composants indésirables, tels que le dioxyde de carbone (CO₂), l'hydrogène sulfurisé (H₂S) ou l'eau par exemple.

Il peut être valorisé comme biocarburant gazeux ; on parle alors de biométhane carburant. Il s'utilise exactement comme le gaz naturel, nécessitant pour alimenter un véhicule d'être comprimé à 200 bars par une station de compression (Groupe de travail Energie-Environnement, 2009).

Une fois odorisé et contrôlé par le gestionnaire de réseau, le biométhane peut être injecté dans le réseau de gaz naturel, de façon à en exploiter les bénéfices en dehors du site de production avec les mêmes usages que le gaz naturel (chauffage, cuisson, production d'eau chaude ou de vapeur pour des besoins domestiques ou industriels) (<http://www.injectionbiomethane.fr/quid.html> ; consulté le 17/01/2012).

Un **digesteur**, ou méthaniseur ou bioréacteur anaérobie, est « une enceinte fermée dans laquelle les matières organiques sont soumises à l'action des bactéries différentes en absence d'oxygène permettant la succession des différentes phases de digestion anaérobie » (Culot, 2005). Différents digesteurs ont été développés

Le **digestat** est le « résidu produit lors du processus de méthanisation, composé de matières organiques non biodégradable, des matières minérales et d'eau ». Sa composition est influencée fortement par la matière première mais aussi par le procédé utilisé. Une proportion importante de matières fortement biodégradables dans la matière initiale, une longue période de rétention dans le digesteur et une digestion thermophile peuvent conduire à d'importantes modifications de la teneur en éléments nutritifs du digestat (Culot, 2005). Celui-ci peut être utilisé en agriculture comme fertilisant, après compostage ou non. A noter que les ISDND ne produisent pas de digestats.

Un **gazomètre** est un réservoir servant à stocker le gaz ou biogaz. Le stockage s'effectue généralement à basse pression, souvent à la même pression que dans le digesteur (quelques dizaines de millibars), sans compression. Le réservoir de stockage, le "gazomètre", est aujourd'hui souvent une capacité à membrane, simple ou double, parfois abritée sous bâtiment avec simple bardage. Il existe également des gazomètres en acier ou béton, avec un toit métallique (dôme) mobile, "à virole" (qui monte ou descend en fonction de la quantité de biogaz stockée).

Des réservoirs sous pression sont utilisés pour les unités de grande capacité en cas de fortes contraintes d'emprise au sol (pression de quelques bars), ou pour la valorisation sous forme de gaz carburant (stockage à environ 300 bars destiné à alimenter des réservoirs de véhicules à 200 bars). (<http://www.lebiogaz.info/site/034.html> consulté le 26/12/12).

1.2 Etapes de la méthanisation

La méthanisation est assurée grâce à l'action concertée de microorganismes appartenant à différentes populations microbiennes en interaction constituant un réseau trophique. Elle se produit par des réactions d'oxydation des composés organiques, qui engendrent l'énergie requise par les micro-organismes, et qui sont couplées à des réactions de réduction aboutissant finalement à la production de méthane.

Plusieurs types de micro-organismes interviennent au cours de quatre phases présentées dans la Figure E :

- les bactéries hydrolytiques ou fermentatives (hydrolyse),
- les bactéries acidogènes (acidogénèse),
- les bactéries acétogènes (acétogénèse),
- les bactéries méthanogènes (méthanogénèse).

Ces quatre étapes sont en général regroupées dans deux phases principales :

- la phase I de fermentation acide = Hydrolyse + Acidogénèse
- la phase II de méthanisation = Acétogénèse + Méthanogénèse

La phase de fermentation acide (également appelée fermentation méthanique primaire) conduit à la formation de produits intermédiaires, essentiellement des acides gras volatils, qui servent de substrat pour la phase de méthanisation (ou fermentation méthanique principale).

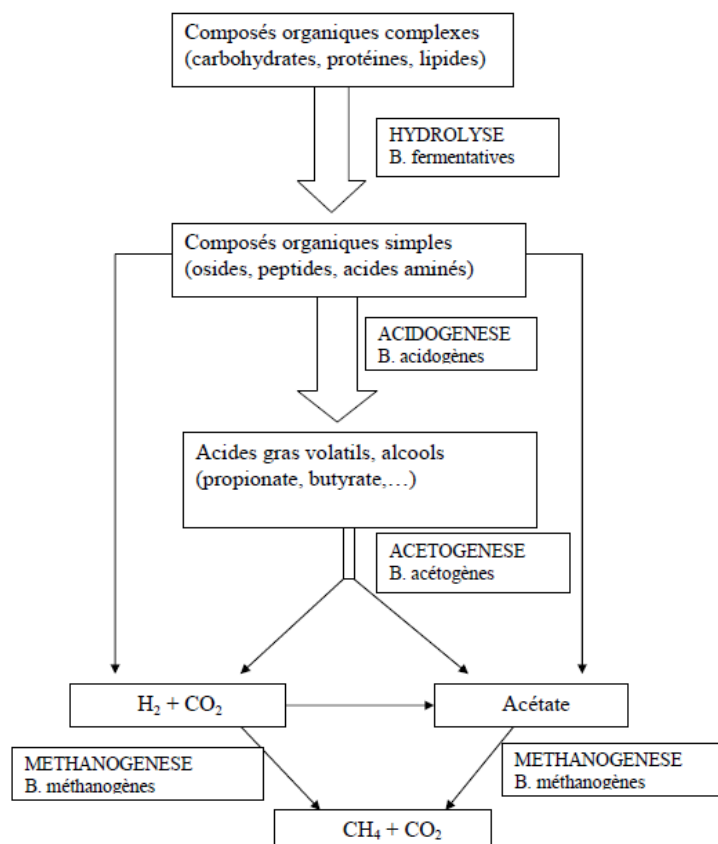


Figure E : Rappel des étapes de la méthanisation (Paing, 2001 cité par Effebe, 2009).

Cette digestion anaérobie de la matière organique est un processus biologique dépendant de divers facteurs limitants qui peuvent influencer la méthanisation : le pH, le couple température/temps de séjour et les substances inhibitrices. Leur maîtrise intervient d'une part dans l'optimisation de la méthanisation mais peut également constituer des facteurs-clés pour assurer la sécurité de l'installation et éviter les risques d'exposition des opérateurs.

1.3 Les sources organiques pour produire du biogaz

Les matières premières utilisées dans la méthanisation sont principalement organiques, à condition de ne pas être présentes sous forme trop complexe (plus le composé sera complexe et plus la phase d'hydrolyse de la matière sera longue). La lignine, composant majeur du bois, ne peut par exemple pas être dégradée par les procédés de méthanisation actuels.

La biomasse qui peut être fermentée est nommée alors « substrat ». On parle également de matières intrantes ou entrantes ou matières premières.

En général, tout type de biomasse peut être utilisé en tant que substrat s'il contient comme composés principaux des glucides, des protéines, de la cellulose et de l'hémicellulose car leur dégradation entraîne la production importante d'acides gras volatils qui sont les principaux précurseurs du méthane (Deublein et Steinhauser, 2011).

Les principales classes de substrats sont présentées ci-dessous (Record, 2009). Elles déterminent ainsi différentes filières de production de biogaz :

- **les déchets ménagers et assimilés (DMA)** : il s'en produit environ 40 MT par an en France (ADEME, 2011 - données de 2009), et comprennent :
 - les OMR (Ordures Ménagères Résiduelles),
 - les déchets des collectes sélectives,
 - les déchets collectés en déchèteries,
- **les déchets solides industriels** : la quantité produite est estimée à 4 MT par an en France (dont les producteurs se situent dans les secteurs des industries agro-alimentaires, chimiques et pharmaceutiques). Ils sont constitués par les sous-produits issus des procédés de fabrication qui ne trouvent pas de débouchés en compostage (légumes, champignons, viticulture, sucreries, etc.) ou en alimentation animale (fruits, déchets d'abattoirs, céréales et huileries, mélasses et tourteaux de sucreries, marcs de café, etc.),
- **les eaux résiduaires urbaines et industrielles** : les eaux résiduaires contiennent par définition une quantité importante de matières organiques facilement biodégradables,
- **les boues de station d'épuration** : les boues méthanisées dépendent des stations et de leur configuration. La méthanisation est le plus fréquemment réalisée sur des boues mixtes, soit sur le mélange : de boues primaires très chargées en matières organiques biodégradables, soit les plus aptes à la méthanisation et, de boues biologiques dont l'aptitude à la méthanisation dépend de leur âge et de leur charge organique. Les stations reçoivent également d'autres résidus de l'assainissement (graisses, matières de vidanges) susceptibles d'être méthanisés (Solagro, 2001),
- **les déchets des cultures et de l'élevage** : les lisiers et les fumiers constituent les substrats majoritaires dans les installations agricoles (60%) comme le montre la Figure F. Les résidus de cultures (pailles, tourteaux, pulpes, fanes,...) ont de hautes teneurs en carbone et sont facilement assimilables dans le digesteur.

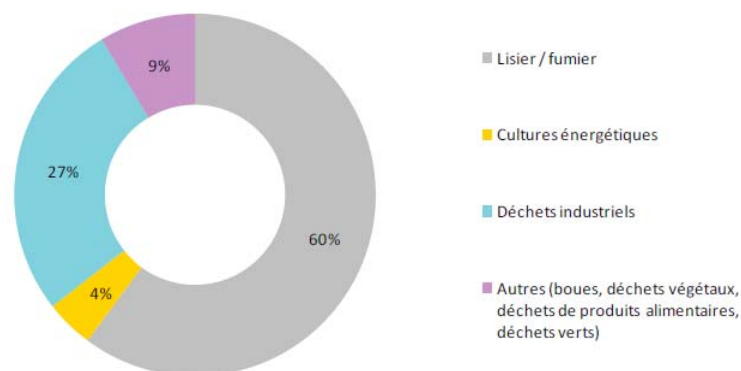


Figure F. Répartition par type de déchets traités (tonnages traités en 2009) à partir des installations en fonctionnement en 2009 en France dans le secteur agricole (source : Solagro citée par ADEME, 2010).

- **les cultures dédiées** appelées « cultures énergétiques » : certains pays comme l'Autriche, la Finlande, l'Allemagne et la Grande Bretagne (RECORD, 2009) les utilisent pour la production de biogaz. En France, cette option reste encore peu développée. Elle soulève des interrogations d'ordre environnemental (car la principale culture utilisée est du maïs ensilage produit de façon intensive) et du point de vue de la compétition avec l'alimentation (ADEME, 2009). Des réflexions sont menées concernant les « Cultures Intermédiaires à Vocation Énergétique » (CIVE), permettant le maintien des cultures alimentaires.

L'utilisation de ce type de cultures a un double intérêt :

- elles possèdent un pouvoir méthanogène important et permettent ainsi en co-digestion, d'augmenter la production de biogaz. Par exemple, le lisier porcin a un pouvoir méthanogène d'environ 10 m³ de méthane par tonne de matière brute (t MB) alors que les tourteaux de colza possèdent un potentiel de plus de 350 m³ CH₄/t MB (cf. Figure G).

En effet, selon la source de matière organique utilisée, la production de biogaz varie tant en volume de biogaz produit qu'en teneur en méthane. Ces deux paramètres influencent le Pouvoir Calorifique final du biogaz. C'est ce qui est défini sous le terme « potentiel méthanogène » (qui représente la quantité maximale de méthane produit par litre d'effluent ou par kg de déchet). Celui-ci permet de déterminer l'intérêt d'un produit organique à être méthanisé et à produire du biogaz⁵⁷.

La Figure H illustre la production d'énergie selon les substrats utilisés dans les unités de méthanisation.

- elles permettraient aussi de sécuriser une partie de l'approvisionnement des unités de méthanisation (communication, Colloque Biogaz Europe).

⁵⁷ Dans un test de mesure du potentiel méthanogène (Fiche Apesa, http://www.apesa.fr/iso_album/fiche_technique_tpm_apesa_1.pdf, consultée le 15/12/11), la vitesse de production de biogaz (cinétique de fermentation) et la composition en méthane (CH₄) et dioxyde de carbone (CO₂) sont mesurés. Les tests sont réalisés dans des réacteurs anaérobies d'une capacité minimale de 1 litre avec un inoculum anaérobie adapté. Fermés hermétiquement, les fermenteurs sont maintenus à 39°C dans un bain thermostaté et agités régulièrement (ou 55°C si flore thermophile). Chaque réacteur est muni d'un système d'enregistrement permettant la mesure du volume de biogaz produit au cours du temps ainsi que l'analyse de sa composition en CH₄ et CO₂.

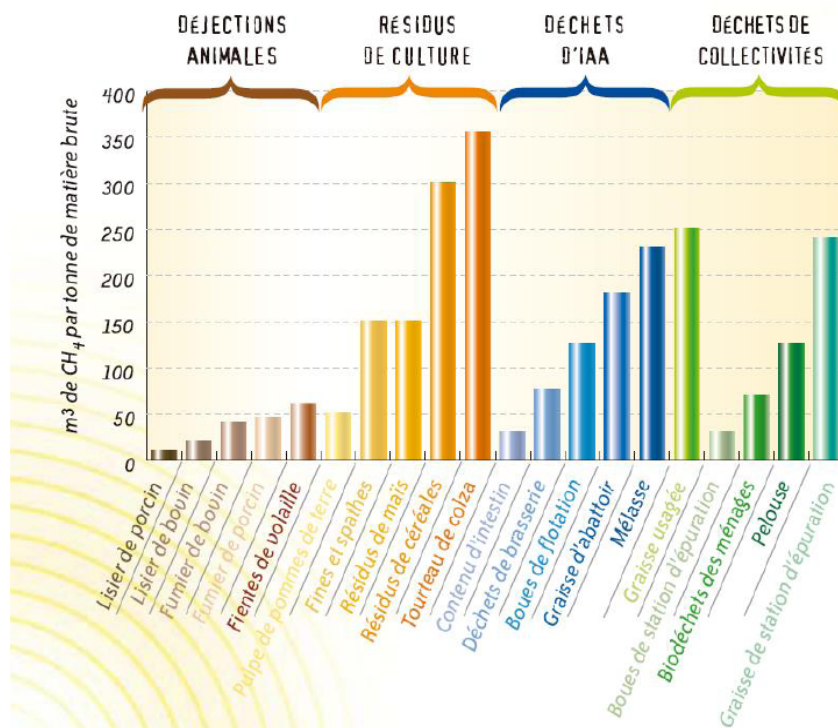
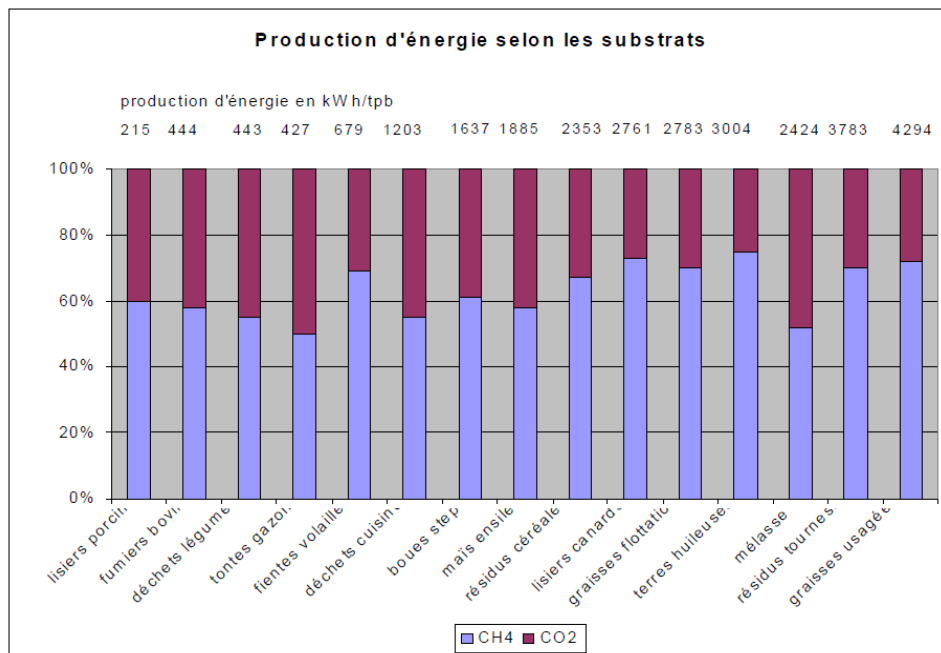


Figure G : Pouvoir méthanogène de différents matières intrantes dans les filières de méthanisation (ADEME, 2006).



Tpb : tonne de produit brut

Figure H : Comparaison de la composition du biogaz et du potentiel énergétique de différents substrats (source APESA, 2007).

A noter que même si le lisier possède un potentiel méthanogène relativement faible, il constitue cependant un substrat de base intéressant car il est liquide et sert à diluer les co-substrats. Il reste indispensable aussi car il apporte des bactéries fraîches et a un fort pouvoir tampon (stabilise le pH), ce qui facilite les réactions bactériennes et assure une stabilité du milieu. Les fumiers, solides, sont plus difficiles à traiter. Les graisses possèdent le plus fort potentiel et constituent un excellent substrat (tourteaux) ou co-substrat (déchets de restauration, graisses usagées). Les sources organiques en

particulier dans les installations de méthanisation agricole, sont donc souvent des mélanges de divers déchets et résidus organiques.

1.4 La méthanisation, production de biogaz dans les installations

Deux grands cas peuvent être discernés (AFSSET, 2008):

- la méthanisation maîtrisée en digesteur dont les principaux substrats sont pour rappel :
 - o les déchets agricoles : résidus de cultures (pailles, tourteaux, pulpes, fanes,...), substrats provenant d'industries agroalimentaires (déchets de légumes ou de fruits, petit lait, huiles, graisses,...), de collectivités (tonte de gazons, ..), restaurateurs ou encore de cultures énergétiques (maïs d'ensilage, herbe, betterave, ...) (Aile *et al.*, 2006) (**filière agricole à la ferme ou centralisée**),
 - o les boues urbaines : boues primaires (issues du décanteur primaire), secondaires (issues du traitement biologique) ou mixtes (mélange des boues primaires et secondaires) (Solagro, 2001) (**filière boues de stations d'épuration urbaines**),
 - o les déchets ménagers : biodéchets collectés sélectivement, ou ordures ménagères triées en usine avant l'introduction de la matière organique dans le digesteur (**filière ordures ménagères**),
 - o les effluents industriels : déchets de papeteries, de laiteries, d'abattoirs et d'industries de transformation des corps gras, d'industries agro-alimentaires (**filière industrielle**).
- la méthanisation spontanée en installations de stockage de déchets non dangereux (**filière de production de biogaz en ISDND**),

i) La méthanisation en digesteur

La méthanisation peut donc être conduite dans des digesteurs, enceintes confinées à l'intérieur desquelles les réactions de fermentation sont optimisées et contrôlées.

Le digesteur, encore appelé fermenteur, méthaniseur ou bioréacteur anaérobie est généralement constitué d'une cuve fermée, étanche à l'air et de préférence isolée thermiquement de l'extérieur dans laquelle différents microorganismes se côtoient pour dégrader chimiquement et biologiquement les substrats organiques et produire du biogaz. Le digesteur reste à l'abri de la lumière afin d'éviter la formation de microorganismes photosynthétiques.

a) Température de digestion

Trois plages de dégradation sont à distinguer en fonction de la température de développement des microorganismes présents dans le digesteur (Moletta, 2002) :

- psychrophile : 15-25°C,
- mésophile : 25-45°C,
- thermophile : 45-65°C.

De manière générale, plus la température est haute, plus le procédé est rapide, mais plus il est difficile à contrôler et plus il nécessite d'utiliser le biogaz produit pour maintenir la température. Ce sont les **digesteurs mésophiles** qui sont les plus utilisés (proche de 38°C) en particulier en France (INERIS, 2008).

A noter que cette température de digestion peut notamment avoir un impact sur la persistance des microorganismes pathogènes (cf. section 10/).

b) Digestion par voie sèche ou par voie humide

En fonction de la teneur en matières sèches des substrats, les procédés de digestion peuvent se dérouler par voie humide, ou voie sèche.

- Pour des substrats dont le pourcentage de matière sèche est inférieur à 15% (effluents dits liquides, boues, lisiers, ...), les procédés de digestion utilisés sont à voie humide.

Comme les procédés par voie humide ont tendance à conduire à une stratification dans le digesteur avec, au-dessus, les flottants et, en dessous, les lourds, des agitations sont alors mises en place (cf. Figure I).

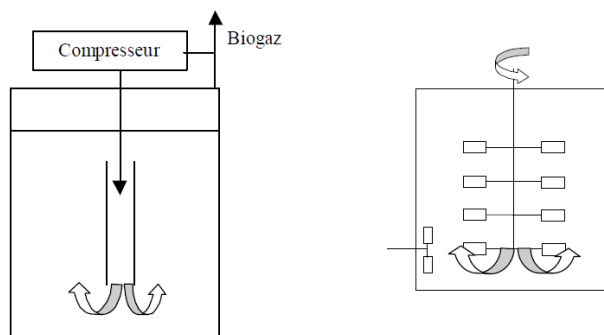


Figure I : Exemple de systèmes d'agitation utilisés en voie humide (Moletta, 2003).

Dans ce type de système, les matières en fermentation à l'intérieur du digesteur sont sous forme d'un liquide maintenu le plus homogène possible grâce à un **brassage (système dit infiniment mélangé)**. Le système de brassage dépend du type de matière organique utilisée. Il est le plus souvent mécanique : à hélices ou à pales, fixe ou mobile, mais il peut également être pneumatique par injection de biogaz ou hydraulique avec une boucle de recirculation du digestat. Par ailleurs, l'orientation principale du brassage peut être horizontale, verticale ou oblique.

Les digesteurs infiniment mélangés sont actuellement les plus répandus en France.

A noter qu'ils peuvent également être utilisés pour les déchets solides nécessitant alors une dilution.

- Dans le cas où le taux de matière sèche est supérieur à 15% environ le recours aux procédés à voie sèche est réalisé.

Ils nécessitent un volume moindre (substrat concentré) mais une bonne maîtrise de la circulation de la matière (pompage et brassage). Ces procédés sont principalement mis en place dans des réacteurs à caractère piston. Le digesteur à piston est un système cylindrique où le substrat avance sous l'influence de pales (cf. Figure J), toutes les particules avançant à la même vitesse. L'agitation est assurée par un brassage mécanique et/ou une recirculation sous pression du biogaz produit.

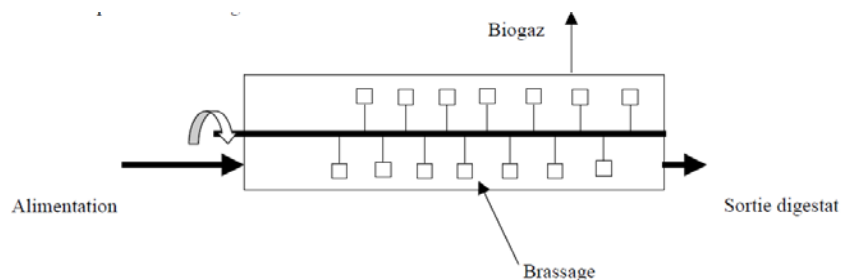


Figure J : Digesteur à piston (Moletta, 2003)

Notamment pour des substrats ayant des teneurs en matières sèches relativement élevées (> 40 %), des procédés en batch se développent. Le batch est rempli puis fermé une fois plein. Les déchets solides sont aspergés avec un percolat chauffé riche en microorganismes qui sert d'inoculum pour l'ensemencement. Une fois la méthanisation terminée (plusieurs semaines), le digestat est extrait en une seule fois. Ce type de système peut nécessiter la mise en place de plusieurs méthaniseurs en parallèle afin d'obtenir un traitement régulier du substrat et une production stable de biogaz.

Ce type de procédé tendrait à se développer dans les années à venir pour les substrats de type fumier.

c) Mode d'alimentation des digesteurs

Il faut distinguer trois procédés, fonction des teneurs en matières sèches (INERIS, 2008) :

- en fonctionnement discontinu ;
- en fonctionnement semi discontinu ;
- en fonctionnement continu.

La prédominance de fumiers dans les exploitations agricoles françaises peut entraîner la mise en place de système de méthanisation en voie sèche avec **fonctionnement discontinu**⁵⁸. Le digesteur est chargé en une seule fois, scellé, puis, vidé quand la production du biogaz est terminée. Les temps de séjour sont de 2 à 3 mois (Moletta, 2003). Au cours de cette période, la production de biogaz passe par un maximum puis décroît.

Pour le fonctionnement en **mode semi-continu**, une fraction du digestat est retirée périodiquement pour être remplacé par du substrat frais. Le temps de séjour moyen varie de 10 à 40 jours pour des températures de 30-35°C (INERIS, 2008). Dans ce cas, la digestion anaérobie est conduite en deux réacteurs distincts comme le montre la Figure K :

- le premier réacteur est appelé digesteur : il est le siège de la production du biogaz ;
- le second réacteur est appelé post-digesteur : la production de biogaz continue, mais dans une moindre mesure. Il a un rôle de stockage et de traitement du biogaz. Le digestat circule du digesteur au post digesteur avant d'être éventuellement stocké dans une enceinte spécifique.

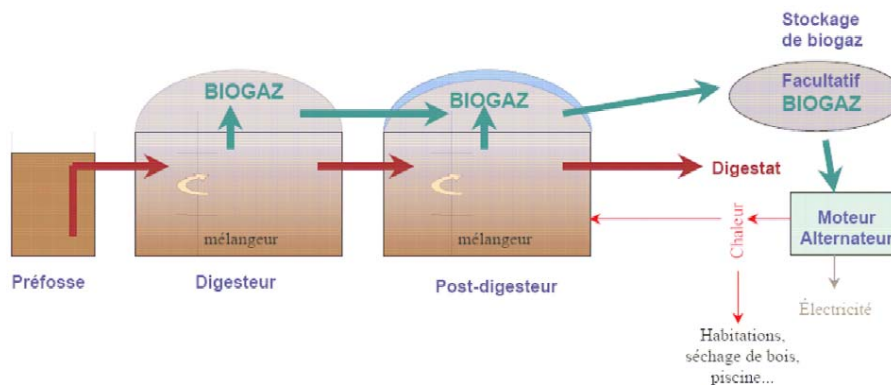


Figure K : Schéma simplifié d'un bioréacteur semi-continu (d'après INERIS, 2008)

Les **digesteurs en fonctionnement continu** sont utilisés pour des effluents essentiellement liquides (déchets pompables avec une teneur en matières sèches < 10-15 % en masse). Le réacteur est alimenté en continu, ce qui implique une bonne maîtrise des matériaux utilisés qui sont sollicités en permanence.

d) Cultures bactériennes libres ou fixées

La plupart des digesteurs sont utilisés avec des cultures bactériennes libres (digesteurs à cultures libres).

Afin d'augmenter la concentration bactérienne, il est possible de favoriser la fixation des microorganismes sur des supports (digesteurs à cultures fixées). Ces procédés s'appliquent à des effluents peu chargés en matières en suspension. Les supports peuvent être des matériaux de toute nature (plastique, céramique, matériaux fibreux,...). Il faut distinguer les systèmes à :

- **lits fixés** si le support est statique. Le support va être colonisé par des biofilms anaérobies,
- **lits fluidisés** ou circulants, lorsque le support est mis en suspension par la circulation de l'effluent,

⁵⁸ Procédé mis au point dans les années 1930 par Ducellier et Isman pour les substrats non pompables et disponibles de façon irrégulière

- **UASB** (Upflow Anaerobic Sludge Blanket ou lit de boues anaérobies à flux ascendant), en utilisant la capacité d'autofloculation de la biomasse dans le réacteur et la sédimentation des granules, les floccs bactériens sont utilisés ainsi comme supports bactériens (cf. Figure L).

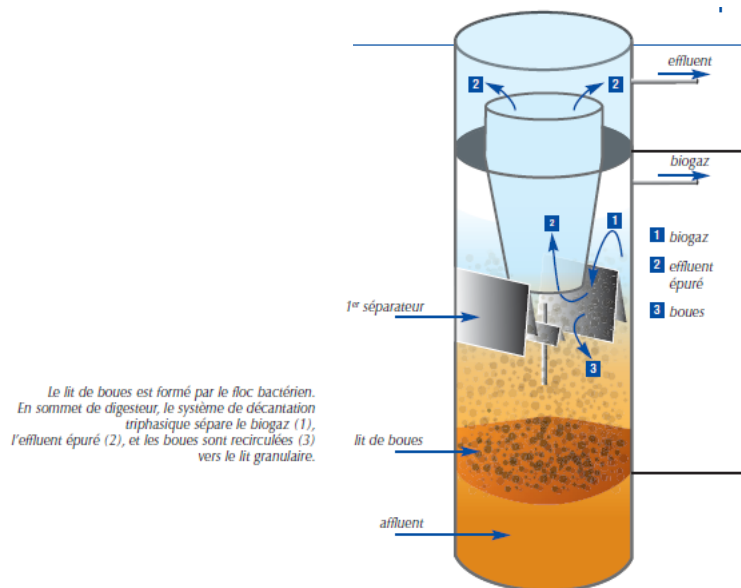


Figure L : Méthaniseur à lit de boues granulaires (UASB) (Agence de l'Eau Adour-Garonne, 2006).

- **IC** (Internal Recirculation) utilise également la biomasse granulaire comme support de bactéries, avec en outre une recirculation interne permettant d'améliorer le rendement de dégradation (cf. Figure M).

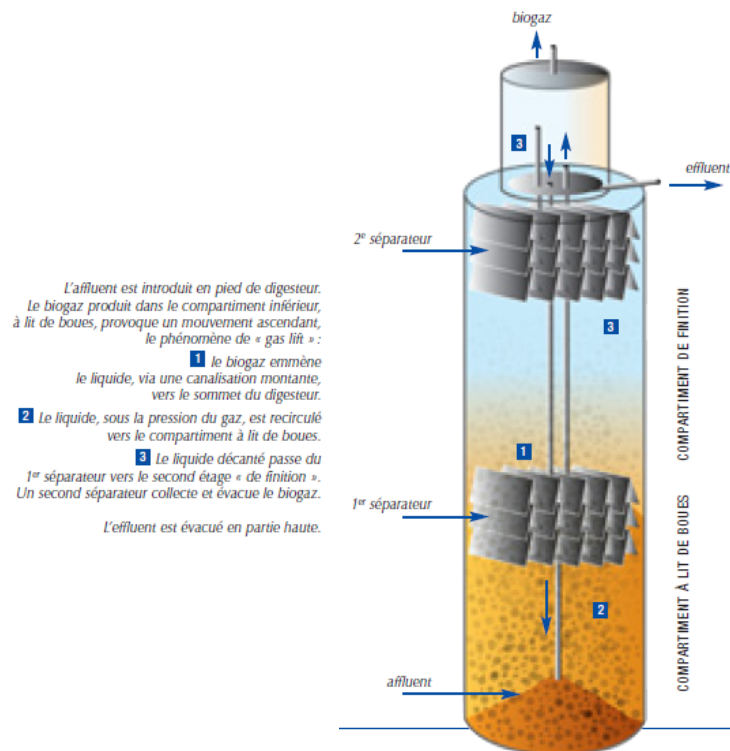


Figure M : Méthaniseur à lit de boues granulaires avec re-circulation interne (IC) (Agence de l'Eau Adour-Garonne, 2006).

e) Autres étapes/équipements des filières procédant à la méthanisation en digesteur

En amont et aval de la méthanisation en digesteur proprement dite, différentes étapes de préparation des matières entrantes et traitement et stockage du biogaz et digestat sont réalisées et peuvent varier en fonction des filières et unités.

Ainsi de manière générale, des broyeurs, des tamiseurs, des presses, des pré-fosses de mélange, des procédés de chauffage ou d'hygiénisation de matières entrantes peuvent être employés. Certaines matières entrantes (certains sous-produits animaux) exigent effectivement qu'une hygiénisation préalable soit réalisée en vue de réduire les agents pathogènes.

Du fait des possibles fluctuations de production, le biogaz doit pouvoir être stocké dans des réservoirs (gazomètres). Ceux-ci sont conçus pour faire face à ces fluctuations. Les réservoirs à gaz peuvent être installés au-dessus du réacteur ou à côté (par exemple sous forme de sphère) et sont composés en général d'une, deux, voire trois membranes en plastique souple (PVC), résistants aux rayons ultraviolet (UV) et aux phénomènes climatiques (Boyer *et al.*, 2009). Dans certaine configuration, le couvercle du digesteur peut être en béton, ou acier.

Avant sa valorisation, le biogaz peut subir une déshumidification, une épuration de l'H₂S, des siloxanes, du CO₂ et d'autres composés traces au moyen de différents procédés (dessiccateur, filtre à presse, charbon actif, injection de chlorure ferrique, ...). Ces traitements dépendent notamment de la valorisation choisie.

ii) La méthanisation spontanée en ISDND

Préambule : seules les installations de stockage des déchets non dangereux (ex : centre de classe 2 - CET 2) sont concernées par la production de biogaz. Les autres installations de stockage acceptent des déchets dangereux peu réactifs ou stabilisés pour les ex CET 1 ou, inertes (ex : gravats) pour les ex CET 3, ceux-ci ne produisant donc pas de biogaz (déchets non fermentescibles).

Du fait de la présence de déchets biodégradables stockés dans les ISDND et du passage de conditions aérobies à des conditions anaérobies (lors du tassement des déchets et à la fermeture des alvéoles), du biogaz est produit de manière spontanée par fermentation méthanique dans ces centres.

a) Fonctionnement d'une ISDND, phases de vie

De façon générale, une ISDND est divisée en casiers (volumes délimités par une digue stable et étanche), hydrauliquement indépendants les uns des autres. Le fond et le flanc des casiers sont équipés d'une barrière passive très peu perméable, surmontée d'une géomembrane en PEHD étanche, puis d'une couche de drainage. Les lixiviats produits par la percolation de l'eau de pluie à travers les déchets stockés sont intégralement collectés en fond de casier par le réseau de drainage, et sont dirigés en un point bas d'où ils sont pompés ou évacués gravitairement pour être traités par une installation interne ou externe. Pour limiter les entrées d'eaux pluviales dans les casiers, des fossés placés autour de ceux-ci détournent les eaux avant leur contact avec le déchet. Lorsque la cote finale est atteinte, une couverture finale est mise en place, afin de limiter les entrées d'eau et maîtriser les éventuels émissions diffuses de biogaz.

Le biogaz produit par chaque casier est capté via un réseau de dégazage (puits ou drains), pour être détruit par combustion en torchère, ou valorisé.

Pour information, des auteurs ont identifié cinq phases de vie d'une décharge (Polhand, 1985 ; Chian, 1985 cités par INVS *et al.*, 2004) :

- Phase 1 – Phase initiale ou de latence :
 - remplissage des déchets et accumulation de l'humidité ;
 - début du tassement et fermeture des alvéoles ;
 - détection des premiers changements des différents paramètres.

- Phase 2 – Phase de transition :
 - passage des conditions aérobies aux conditions anaérobies ; l'accepteur d'électrons passe petit-à-petit de l'oxygène aux nitrates et sulfates (le milieu devient réducteur) ;
 - des teneurs mesurables en métabolites intermédiaires tels les AGV (acides gras volatils) commencent à apparaître dans les éluats ;
 - une tendance nette à des conditions réductrices est observable.

- Phase 3 – Phase de formation acide :
 - les AGV deviennent prépondérants ainsi que la fermentation des constituants biodégradables des éluats ;
 - une diminution du pH se produit avec une mobilisation et une possible complexation des espèces métalliques ;
 - la consommation de l'azote et du phosphore pour la croissance de la biomasse augmente ;
 - l'hydrogène peut être détecté et affecter la nature et le type des produits intermédiaires formés.

- Phase 4 – Phase de fermentation méthanique :
 - les produits intermédiaires apparus pendant la phase acide sont transformés en méthane et en dioxyde de carbone ;
 - remontée du pH à une valeur élevée contrôlée par la capacité tampon du système carbonate ;
 - le potentiel d'oxydo-réduction est au plus bas et les nutriments continuent à être consommés ;
 - la complexation et la précipitation des métaux se poursuivent ;
 - la charge organique des éluats décroît beaucoup et la production de gaz augmente proportionnellement.

- Phase 5 – Phase de maturation finale :
 - stabilisation des constituants organiques disponibles dans les déchets et solubilisés dans les éluats ;
 - les concentrations en nutriments deviennent limitantes ;
 - la production de biogaz chute puis cesse ;
 - l'oxygène et les espèces oxydées réapparaissent lentement avec une augmentation du potentiel d'oxydo-réduction ;
 - les matières organiques plus résistantes à la biodégradation sont converties très lentement en molécules telles les acides humiques et acides fulviques capables de complexer et solubiliser les métaux lourds.

La productivité en biogaz est très variable. Elle dépend des caractéristiques des déchets enfouis, de la profondeur de l'alvéole, de son aération, de la hauteur d'eau dans la décharge, de la température, etc...La majeure partie du biogaz est produite pendant les dix premières années. Toutefois, la production peut s'étendre sur plusieurs décennies. On estime généralement la production de biogaz de 120 à 150 m³ par tonne d'ordures ménagères (INVS *et al.*, 2004 et http://www.ademe.fr/midi-pyrenees/a_2_19.html, consulté le 25/01/12) ; elle peut varier de 100 à 400 m³ et la production maximale se fait dans les casiers humides contenant des déchets fermentescibles bien broyés et compactés, en l'absence de déchets toxiques pour les micro-organismes. Le potentiel méthanogène des déchets varie en fonction de leur composition (OM, DIB, boues, etc) et de leur degré de maturation. Une estimation théorique de la production de biogaz est réalisée pour chaque exploitation (obligation réglementaire). Cette estimation permet de dimensionner les unités de destruction (torchère) et de valorisation.

b) Captage du biogaz produit en ISDND

Le biogaz produit doit être collecté (arrêté du 9 septembre 1997⁵⁹).

Deux grandes options en matière de captage sont distinguées (Ademe, 2007) :

⁵⁹ Arrêté du 09/09/97 relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux.

- le captage à l'avancement,
- le captage après le remplissage de l'alvéole.

D'après l'INVS *et al.* (2004), actuellement, les puits de captage sont de plus en plus, montés au fur et à mesure de l'élévation du niveau des déchets (permettant le dégazage à l'avancement) et non, comme ce fut le cas longtemps, par forage dans l'alvéole comblée.

Différentes techniques de drainage et captage du biogaz existent et sont résumés dans le Tableau G. Pour plus de détail, le lecteur est invité à se reporter au guide ADEME (2007) (à partir de la page 60).

Tableau G : Systèmes de drainage / captage du biogaz en ISDND (d'après Ademe, 2007).

Drainage	Captage à l'avancement		Captage sur alvéole terminée
Vertical	Puits gaz constitué de buses bétons empilées	Colonne drainante gaz en galet, montée avec ou sans tube de formage	Puits gaz foré
Horizontal	Tranchée drainante indépendante		Tranchée drainante indépendante
Vertical + horizontal	Tranchée drainante ou drain connecté à un puits vertical		
Périphérique	Drain ou tranchée drainante indépendante aux parois latérales		Tranchée drainante indépendante en surface

Aujourd'hui les modes d'exploitation d'une ISDND permettent d'optimiser la production et le captage du biogaz. Dans les procédures d'exploitation, de nombreux contrôles et suivis réguliers (température, taux de CH₄ et d'O₂, pression, débit notamment) dans les conduites de captage permettent de régler chaque puits afin d'avoir la meilleure production de biogaz possible (en débit et en taux de CH₄).

Un taux de captage de 100% est cependant difficile à obtenir. Il y a donc forcément potentiellement des émissions diffuses et des sources d'impacts environnementaux et sanitaires possibles, même dans les ISDND les plus modernes et les plus respectueuses de la réglementation. Suivant les techniques utilisées, 60 à 80 % du biogaz est récupéré. Pour les centres de stockage les plus récents, après couverture étanche des alvéoles, il est possible d'atteindre des taux de récupération supérieurs à 80 % (INERIS, 2006).

Quand le choix de la valorisation n'est pas pris par l'exploitant, le biogaz est traité par combustion par l'intermédiaire d'une torchère (INVS *et al.*, 2004).

c) Vers une gestion en mode bioréacteur

Depuis quelques années, en ISDND, on s'oriente aussi vers de la méthanisation maîtrisée : on parle de **gestion en mode bioréacteur**.

La gestion en bioréacteur de casiers d'ISDND est une technique innovante qui consiste à accélérer les processus de dégradation et de stabilisation des déchets dans une enceinte confinée (ADEME et FNADE, 2007). Cette accélération est opérée par la maîtrise des principaux facteurs d'optimisation de l'activité microbienne : humidité, température, nature du déchet. Au sens strict, la gestion en bioréacteur n'est donc pas uniquement liée à la recirculation des lixiviats. Toutefois, le fait qu'un taux d'humidité suffisant soit indispensable à une bonne dégradation de la matière organique amène souvent en pratique à considérer le bioréacteur comme synonyme de recirculation des lixiviats.

Une autre voie d'accélération des processus de stabilisation consiste en l'injection d'air dans le massif de déchets pour favoriser les mécanismes de dégradation aérobie. Cette voie est à l'état de recherche uniquement. La technique anaérobie par recirculation reste toutefois à ce jour mieux maîtrisée.

A noter que par rapport à une ISD classique, la gestion en bioréacteur implique un investissement supplémentaire et rend nécessaire la maîtrise technique de la recirculation.

A priori aucune donnée n'est disponible sur le nombre d'installations fonctionnant en mode bioréacteur, à ce jour.

Bien que peu de différences majeures soient visibles entre un bioréacteur et une ISDND classique, les expériences de transformation en bioréacteur d'un casier exploité traditionnellement peuvent rencontrer des contraintes. Aussi une conception spécifique avant l'exploitation permet de s'affranchir de ces difficultés (ADEME et FNADE, 2007).

Les points principaux de différenciation peuvent concerner :

- la préparation des déchets avant enfouissement dans un objectif de recherche d'optimisation des caractéristiques des déchets (teneur en matière organique, humidité, granulométrie,...). Cette étape préalable à la mise en stock des déchets peut faire appel à la mise en œuvre d'unités fonctionnelles supplémentaires (broyage, préparation de charge,...) qui dicteront également leurs impératifs sur les conditions d'exploitation.
- la recirculation des lixiviats dotée d'éléments fonctionnels spécifiques : centrale de réinjection, réseau de corps drainants, instrumentation et suivi particulier, bassin de stockage,
- les éléments classiques de gestion des lixiviats et du biogaz : drainage, collecteurs, bassins, traitement, couvertures qui peuvent, selon les configurations, demander à être adaptées (protection renforcée, surdimensionnement) ou plus ciblées.

Impact sur les émissions non contrôlées de biogaz :

Le bioréacteur limite le risque à long terme d'émissions de biogaz puisqu'en accélérant la dégradation, il concentre la durée d'émission de biogaz pendant la phase de pleine efficacité des dispositifs de confinement. Ce mode de gestion est la pratique de stockage qui présente le plus faible taux d'émission atmosphérique de gaz à effet de serre. On considère que la performance globale est supérieure à 90 % de captage des gaz produits. Ces performances sont illustrées par la Figure N, issue des résultats d'une campagne de mesures des émissions diffuses au travers de la couverture du site de La Vergne. La cellule bioréacteur (à gauche), avec une géomembrane en couverture, ne comporte pas de zones d'émissions contrairement à la cellule témoin (à droite), qui est recouverte d'une couverture traditionnelle (ADEME et FNADE, 2007).

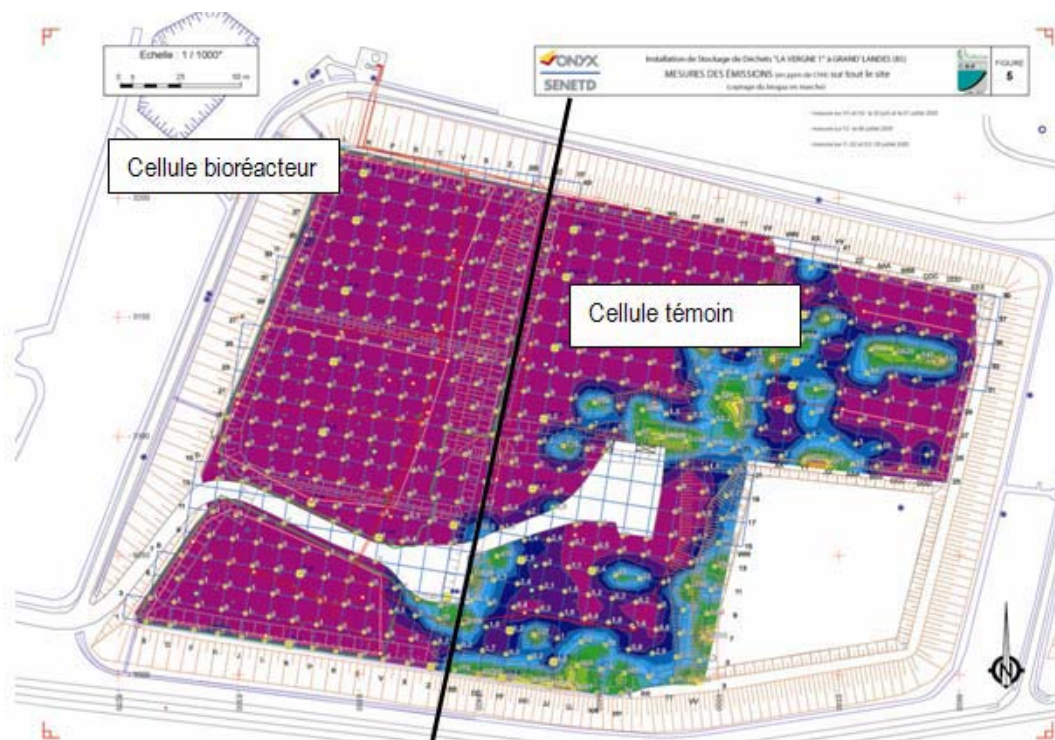


Figure N : Cartographie des mesures d'émission de biogaz sur un site ISDND : comparaison de cellule témoin et de cellule gérée en mode bioréacteur (ADEME et FNADE, 2007).

Impact sur la valorisation du biogaz :

La finalité du bioréacteur n'est pas la valorisation du biogaz. Cependant, du fait de l'impact possible de la recirculation sur la collecte du biogaz, les installations de traitement/valorisation, quand elles existent, devront posséder une certaine souplesse.

On pourra ainsi concevoir des systèmes de traitement/valorisation en combinant les différentes techniques disponibles à ce jour (micro-turbines, petits moteurs,...). Les torchères restent indispensables sur tous les sites (ADEME et FNADE, 2007).

1.5 La valorisation du biogaz

Préambule : les informations sont principalement issues du rapport de l'ATEE, Club Biogaz (2011) relatif à l'état des lieux de la filière méthanisation en France. Pour plus de détails, le lecteur pourra s'y reporter. Des informations complémentaires peuvent aussi notamment être recherchées dans le rapport RECORD (2009) relatif aux « Freins et développements de la filière biogaz : les besoins en recherche et développement ».

Actuellement, cinq voies principales de valorisation du biogaz peuvent être envisagées et sont présentées dans la Figure O (partie 3. Valorisation) (ATEE, Club biogaz, 2011) :

- la production de chaleur seule,
- la production d'électricité seule,
- la cogénération,
- la transformation en biométhane carburant,
- l'injection en réseau de gaz naturel.

La trigénération (production d'énergie thermique, de froid et d'électricité) commence également à se développer (<http://www.verdesis.net/valorisation/cogeneration-et-trigeneration.html> ; consulté le 20/02/2012).

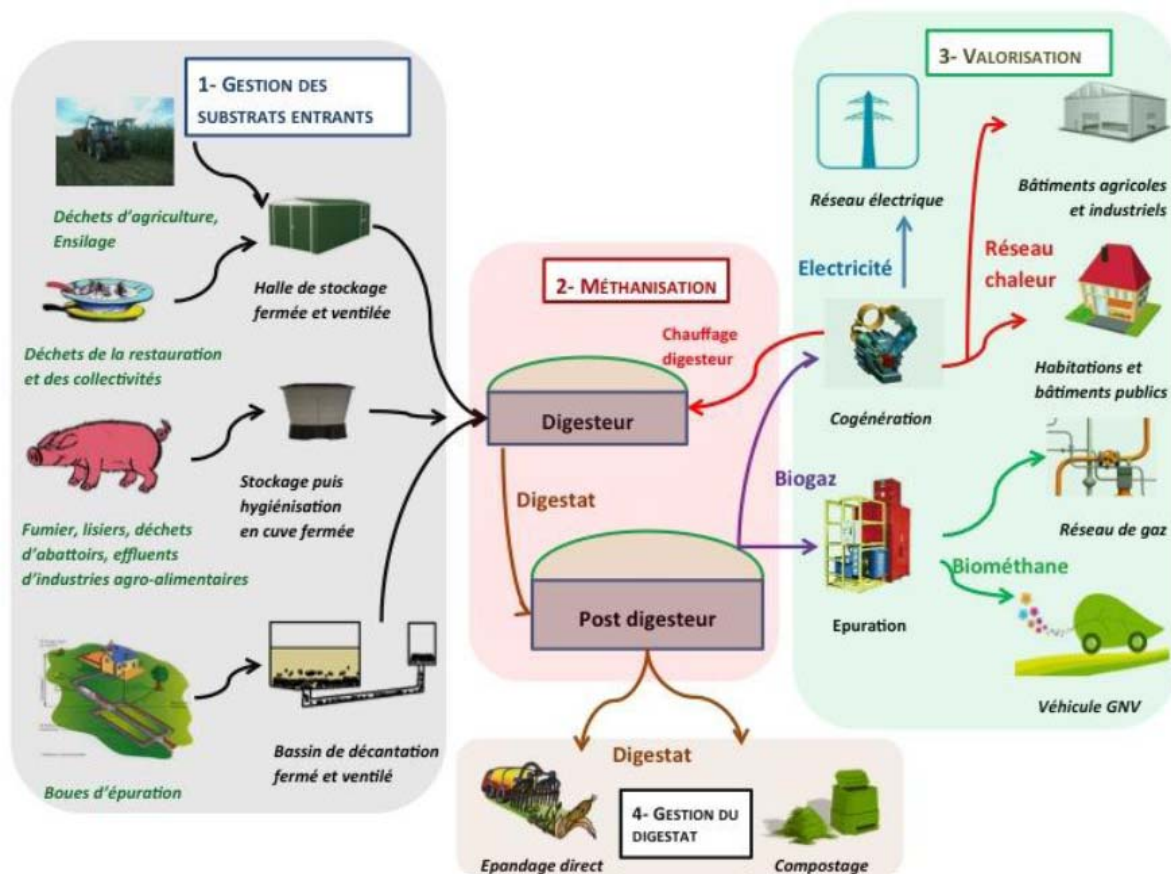


Figure O. Schéma général des installations de méthanisation (ATEE, Club Biogaz, 2011).

En fonction de sa valorisation, le biogaz devra être plus ou moins épuré et répondre à certaines exigences en vue d'assurer la protection des équipements et /ou de la santé et l'environnement.

Dans le secteur des stations d'épuration urbaines et industrielles (où l'objectif recherché est principalement l'abattement de la charge organique et la réduction des volumes de boues), la

valorisation énergétique (coûteuse) n'est pas systématiquement recherchée (ATEE, Club Biogaz, 2011). Le biogaz est souvent alors torché.

Dans le secteur des ISDND où du biogaz est produit du fait du stockage des déchets, celui-ci ne peut pas ou n'est pas non plus toujours valorisé. Il doit alors aussi être torché.

En 2008, d'après l'étude ADEME (2010), 60 % du biogaz produit en France (méthanisation et ISDND) était valorisé, le reste était torché. *A priori* aucune donnée plus récente n'est disponible, mais il est probable que la part de biogaz valorisé ait augmenté et augmente chaque année du fait notamment des objectifs des Grenelles de l'environnement et des incitations à la valorisation énergétique.

La **valorisation en chaleur seule** a été longtemps l'unique mode de valorisation du biogaz. Une chaudière brûle le biogaz, parfois mélangé à du fioul ou du gaz naturel, en produisant de l'eau chaude ou de la vapeur d'eau, utilisées pour chauffer le digesteur et/ou les effluents. Cette voie est d'un point de vue environnemental intéressante (diminution du besoin en énergies fossiles pour la production de chaleur) lorsque celle-ci peut être utilisée sur le site, par des industriels ou locaux de travail et d'habitation voisins (ATEE, Club Biogaz, 2011).

La **valorisation en électricité seule** est mise en œuvre au niveau des sites n'ayant aucun moyen de valoriser la chaleur, notamment les décharges (ISDND). Un moteur à gaz (moteur à explosion) ou une turbine à gaz pour les installations de très grande puissance, produit du mouvement mécanique transformé en électricité par un alternateur. L'électricité est vendue à EDF via un contrat d'obligation d'achat d'une durée de 15 ans. Dans ces systèmes, entre 65 et 80 % de l'énergie sont cependant perdus sous forme de chaleur.

La valorisation du biogaz en électricité a été favorisée depuis 2006, par l'obligation d'achat par EDF de l'électricité produite grâce au biogaz à un tarif défini par l'Arrêté du 10 juillet 2006, pour les projets avant mai 2011 et l'Arrêté du 19 mai 2011 pour tous les nouveaux projets.

La **cogénération** est la production conjointe de chaleur et d'électricité à partir du biogaz. Le module de cogénération est constitué d'un moteur qui entraîne un alternateur – générateur de courant électrique. Un groupe de cogénération possède un rendement électrique de 35 % et, la récupération de la chaleur permet d'atteindre un rendement global de 85 % si toute la chaleur produite est utilisée. La chaleur est récupérée grâce à des échangeurs au niveau du circuit de refroidissement, et éventuellement au niveau des fumées. Les mêmes moteurs que pour l'électricité seule sont utilisés (gaz ou dual-fuel) (Club Biogaz, 2011). A noter que dans un souci d'efficacité énergétique, le tarif d'achat de l'électricité produite est fonction de la valorisation de la chaleur.

La cogénération est sans doute la principale voie de valorisation actuelle tout secteur confondu.

La **valorisation en biométhane carburant** nécessite un traitement de tous les composants du biogaz, de telle manière qu'il soit comparable au gaz naturel. Le biométhane doit alors être stocké, pour alimenter des véhicules roulant au GNV (Gaz Naturel Véhicule). Ce mode de valorisation nécessite encore de lourds investissements : en 2011, seul 4 sites en France l'utilisent (Club Biogaz, 2011).

A noter que cette voie de valorisation est plus répandue dans d'autres pays tels que l'Allemagne, la Suède, les Etats Unis, ... (Ingersoll, 2010).

L'**injection du biogaz dans le réseau de gaz naturel** n'était jusqu'en 2008 pas possible en France, en l'absence d'une évaluation des risques sanitaires associés. L'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (AFSSET) a donné son feu vert, le 29 octobre 2008, en considérant qu'il n'y avait pas de risque sanitaire spécifique pour certains types de biogaz épurés (c'est-à-dire issus de certaines matières entrantes) comparativement au gaz naturel. Les textes réglementaires précisant le nouveau dispositif de soutien à la méthanisation des déchets par l'injection de biogaz dans les réseaux de gaz naturel sont parus au Journal officiel du 22 novembre 2011 (décrets 2011-1594 ; 2011-1595 ; 2011-1596 ; 2011-1597). Ce mode de valorisation nécessite un traitement complet du biogaz afin qu'il respecte les prescriptions techniques des opérateurs de réseau de gaz naturel. Celles-ci peuvent notamment être consultées en ligne à l'adresse suivante : <http://www.injectionbiomethane.fr/construire-votre-projet/2-1-faisabilite/2-1-considerations-generales.html> (consulté le 15 mars 2013). Les principaux inconvénients de cette voie de valorisation sont un lourd investissement et une demande suffisante en gaz naturel dans la zone desservie par le réseau (Club Biogaz, 2011). Il est cependant probable que de nombreux projets d'injections pourront voir le jour dans les prochaines années en France.

1.6 La valorisation des digestats

Après méthanisation en digesteurs (hors ISDND donc), des digestats résiduels sont produits. Ceux-ci peuvent être valorisés en agriculture pour leur valeur fertilisante :

- soit par épandage direct dans le cadre de plan d'épandage et sous réserve de respecter les seuils définis dans certains cas (ex : réglementation régissant les plans d'épandages des déchets de boues - arrêté du 8 janvier 1998),
- soit après compostage.

En France, sans traitement additionnel les digestats sont considérés comme des déchets et non des produits (Hahn et Hoffstede, 2010).

Pour rentrer dans une logique produit, ils doivent être compostés et peuvent ainsi être :

- o soit homologués,
- o soit normalisés s'ils répondent aux normes qui peuvent s'appliquer, à savoir (cf. Figure P):
 - la NF U 44-051 : Amendements organiques
 - la NF U 44-095 : Composts contenant des matières d'intérêt agronomique, issues du traitement des eaux.

Ces normes imposent des seuils limites pour certains micropolluants (éléments traces métalliques - ETM ; hydrocarbures aromatiques polycycliques - HAP et polychlorobiphényles – PCB) et des microorganismes indicateurs de contamination ou pathogènes.

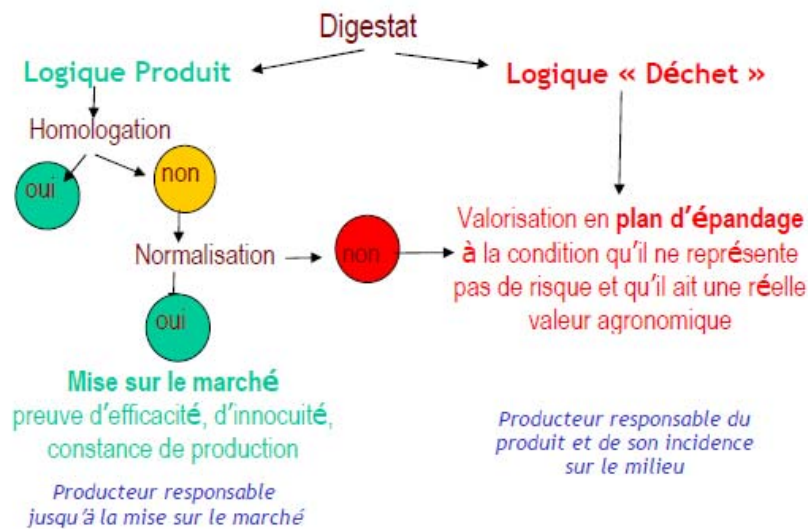


Figure P : Voies de valorisation du digestat (Apeisa, 2007).

Annexe 2 : Réglementation liée aux filières de production de biogaz

La réglementation relative à la production et à la distribution du biogaz utilise les sources de droit internationales, droit communautaire (Union Européenne) et droit français. Les sources réglementaires applicables sont fonction d'un nombre important de paramètres : matières entrantes, tonnage utilisé et quantités de biogaz produit, modes de transformation, taille et forme juridique de l'installation, modes de transports et de valorisation...

1.7 Réglementation sanitaire

La réglementation sanitaire encadre essentiellement la valorisation des sous-produits animaux (SPA).

i) Réglementation Cadre

Règlement (CE) N°1069/2009 du parlement Européen et du conseil du 21 octobre 2009 établissant des règles sanitaires applicables, à compter du 4 mars 2011, aux sous-produits animaux et produits dérivés non destinés à la consommation humaine.

Si l'installation biogaz traite des **sous-produits animaux** (lisier, matières stercoraires, c'est-à-dire qui ont rapport aux excréments, parties d'animaux abattus propres à la consommation humaine) le règlement 1069/2009 s'applique. Ce texte fixe des règles sanitaires relatives aux matières entrantes, classées sous 3 catégories de sous-produits animaux, et à l'installation elle-même. Il impose la mise en place d'un agrément sanitaire, précisant les exigences en matière d'hygiène et de traitements de ces SPA pour la conversion en biogaz.

Dans le cadre des activités agricoles de méthanisation et de compostage, les catégories de matières pouvant être utilisées sont :

- **les matières de catégorie 3**, qui ne présentent pas de risque sanitaire et comprennent notamment des parties d'animaux abattus propres à la consommation humaine et les anciennes denrées alimentaires d'origine animale mais non destinées à celle-ci pour des raisons commerciales. Ces matières peuvent être converties en compost ou biogaz, après pasteurisation à 70°C pendant 60 min puis stabilisation
- **les matières de catégorie 2**, qui comprennent essentiellement les sous-produits animaux présentant un risque plus important pour la santé publique (produits contenant des résidus de médicaments vétérinaires, lisiers, produits de collecte des eaux résiduaires...), sous réserve de stérilisation à 133°C pendant 20 min sous 3 bars et après le marquage permanent des matières finales (il existe des exceptions pour le lisier, l'appareil digestif et de son contenu, le lait, les produits à base de lait, le colostrum, les œufs et des produits à base d'œufs, si l'autorité compétente estime qu'il n'y a pas de risque de propagation d'une quelconque maladie grave transmissible).

Les matières de la catégorie 1, quant à elle, présentent un risque important pour la santé publique (risque d'EST, MRS, risque de substance interdite ...). Ces matières doivent être collectées, transportées et identifiées sans retard et sont détruites par incinération ou par mise en décharge après transformation et marquage. Ces matières ne peuvent être utilisées dans les filières de méthanisation.

A partir de ce règlement, les activités des établissements en charge de sous-produits animaux et des produits qui en sont dérivés doivent être identifiées sous trois régimes différents définis dans un arrêté d'application paru en décembre 2011.

ii) Arrêté d'Application

L'Arrêté du 08/12/2011 établissant des règles sanitaires applicables aux sous-produits animaux et produits dérivés en application du règlement (CE) N°1069/2009 et du règlement (UE) n°142/2011 fixe, pour les établissements en charge de sous-produits animaux et des produits qui en sont dérivés, les règles relatives à l'enregistrement, l'agrément et l'autorisation des établissements.

2.1 Etablissements soumis à ENREGISTREMENT ou AUTORISATION

Le régime d'enregistrement ne concerne que les exploitations agricoles qui détiennent, élèvent ou soignent des animaux producteurs de denrées destinées à la consommation humaine, tout comme le régime de l'autorisation à titre dérogatoire, qui ne concerne pas l'utilisation de sous-produits animaux et produits dérivés dans le cadre des unités de méthanisations ou compostage. Ainsi, les modalités spécifiques à ces régimes ne seront pas développées dans la suite de ce document.

2.2 Etablissements soumis à AGREMENT SANITAIRE

L'agrément sanitaire est obligatoire pour les établissements compostant ou produisant du biogaz à partir de sous-produits animaux. Les établissements ou usines doivent être agréés par les autorités compétentes lors qu'elles effectuent des activités de conversion de sous-produits animaux et/ou produits dérivés en biogaz ou en compost ainsi que l'entreposage de sous-produits animaux.

Cet agrément est délivré par le préfet sous certaines conditions dont la présentation, auprès de la Direction départementale de la cohésion sociale et de la protection des populations (DDCSPP), du dossier comprenant le plan de maîtrise sanitaire, notamment fondé sur les principes de l'HACCP (Hazard Analysis Critical Control Point =Analyse des dangers – points critiques pour leur maîtrise).

C'est lors de cette étape que la première démarche d'identification des risques est effectuée lors de la constitution du dossier de demande d'agrément au titre du règlement (CE) n°1069/2009. La liste complète de l'annexe II de l'arrêté du 08/12/2011 précise les éléments à fournir pour la constitution de ce dossier.

Quelques éléments constitutifs de ce dossier, concernant des éléments clés en matière de prévention des risques professionnels sont repris ci-dessous :

- Description des activités de l'établissement

La description détaillée d'un **point de vue sanitaire** de l'ensemble des locaux, de l'équipement et du matériel utilisé ainsi que les **conditions de fonctionnement** (dont notamment les circuits de matières, et le cas échéant, des produits transformés ou traités ainsi que des procédés utilisés).

- Le plan de maîtrise sanitaire :

Le plan de maîtrise sanitaire décrit les mesures prises par l'établissement pour assurer l'hygiène et la sécurité sanitaire de ses productions vis-à-vis des dangers biologiques, physiques et chimiques.

Il comprend les éléments nécessaires à la mise en place et les preuves de l'application :

- des bonnes pratiques d'hygiène ou pré requis et des procédures d'autocontrôle ;
- le cas échéant, du plan d'analyse des dangers et des points critiques pour leur maîtrise
- de la gestion des produits non conformes et de la traçabilité.

L'efficacité du **plan de maîtrise sanitaire** (PMS) repose sur la cohérence entre ses différents constituants, notamment les interactions BPH/HACCP, il comprend notamment :

- les documents relatifs aux **bonnes pratiques d'hygiène** (BPH) et aux procédures d'autocontrôle concernant : le personnel (niveau de qualification et plan de formation du personnel),
- les mesures d'hygiène préconisées avant, pendant et après la production (nettoyage, désinfection, instructions relatives à l'hygiène),
- les documents relatifs aux procédures fondées sur les principes de l'HACCP, tels que les documents relatifs à l'analyse des dangers biologiques, chimiques et physiques et mesures préventives associées,
- les éléments ayant permis la validation par l'autorité compétente des paramètres ou méthodes normés ou autres que normés (paramètres de compostage ou d'hygiénisation lors de conversion en biogaz)

1.8 Réglementation environnementale (loi ICPE)

1. Généralités

DEFINITION : Est considérée comme une installation classée pour l'environnement tout dépôt, chantier et d'une manière générale, toute installation exploitée ou détenue par une personne physique ou morale, publique ou privée qui peut présenter des dangers ou des inconvénients pour :

- la commodité du voisinage,
- la santé, la sécurité, la salubrité publiques,
- l'agriculture,
- la protection de la nature et de l'environnement,
- la conservation des sites et monuments.

Les installations classées font l'objet d'une réglementation spécifique au titre des articles du Titre Ier du Livre V du Code de l'environnement (parties législative et réglementaire). Les activités concernées sont définies par une nomenclature qui les classe sous le régime de déclaration, d'enregistrement ou d'autorisation en fonction de la gravité des dangers ou inconvénients qu'elles peuvent présenter.

○ **Les ICPE soumises à déclaration ou Classe D**

Sont soumises à déclaration les installations qui ne présentent pas de graves dangers ou inconvénients mais qui doivent néanmoins respecter des prescriptions générales édictées par le préfet.

○ **Les ICPE soumises à enregistrement ou classe E**

Sont soumises à enregistrement, les installations qui présentent des dangers ou inconvénients graves pour les intérêts mentionnés à l'article L 511-1 du Code de l'environnement, lorsque ces dangers et inconvénients peuvent, en principe, eu égard aux caractéristiques des installations et de leur impact potentiel, être prévenus par le respect de prescriptions générales édictées par le ministre chargé des installations classées.

○ **Les ICPE soumises à autorisation ou Classe A**

Sont soumises à autorisation préfectorale les installations qui présentent de graves dangers ou inconvénients pour l'environnement. L'autorisation n'est alors délivrée que si les dangers et inconvénients peuvent être prévenus par des mesures spécifiées dans l'arrêté préfectoral d'autorisation.

2. Nomenclature ICPE applicable aux filières de production, valorisation de biogaz

Les rubriques ICPE à prendre en compte dans le cas d'une installation de méthanisation sont liées aux spécificités techniques, à savoir le type de déchets traité, les quantités de matières entrantes, les quantités produites, le stockage éventuel du biogaz (gaz inflammable), sa combustion et son élimination en torchère.

A partir de la nomenclature des installations classées, il a été possible d'identifier les rubriques concernées. Elles sont les suivantes :

2.1 Substances inflammables – Rubrique : 14XX

1411 – Gazomètres et réservoirs de gaz comprimés renfermant des gaz inflammables

1413 – Installations de remplissage de réservoirs de gaz naturel ou biogaz, sous pression

2.2 Activités agricoles, animaux – Rubrique 21XX

2170 – Fabrication des engrais, amendements et supports de culture

Dans la pratique, les exploitations agricoles tendent à valoriser les résidus d'élevage sur site par des filières de méthanisation. Dans le cas des unités de méthanisation pouvant être considéré comme une annexe à un bâtiment d'élevage classé (ICPE élevage), la préfecture doit être informée de la création

d'une unité de méthanisation, considérée comme une modification « notable » de l'installation. L'administration éditera alors un arrêté complémentaire fixant de nouvelles prescriptions ou pourra exiger une nouvelle demande d'autorisation.

2.3 Déchets – Rubrique 27XX

Concernant les types de déchets susceptibles d'être traités, les rubriques suivantes sont à considérer :

2750 – Stations d'épuration collective d'eaux résiduaires industrielles

2751 – Station d'épuration collective de déjection animale

2752 – Station d'épuration mixte

Concernant les installations de production de biogaz à proprement dit les rubriques 2780, 2781, et 2791 sont concernées :

2780 – Installations de traitement aérobique (compostage ou stabilisation biologique) de déchets non dangereux ou de matière végétale brute, ayant le cas échéant subi une étape de méthanisation

2781 – Méthanisation de déchets non dangereux ou matières végétales brute, à l'exclusion des installations de méthanisation d'eaux usées ou de boues d'épuration urbaines lorsqu'elles sont méthanisées sur leur site de production. La nomenclature des installations classées de traitement biologique des déchets a été révisée en 2009, 2010 et 2011. La méthanisation relève depuis lors d'une rubrique ICPE unique subdivisée en 2 sous-rubriques en fonction de la nature des déchets traités.

- **2781-1.** Méthanisation de matières végétales, effluents d'élevage, matières stercoraires, lactosérum, déchets végétaux d'industries agroalimentaires.
- **2781-2.** Méthanisation d'autres déchets non dangereux (déchets ménagers, déchets animaux, boues d'épuration...)

Les seuils définissant les différents régimes administratifs ICPE sont basés sur la quantité de matière traitée en tonnes/jours, selon les conditions explicitées dans la Figure Q.

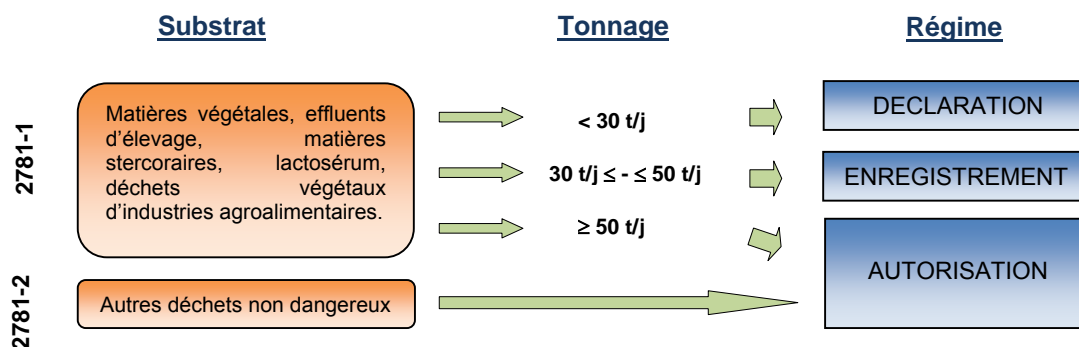


Figure Q : Schéma de classification ICPE appliquée aux installations de méthanisation – rubriques 2781.

Remarque relative au digestat :

En France sans traitement additionnel le digestat est considéré comme un déchet (Cf. §2.4.2), il est alors soumis à un plan d'épandage. Le contenu du plan d'épandage dépend du régime ICPE de l'installation et du type de matières entrantes.

Pour des installations soumises à déclaration ou enregistrement, le plan d'épandage comprend des analyses de la valeur agronomique des digestats et des sols, la tenue d'un cahier d'épandage annuel et d'un plan de fumure préalable (déclaration) ou prévisionnel annuel (enregistrement). Si des déchets animaux issus des industries agroalimentaires ou des boues urbaines sont digérés, la réglementation exige des analyses des digestats et de sol plus complètes ainsi qu'un bilan agronomique d'épandage annuel.

Si le digestat subit une phase de maturation par compostage, il peut selon sa composition (critères agronomiques et d'innocuité) satisfaire les prescriptions envisagées par la norme NFU 44-051 (avril 2006) et être alors considéré comme un amendement organique. Il existe également la norme NFU 44-095 pour les produits ayant pour origine le traitement des eaux (ex : digestats de bous de station d'épuration urbaine).

2791 – Installations de traitement de déchets non dangereux à l'exclusion des installations visées aux rubriques 2720,2760, 2771, 2780, 2781 et 2782

Concernant les ISDND, c'est la rubrique 2760-2 Installation de stockage de déchets non dangereux qui s'applique.

Les installations de stockage de déchets non dangereux sont des installations classées pour la protection de l'environnement et sont **soumises à autorisation préfectorale** dans tous les cas. Cette autorisation précise, entre autre, les capacités maximales et annuelles de l'installation, la durée de l'exploitation et les superficies de l'installation de la zone à exploiter et les prescriptions techniques requises.

Les installations de stockage de déchets non dangereux sont réglementées par l'arrêté ministériel du 9 septembre 1997, modifié en dernier lieu par l'arrêté du 12 mars 2012. Cet arrêté a été pris en transposition de la directive 1999/31/CE du 26 avril 1999 sur les décharges, pour sa partie relative au stockage de déchets non dangereux.

L'arrêté du 9 septembre 1997, précise que la production de biogaz doit faire l'objet d'une estimation théorique, tout comme la conception de l'installation de drainage, de collecte et de traitement du biogaz qui doit faire l'objet d'une étude et sera jointe au dossier de demande d'autorisation.

Le réseau de biogaz conçu doit être dimensionné de façon à capter de façon optimale le biogaz et à permettre son acheminement de préférence vers une installation de valorisation ou, à défaut, vers une installation de destruction par combustion. Ces installations de valorisation, de destruction ou de stockage du biogaz sont conçues et exploitées afin de limiter les nuisances, risques et pollutions dus à leur fonctionnement, par des analyses de la composition du biogaz capté dans son installation.

La mise en place d'une torchère peut être rendue obligatoire lorsque la valorisation du biogaz ne peut être assurée pour des raisons techniques (cas le plus fréquent) ou contractuelles (non valorisation sur une période prédéterminée).

2.4 Divers– Rubrique 29XX

2910 – Combustions – A l' exclusion des installations visées par les rubriques 2770 et 2771

La valorisation du biogaz peut s'envisager sous forme de chaleur, d'électricité ou d'une combinaison chaleur/électricité (cogénération). La combustion du biogaz entre dans le champ de la réglementation ICPE au titre de la rubrique 2910 B comme le précise la circulaire du 10 décembre 2003 relative aux installations de combustion utilisant du biogaz, ou 2910 C lorsque l'installation consomme exclusivement du biogaz provenant d'installation classée sous la rubrique 2781-1.

La classification des différents régimes administratifs ICPE est basée sur la typologie des combustibles consommés, du type régime des installations de production et de la puissance thermique de l'installation de combustion, selon les conditions explicitées dans la Figure .

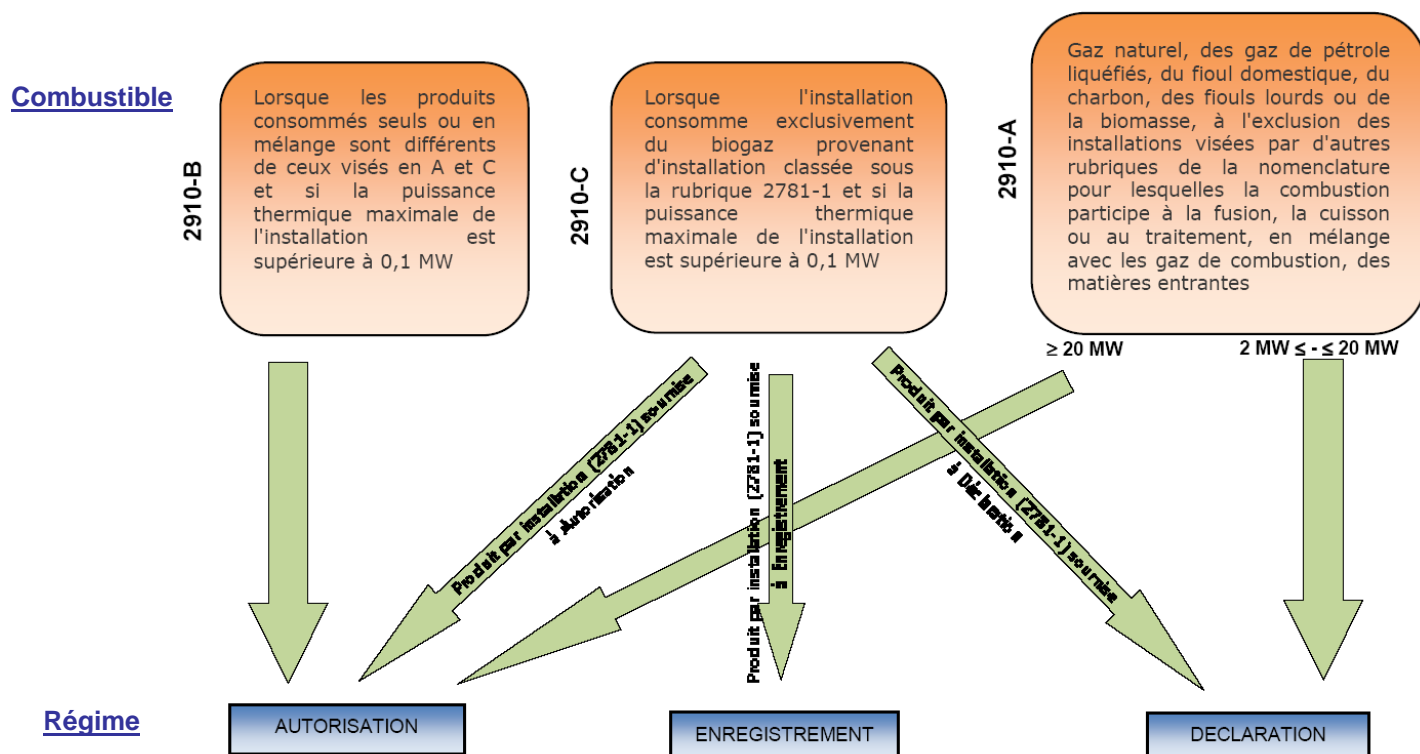


Figure R : Schéma de classification ICPE appliquée aux installations de combustion ⁶⁰

A noter la circulaire du 10 décembre 2003 qui précise les règles de classement et les prescriptions applicables aux installations de combustion utilisant du biogaz. Cette circulaire stipule que l'obligation de destruction en torchère du biogaz s'applique à l'ensemble des installations classées mettant en œuvre un procédé de méthanisation, lorsque la valorisation n'est pas possible ou que l'installation produit des quantités excédentaires par rapport à la capacité de l'installation de valorisation.

Dès lors il est nécessaire de considérer les éventuelles périodes de non valorisation du biogaz (arrêts techniques, entretien...) pour mettre en place les moyens de limiter les émanations de biogaz à l'atmosphère (approvisionnement du méthaniseur réduit voire arrêté pour limiter la production de biogaz, capacité de stockage supplémentaire...). Une chaudière peut également prendre le relais du moteur pour maintenir la température du digesteur, l'excédent de chaleur étant évacué vers les aérofrigoriférants du moteur. La présence d'une torchère n'est donc pas obligatoire et reste l'ultime moyen si aucune autre solution technique n'a pu être mise en place.

1.9 Autres textes à noter

La loi de modernisation agricole du 27 juillet 2010 affiche quatre objectifs :

- stabiliser le revenu des agriculteurs,
- renforcer la compétitivité de l'agriculture,

⁶⁰ La puissance thermique maximale est définie comme la quantité maximale de combustible, exprimée en PCI, susceptible d'être consommée par seconde. La biomasse au sens du A de la rubrique 2910 se présente à l'état naturel et n'est ni imprégnée ni revêtue d'une substance quelconque. Elle inclut le bois sous forme de morceaux bruts, d'écorces, de bois déchiquetés, de sciures, de poussières de ponçage ou de chutes issues de l'industrie du bois, de sa transformation ou de son artisanat

- mettre en place une véritable politique de l'alimentation
- lutter contre le « gaspillage » des terres agricoles.

L'article L311-1 du Code Rural, modifié par cette même loi, offre une extension à la notion d'activité agricole : la méthanisation devient une activité agricole.

Pour cela, il faut que le gérant soit un exploitant et qu'au moins 50% des matières soient issues de son exploitation ou de l'ensemble des exploitations, lorsque plusieurs exploitants constituent l'activité de méthanisation. Les agriculteurs peuvent ainsi revendre de l'énergie, gaz ou électricité, et en tirer un revenu complémentaire.

Concernant l'**obligation de tri à la source des bio-déchets**, à compter du 1er janvier 2012, les « gros producteurs » de déchets fermentescibles sont tenus de les faire traiter en vue de faciliter leur retour à la terre sous forme d'amendements organiques. Ces dispositions prévues par l'article 204 de la loi Grenelle II, font l'objet d'un décret et d'un arrêté.

Cette nouvelle réglementation pourrait intéresser les méthaniseurs car la méthanisation représente une voie de valorisation des bio-déchets.

L'article 31 de la loi n°2009-967 du 3 août 2009 dite « Grenelle I » prévoit de développer largement une **démarche de certification environnementale des exploitations agricoles**.

L'intérêt majeur pour la méthanisation réside dans le fait que cette certification environnementale donne une bonne image aux projets de méthanisation et permet de mettre hors de cause l'agriculteur en cas de pollution autour de l'unité. Cette certification est également un atout favorable au moment des enquêtes publiques. Le 21 juin 2011 sont ainsi parus au Journal Officiel trois textes réglementaires définissant cette certification environnementale :

- un décret précise la définition de la certification environnementale,
- un deuxième texte arrête le référentiel relatif à la certification environnementale des exploitations agricoles pour la certification de niveau 2,
- un troisième texte fixe les seuils de performance environnementale relatifs à cette certification et les indicateurs les mesurant pour le niveau 3.

Annexe 3 : Informations complémentaires relatives aux filières en digesteur.

i) La méthanisation des déchets ménagers

La France a été le premier pays à se lancer dans la méthanisation des déchets ménagers en 1988 à Amiens, et compte en 2011 (Amorce, 2011 et ATEE, Club Biogaz, 2011) :

- neuf installations de méthanisation de la fraction organique contenue dans les déchets ménagers, en fonctionnement. Six usines traitent des ordures ménagères résiduelles et trois traitent spécifiquement des biodéchets collectés séparément : Le Robert (Martinique), Calais et Lille métropole (Figure S). Leur capacité de traitement cumulée est de l'ordre de 720000 t/an.
- huit installations dont le marché de construction a été attribué, par exemples, Angers, Forbach, Vannes, Bourg en Bresse (Viriat), Pointe à Pitre (Guadeloupe).

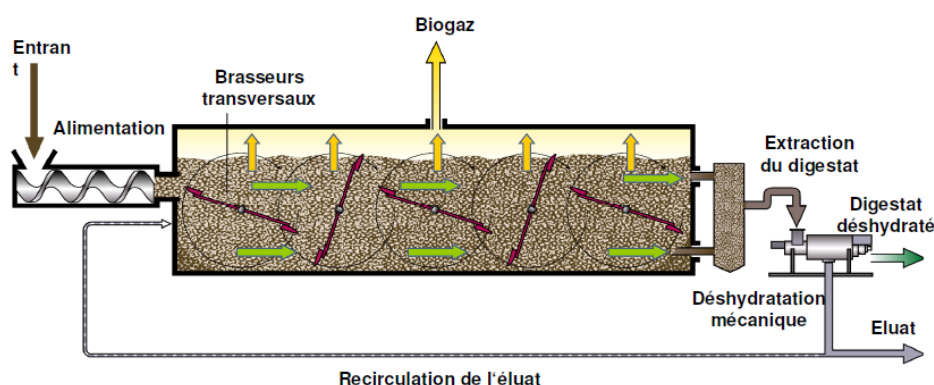


Figure S : Méthanisation des déchets ménagers fermentescibles : Exemple de la filière mise en place par Lille Métropole.

D'après la terminologie retenue par l'ADEME, la fraction « organique » ou « fermentescible » des ordures ménagères résiduelles (OMR) comprend :

- la partie « putrescible » des déchets, c'est-à-dire les « biodéchets », composés des déchets alimentaires, des produits alimentaires non consommés et des déchets de jardin : les déchets verts sont constitués de 50 % à 60 % d'eau et contiennent du bois alors que les déchets de cuisine peuvent contenir jusqu'à 80 % d'eau ;
- les papiers et cartons.

La fraction fermentescible peut être extraite des OMR de **deux manières** :

- soit à la source, par une collecte sélective auprès des habitants,
- soit après la collecte des ordures ménagères, par un tri mécanique.

Cette **phase de tri** est nécessaire pour isoler les différentes fractions contenues dans les déchets :

- fraction organique dirigée vers l'étape de méthanisation,
- fraction des métaux ferreux et non ferreux envoyée vers les filières de recyclage,
- fraction au pouvoir calorifique inférieur (PCI) élevé (plastiques, bois, textiles...) utilisable comme combustible,
- fraction résiduelle, le plus souvent éliminée en Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux.

Le tri réalisé s'appuie sur des techniques de séparation granulométrique (trommels), densimétrique (tables vibrantes), magnétique (roues aimantées ou à courant de Foucault), balistique, optique (FNADE, 2011).

D'autres opérations peuvent être menées sur la fraction organique avant introduction dans le digesteur telles que, le broyage et le mélange (Moletta, 2003).

D'après l'état des lieux réalisés en 2011 par l'association Amorce, les neuf installations du territoire fonctionnent en majorité par voie sèche (process VALORGA ou KOMPOGAS). Seule l'unité de Lille métropole a recours au process LINDE par voie humide (Amorce, 2011). Les digesteurs fonctionnent principalement en mode continu. La capacité de traitement en deux étapes reste minoritaire (Moletta, 2003).

Huit des neuf installations de méthanisation des ordures ménagères valorisent le biogaz produit par cogénération, dont une, qui dispose en plus d'une chaudière.

Le site de Lille métropole valorise également le biogaz produit sous forme de biométhane carburant, et a débuté en juillet 2011, les premières expérimentations d'injection dans le réseau de GrDF (communication personnelle, Mme LBOVITS-BRAVIN).

ii) La méthanisation « à la ferme »

Comme nous l'avons déjà souligné, de nombreux produits peuvent être utilisés en méthanisation pour produire de l'énergie. L'exploitation agricole est une usine de production de biomasse.

En 2011, 48 installations de traitements des déchets agricoles sont opérationnelles et 35 sont en cours de construction (Club Biogaz, 2011). Il est à noter qu'aucune installation n'est en fonctionnement en outre-mer. D'après l'Institut de l'élevage, en 2012, 135 installations dans le secteur agricole étaient en fonctionnement.

Une **préfosse** est souvent présente sur le site comme lieu d'alimentation du digesteur. Elle est souvent en béton et non couverte. Les matières premières ou substrats produits par l'installation ou amenés de l'extérieur sont stockés dans la préfosse avant introduction dans le digesteur :

- soit par pompage (pour les substrats liquides),
- ou par trémie et pompe hacheuse (pour les fumiers),
- ou une pompe à béton (pour les substrats solides).

Un premier brassage peut avoir lieu au niveau de cette préfosse.

Concernant le digesteur, la technologie la plus employée à l'heure actuelle pour la méthanisation de substrat agricole est le **système infiniment mélangé** avec agitation mécanique (Apesa, 2007 ; Club Biogaz, 2011). En général pour les substrats agricoles, l'orientation est de type « **silo vertical** » soit une cuve dont la hauteur est supérieure au diamètre de la circonférence (Apesa, 2007).

NB : Les autres systèmes de digestion sont peu développés pour la méthanisation agricole (à piston ou en série), notamment du fait de leur coût élevé. Ces systèmes sont plus adaptés pour le traitement de déchets industriels. Les procédés en batch par voie sèche semblent se développer pour les matrices de type fumier.

D'après l'état des lieux réalisé par le Club Biogaz (2011), seules deux installations valorisent le biogaz en chaudière sur le territoire. Les autres valorisent le biogaz produit grâce à la cogénération.

Outre la production de biogaz, la méthanisation agricole va engendrer la production d'un digestat particulièrement intéressant pour la valorisation comme amendement organique. La valeur fertilisante des effluents d'élevage méthanisés n'est pas affectée (la totalité de l'azote contenu dans le fumier ou le lisier est conservée lors de la digestion), et est même parfois améliorée. En effet, l'azote est présent sous forme d'azote organique dans les déjections fraîches et se retrouve sous forme d'ions ammonium dans les effluents. L'ammonium est une forme plus facilement assimilable par les plantes mais il est très volatile (RECORD, 2008). Le digestat est stocké dans un réservoir, soit à l'air libre, soit enterré.

Remarque : Les quantités et le potentiel méthanogène des substrats issus de la ferme sont en général insuffisants pour rentabiliser une installation. Il faut donc trouver des substrats extérieurs à l'exploitation, afin de réaliser une co-digestion. Ces co-substrats peuvent provenir :

- d'industries agro-alimentaires : déchets de légumes ou de fruits, petit lait, huiles, graisses,...
- de collectivités : tontes, feuilles, biodéchets des ménages, boues de station d'épuration,...
- de restaurateurs privés ou collectifs, de grandes et moyennes surfaces de distribution,...

Selon leur nature, les co-substrats liquides sont stockés dans une cuve ou une fosse et introduits par pompage.

iii) Les boues de station d'épuration

Les boues sont produites durant le traitement des eaux résiduaires urbaines (ou industrielles). Leurs caractéristiques dépendent de l'origine des eaux traitées (municipal, industriel, ...). Elles étaient jusqu'alors valorisées en agriculture (60% des boues), incinérées (20%) ou stockées en Centre de stockage (20%) (Bonnier, 2008). Cependant, ces débouchés sont remis en question actuellement notamment pour les risques environnementaux liés à la valorisation agricole et les coûts engendrés par l'incinération et le stockage en « décharge ».

La digestion anaérobie est utilisée pour la stabilisation et la réduction de la quantité de boues. En effet, celles-ci constituent le produit le plus couramment valorisé sous forme de biogaz (production annuelle française : 9 MT) (Record, 2009b). La digestion anaérobie s'applique sur les boues concentrées après le traitement primaire ou secondaire des eaux usées (Record, 2009b) comme le montre la Figure T. C'est une technologie très éprouvée en Europe, qui traite plus de 60% de sa production (soit près de 4,5 millions de tonnes de MS).

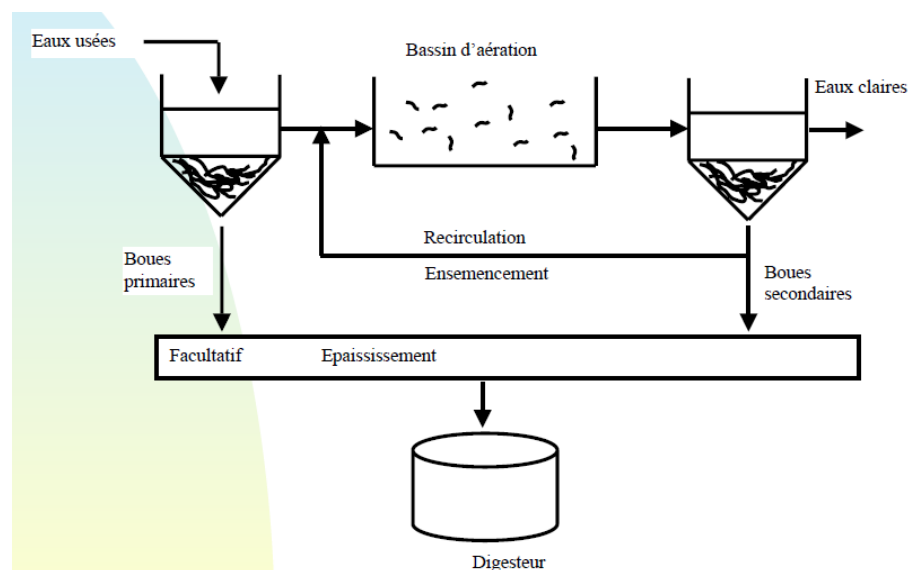


Figure T : Localisation de la digestion anaérobie dans la chaîne de traitement des boues (Chabrier, 2004).

Trois types de boues peuvent être traités par digestion anaérobie :

- les boues primaires issues de la décantation des eaux usées en tête de process. Ces boues sont les plus fermentescibles (Buffière *et al.*, 2007) ;
- les boues secondaires issues d'une étape de décantation située en aval des bassins d'aération. Celles-ci sont moins intéressantes d'un point de vue rendement énergétique ;
- les boues mixtes issues du mélange des deux précédents types.

La grande majorité des digesteurs travaillant en station d'épuration sont des systèmes à flux continu. Il existe quatre formes de digesteurs à boues en Europe se différenciant notamment selon le pays

d'origine. L'avantage réside principalement dans une plus grande souplesse et de moins grands besoins en stockage. De plus, la méthanisation étant un processus long, la durée de vidange / remplissage des cuves en mode discontinu sont souvent rédhibitoires (RECORD, 2009a). Une partie du biogaz et/ou des boues est re-circulée afin d'assurer le brassage des boues et leur chauffage. La digestion anaérobie des boues dure 3 à 4 semaines et entraîne une diminution de l'ordre de 60% de la matière organique entrante. A un tel temps de séjour, il n'est pas nécessaire de prévoir un recyclage de biomasse après séparation : la teneur en matières sèches est en effet de l'ordre de 20 à 30 g/L.

La méthanisation des boues de STEP offre plusieurs avantages :

- La réduction du volume de boues.
- L'**hygiénisation** du fait de la réduction des germes pathogènes. En régime mésophile, une grande partie des bactéries, virus et parasites sont détruits, généralement d'un facteur 10 à 100. En régime thermophile, le taux d'abattement est plus efficace pour des temps de séjour moindres (Bonnier, 2008).
- La **réduction des risques de toxicité** des éléments traces (piégeage des métaux sous une forme non disponible pour les organismes vivants) et une réduction des teneurs en contaminants organiques (hydrocarbures halogénés). (Bonnier, 2008).

Le devenir des boues digérées est soit l'incinération, soit l'épandage (présence de phosphore, calcium et azote), soit la mise en décharge (Record, 2003). D'après le Club biogaz (2011), les boues méthanisées sont compostées dans un certain nombre de cas (14 sur *a priori* 24 installations ayant répondu à l'enquête sur ce point).

Le biogaz est généralement valorisé sous forme de chaleur (88%) et d'électricité (6%) (ADEME, 2010). Il couvre ainsi partiellement les besoins énergétiques de la station. En effet, la chaleur est utilisée pour chauffer le digesteur, les locaux et parfois pour sécher les boues, et, l'électricité produite est consommée par la station. En 2008, près de 70 stations d'épuration pratiquaient la méthanisation en traitement complémentaire des boues, produisant 145 millions de m³ de biogaz (ADEME, 2010). Ces installations concernent en général les stations d'épuration de plus de 30.000 EH, étant donné les coûts d'investissement nécessaires.

iv) La méthanisation des effluents industriels

Le secteur industriel a été le premier à développer la méthanisation pour le traitement des effluents. Le nombre de méthaniseurs a augmenté significativement entre 1984 et 2001 mais, il a peu évolué depuis. Quatre-vingt installations ont été recensées en 2010, réparties en 3 sous-secteurs : (ATEE, Club Biogaz, 2011)

- Dans les industries agroalimentaires, les effluents sont plus ou moins chargés en matière organique et connaissent en général d'importantes variations de production (saisonnalité de l'activité). Les principaux secteurs concernés sont les suivants :
 - ▣ Les effluents riches en alcools : distilleries, caves vinicoles, brasseries,
 - ▣ Les effluents riches en sucres solubles : industries de transformation des fruits, boissons,
 - ▣ Les effluents riches en amidon : amidonnerie, industries de la conserve de légumes,
 - ▣ Les effluents issus de production animale : laiteries, fromageries, abattoirs.
- Dans les papeteries, l'intérêt de la méthanisation au-delà de la dépollution des effluents réside dans les besoins généralement importants en chaleur sur les unités de production ; de plus le fonctionnement de ces unités est généralement constant sur toute une année.
- Le secteur de la chimie est potentiellement producteur de molécules organiques dégradables par méthanisation (acide acétique, dérivés carbonés...).

Remarque : La méthanisation d'un effluent s'envisage à partir d'une concentration en DCO de 1 g/L à 1,5 g/L (Apeisa, 2007, AE AG, 2006).

Avant digestion, l'effluent va subir divers prétraitements afin d'optimiser la méthanisation en digesteur (séparation, acidification, neutralisation, régulation en nutriments).

Le choix de la technologie appliquée pour la digestion va dépendre avant tout des caractéristiques de l'effluent à traiter, les technologies à cultures fixées seront privilégiées pour les effluents peu chargés (Moletta, 2002). Des effluents chargés en matières en suspension (de 75 à 100 g MES /L) risqueront de poser des problèmes de colmatage. Pour ce type d'effluent, les procédés à cultures libres sont privilégiés. Les effluents sont brassés et mélangés en continu dans le digesteur.

NB : Les effluents peuvent être complétés de divers déchets organiques, et en particulier de graisses dont le pouvoir méthanogène est fort (issues par exemple d'abattoirs, ou du prétraitement des stations d'épuration).

Environ 70 % du biogaz produit sur site sont valorisés. Les trois quarts le sont sous forme d'énergie thermique utilisée sur site (chaudière) ou sont éliminés par torchère. Sur quelques autres (4 sur les 80 installations recensées), le biogaz est valorisé en électricité. Les pertes, liées aux rendements des équipements (chaudière, moteur) représentent un peu plus de 20 % de l'énergie primaire produite (AE AG, 2006). Le Tableau H présente le pourcentage de biogaz valorisé par rapport à la totalité produite (valorisé et torché).

Tableau H. Part de gaz valorisé dans le secteur industriel (ATEE, Club Biogaz, 2011).

Part d'énergie valorisée	Chimie	Lait et fromage	Papeterie
Minimum	80 %	84 %	48 %
Maximum	100 %	100 %	100 %
Moyenne	88 %	94 %	80 %
Taux de réponses à l'enquête	25 %	27 %	57 %

Annexe 4 : Discussion relative au cas particulier de la filière de valorisation en biométhane.

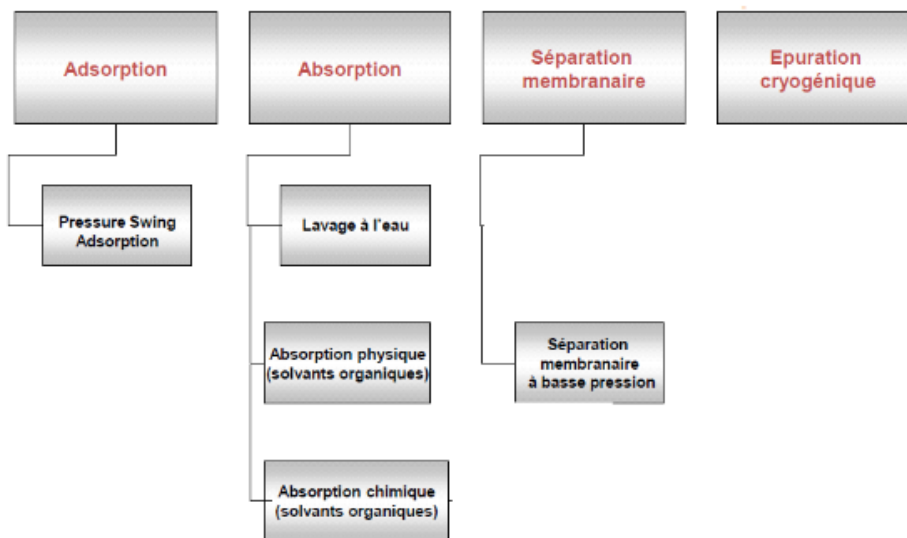
La production de biométhane dans les installations est une voie non représentée sur les diagrammes de fonctionnement des différentes filières concernées par cette étude. En effet, à ce jour le nombre de sites produisant du biométhane à des fins d'utilisation comme carburant ou à des fins d'injection dans le réseau de gaz naturel est faible en France (d'après une communication personnelle de Mme Olga Oliveti Selmi, GrDF, 3 sites produisent actuellement du biométhane : une décharge avec valorisation en carburant *in situ* et deux usines de traitement d'ordures ménagères l'injectant dans le réseau de gaz naturel).

Cependant, de nombreux projets d'injection de biométhane devraient pouvoir voir le jour dans les années à venir, suite notamment à la parution de l'arrêté fixant les conditions d'achat du biométhane fin 2011 (Arrêté du 23 novembre 2011 modifié par l'arrêté du 27 février 2013). Des informations dédiées à cette voie de valorisation peuvent être consultées sur le site « injection biométhane » (<http://www.injectionbiomethane.fr/accueil.html> ; consulté le 15 mars 2013).

D'après ENEA consulting (2012), il est attendu 150 nouvelles installations produisant du biométhane en France d'ici 2020.

Pour rappel le biométhane est du biogaz qui a été épuré pour être similaire à du gaz naturel (pouvoir calorifique, composition). L'épuration consiste à éliminer du biogaz brut les substances indésirables et les traces de polluants (ammoniaque, éléments soufrés, minéraux...) et augmenter sa teneur en méthane (par retrait du CO₂ et autres composés gazeux) pour produire un gaz comparable au gaz naturel (GrDF et ADEME, 2011).

Pour répondre aux prescriptions techniques, l'épuration doit être poussée. Les technologies existantes d'épuration font appel à des procédés d'adsorption, absorption, séparation membranaire et épuration cryogénique (cf. Figure U,) (GrDF et ADEME, 2011). Le piégeage sur charbon actif est aussi employé.



Source : Biogasmax, 2010

Figure U : Technologies d'épuration pour la production de biométhane, par familles de procédés (GrDF et ADEME, 2011).

Enfin, la dernière étape varie selon le schéma de valorisation. Un étage de compression peut permettre d'alimenter un réseau de pipelines ou une station de remplissage pour véhicules. Une autre option est la liquéfaction (dans une usine dédiée) ayant pour but de stocker et transporter le biométhane sous forme de Gaz Naturel Liquide.

Ainsi, s'agissant des dangers / points-critiques relatifs à la production de biométhane au niveau du local de valorisation :

- Concernant le point critique « incendie / explosion d'ATEX / biogaz » lié à la présence de méthane, il peut être considéré comme un peu plus élevé du fait de l'enrichissement réalisé. Les teneurs en CH₄ dans le biométhane doivent être supérieures à 96,5 % pour que le biogaz soit considéré similaire au gaz naturel (gaz H) (Solagro *et al.*, 2004). La plage d'explosivité (entre la LIE et la LSE) est légèrement plus large lorsque les teneurs en méthane sont plus importantes (*cf.* Tableau I),

Tableau I : LIE et LSE pour différentes compositions de biogaz en terme de mélange CH₄ – CO₂ (INERIS, 2008).

CH ₄ - CO ₂ (%v/%v)	LIE (%v/vCH ₄)	LSE (%v/vCH ₄)
100 - 0	5	15
60 - 40	5,1	12,4
55 - 45	5,1	11,9
50 - 50	5,3	11,4

- Concernant les « brûlures », « blessures /chutes », et « TMS », les points critiques sont *a priori* similaires à celles des autres voies de valorisation,
- Concernant les « intoxications à H₂S », « intoxications chroniques à d'autres substances chimiques qu'H₂S et NH₃ par inhalation de biogaz » et « risque microbiologique par inhalation de biogaz », après épuration, il est possible que ces dangers ne constituent plus des points critiques, hormis peut-être dans le cas de la maintenance des systèmes d'épuration (ex : changement du charbon actif avec risque de relargage),
- La compression du biogaz à des pressions plus élevées que dans les autres filières (pour celles-ci en général quelques millibars à centaines de millibars, pour alimenter les équipements de valorisation ou quelques dizaines de millibars à quelques bars pour réinjecter le biogaz sous pression dans le digesteur, pour le brassage – Solagro *et al.*, 2004) est nécessaire :
 - ▣ pour l'injecter sur le réseau de transport de gaz naturel (de 4 à 60 bars)
 - ▣ pour le stocker et l'utiliser comme carburant (respectivement 300 et 200 bars)

Des points critiques liés à cette étape peuvent donc être soulignés pour ces voies de valorisation (nuisances sonores, risques de rupture /fuite de canalisation / vannes / soudures dans les locaux confinés de compression avec risque de formation d'une ATEX notamment, blessures lors de la maintenance / risque d'explosion lié à excès de pression / risque d'incendie lié à l'élévation de la température / risque toxique notamment lors de la maintenance lié à l'utilisation de lubrifiant).

A noter que, sous 300 bars, le stockage de 1000 m³ de biogaz nécessite un volume de 3 000 litres de réservoirs ("capacité en eau") sous pression, soumis à législation sur les installations classées. Il est conseillé d'éliminer au préalable la vapeur d'eau et l'hydrogène sulfuré (Solgaro *et al.*, 2004).

- Pour être injecté dans le réseau de gaz naturel, le biométhane doit aussi être odorisé (de même que le gaz naturel). Des points critiques pourraient être identifiés à cette étape (risque de fuites, risque toxique lié au produit utilisé ?).