Etude sur les enjeux sanitaires liés à la méthanisation des effluents d'élevage et à l'épandage de digestats

Etude commanditée et financée par :	Réalisée avec la contribution de :	Avec le soutien de :
GRDF GAZ RÉSEAU DISTRIBUTION FRANCE	Seenovia Naturellement proche de l'Agriculteur	ADEME Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie ; Région Bretagne ; Région Pays de la Loire

Auteurs	Adeline Haumont[1], Alban Charrette[2], Florian Lafoux[1], Gregory Vrignaud[1] [1] : AILE, Association d'Initiatives Locales pour l'Energie et l'Environnement, 73 rue de St Brieuc, Rennes [2] : Seenovia, 141 boulevard des Loges, 53940 Saint-Berthevin
Version du rapport	**V2 – Juin 2019**
Diffusion	Restreinte

Remerciements

Les auteurs remercient le comité de relecture et de suivi et leurs contributions :

- Anne-Marie Pourcher et Céline Druilhe (IRSTEA de Rennes)
- Arnaud Diara (ATEE Club Biogaz)
- Jean-Yves Gardoni, Servane Lecollinet, François Trubert (AAMF)

Nous remercions également les entreprises sollicitées qui ont établi des devis et fournis des bilans énergétiques pour les solutions d'hygiénisation présentées : Atlantique Industrie, LG Conseil, SPIE Batignolles Energie.

Table des matières

I. CONTEXTE, OBJECTIFS ET METHODOLOGIE 4
A. Contexte et objectifs 4
B. Méthodologie 4
II. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA QUALITE SANITAIRE DES DIGESTATS 5
A. ELEMENTS GENERAUX 5
B. LES FACTEURS INFLUENÇANT LA SURVIE DES PATHOGENES 6
C. TAUX DE REDUCTION SUR CERTAINES BACTERIES INDICATRICES ET CERTAINS VIRUS 8
D. L'HYGIENISATION 18
III. ETAT DES LIEUX DES PRATIQUES D'EPANDAGE ET EVALUATIONS DES RISQUES SANITAIRES LIES A LA METHANISATION EN COLLECTIF 20
A. LA GESTION ACTUELLE DES EFFLUENTS D'ELEVAGE 20
B. RISQUES LIES A LA MISE EN COMMUN DE MATERIEL ET/OU A L'IMPORTATION D'EFFLUENTS 25
IV. APPLICATION DE LA REGLEMENTATION SUR LES SOUS-PRODUITS ANIMAUX AILLEURS EN EUROPE 27
A. RAPPELS DE LA REGLEMENTATION EUROPEENNE 27
B. AU ROYAUME-UNI 29
C. EN ALLEMAGNE 30
D. AU DANEMARK 32
E. AUX PAYS-BAS 34
A. EN BELGIQUE FLAMMANDE 35
V. MESURES DE BONNES PRATIQUES D'HYGIENE 37
A. LE SUIVI DES PATHOGENES 37
B. MAITRISER LES VECTEURS DE CONTAMINATION 38
C. REDUIRE LES PATHOGENES LORS DE LA DIGESTION 40
VI. EVALUATION TECHNICO-ECONOMIQUE DE METHODES D'HYGIENISATION DES EFFLUENTS D'ELEVAGE 42
A. HYGIENISATION A 70°C /60 MINUTES 42
B. SOLUTIONS ALTERNATIVES A L'HYGIENISATION DE TOUS LES EFFLUENTS 70°C – 1 HEURE 51
VII. CONCLUSION 53

I. CONTEXTE, OBJECTIFS ET METHODOLOGIE

A. Contexte et objectifs

La maîtrise du risque sanitaire est un enjeu important pour les sites centralisés de méthanisation et les projets collectifs en cours de développement. L'utilisation de sous-produits animaux (SPAn) tels que les effluents d'élevages est aujourd'hui encadrée par les règlements (CE)1069/2009 et (UE)142/2011. Ceux-ci prévoient des possibilités de dérogations, qui sont laissés à l'appréciation de l'autorité compétente nationale. En France, en l'absence d'une autorité à l'échelon national, ce sont les préfets qui remettent ces décisions, sur avis des DDCSPP. L'arrêté du 9 avril 2018 définit les conditions nationales pour lesquelles les sites peuvent demander une dérogation à l'obligation d'hygiénisation de certains SPAn. Certaines de ces possibilités de dérogations sont aujourd'hui remises en cause par des directives nationales données pour l'instruction des dossiers intégrant un certain volume d'effluents, ou un certain nombre d'exploitations agricoles.

Par ailleurs, en cas d'épizootie majeure, l'approvisionnement des sites centralisés qui ne sont pas équipés d'unités d'hygiénisation pourrait être menacé. Hors, l'hygiénisation en amont dans les conditions normalisées posent un certain nombre de défis technico-économiques, notamment dans le cas d'un approvisionnement avec un volume important de fumiers et peut remettre en cause la viabilité économique des installations ou des projets.

Enfin, l'hygiénisation des produits à risque n'est qu'un des moyens pour assurer la maîtrise du risque sanitaire lié à l'épandage des digestats et son efficacité contre certains pathogènes ayant la capacité à se sporuler n'est pas, à priori, démontrée. Enfin la méthanisation en collectif a été un des moyens retenus par certains pays à la fin des années 90 pour répondre aux enjeux sanitaires liés à la concentration d'élevages dans certaines Régions (cas des élevages porcins aux Danemark par exemple). De nombreuses unités impliquant un grand nombre d'élevages fonctionnent depuis plusieurs années en Europe, sans que l'on observe, à priori, de problèmes sanitaires. Se pose alors la question des meilleures stratégies techniques et organisationnelles à mettre en place, permettant le meilleur équilibre coût/bénéfices par rapport au risque sanitaire.

C'est pour répondre à ces différents enjeux que GRDF a commandité une étude afin d'appuyer la filière méthanisation sur les enjeux sanitaires.

B. Méthodologie

L'étude s'est déroulée entre novembre 2018 et mars 2019. Une première partie a consisté à la rédaction d'une synthèse bibliographique sur l'état des connaissances scientifiques sur le devenir des germes pathogènes lors de la méthanisation, et l'impact des conditions de digestion. Une cinquantaine d'articles ont été lus et synthétisés, en se basant sur les mots clés suivants : *Anaerobic digestion, Sanitation, Pathogenic bacteria, Indicators bacteria, Virus, Pathogens, Hygiene, Digestate*

A ces mots clés se sont ajoutés la recherche d'articles spécifiques sur les conditions de survie de pathogènes préoccupants : *African Swine Fever Virus, Mycobacterium Avium Paratuberculosis, Clostridium Botulinum, Influenza Aviaire High Pathogenic Virus*

L'analyse des pratiques actuelles d'épandage s'est appuyée sur l'expertise de conseil en élevage du groupe Seenovia, complétée par des entretiens téléphoniques.

Une seconde phase a consisté à la réalisation d'une enquête dans cinq Pays/Région de l'Union Européenne pour connaître les modalités d'application de la Règlementation SPAN pour les unités de méthanisation. Cette enquête s'est déroulée par mail et téléphone. La grille d'enquête se trouve en annexe.Pour l'analyse technico-économique, plusieurs fournisseurs de process ont été consultés afin d'obtenir des devis chiffrés et affiner les bilans énergétiques.

II. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA QUALITE SANITAIRE DES DIGESTATS

A. ELEMENTS GENERAUX

- Les sources documentaires

L'étude bibliographique a porté sur plusieurs types de sources :

- Des articles scientifiques publiés se basant sur des données issues d'analyses laboratoires (21 articles), d'échantillonnages sur des sites industriels (11 articles) ou de revues bibliographiques (4 articles)
- Des rapports de projets, articles techniques et revues bibliographiques non publiés (une quinzaine de sources)
- Des articles scientifiques et rapports techniques portant sur les conditions de survie de certains pathogènes (une dizaine de sources)

Nombre de publications	Echelle « industrielle »	Echelle laboratoire
Psychrophile (<25°)	1	5
Mésophile	9	16
Thermophile	4	11

Certains articles mêlent des essais laboratoires et des échantillonnages de sites industriels et plusieurs articles testent différents régimes de température.

Cette revue s'est intéressée plus particulièrement à la qualité sanitaire des digestats de méthanisation agricole mais certaines données sont également issues d'analyses de digestats issus de la digestion d'effluents urbains. Cette revue ne se veut pas exhaustive, mais doit dresser les principales tendances des connaissances scientifiques sur le sujet.

Les résultats exprimés dans les publications sont en fonction des objectifs recherchés par les auteurs : s'il s'agit de prouver une efficacité de traitement, un facteur de réduction (généralement exprimé en base logarithmique) est exprimé, pour un temps de séjour déterminé. Il est important de préciser que bien souvent les temps de séjour sont largement inférieurs aux réalités de terrain. Dans la plupart des publications qui traitent d'analyses à l'échelle laboratoire ou pilote, en mésophile les temps de séjour considérés sont de l'ordre d'une vingtaine de jours. Hors dans le contexte Français, les temps de séjour moyens pour les unités agricoles sont supérieurs à 50 jours[1]. Lorsqu'il s'agit de comparer des procédés entre eux ou comparer la résistance de pathogènes entre eux, les résultats peuvent être exprimés par leur T90 ou temps de réduction décimal (temps nécessaire pour diviser par 10 la population de départ).

- Les tendances

Depuis la revue bibliographique réalisée par Solagro en 1998 pour l'ADEME, de nombreuses publications ont vu le jour et l'état des connaissances s'est grandement amélioré. Il n'en demeure pas moins que les conclusions restent les mêmes : **globalement, la qualité sanitaire des digestats de méthanisation agricole est compatible avec l'épandage sur des terres agricoles, les concentrations de nombreux pathogènes diminuent, et restent identiques pour les pathogènes les plus résistants.**

[1] Enquête PRODIGE Chambres d'agriculture,2018 : temps de séjour moyen de 53 jours (digesteur seul) et 122 jours si on considère digesteur + post-digesteur

La revue bibliographique de Fröschle et al (2015) conclue notamment dans ce sens. **La digestion thermophile assure un plus fort abattement des pathogènes qu'en régime mésophile.**

Il est cependant difficile de généraliser, car l'impact de la digestion anaérobie dépend de nombreux facteurs, et diffère suivant les pathogènes. En conditions laboratoires, de nombreux pathogènes vont être réduits en moyenne d'un facteur 100 (Réduction de 2 log) mais certains pathogènes plus résistants ne seront pas réduits. Dans sa revue bibliographique, L. Sahlstrom (2003) rappelle la difficulté de trouver un bon indicateur qui donne une vision globale de la qualité sanitaire des digestats. Les entérocoques intestinaux (Enterococcus), autrefois appelés faecal streptococci (FS) sont des indicateurs pertinents d'après Bendixen (1998) et L.Sahlsröm (2003) , mais ne sont pertinents que pour des températures de traitement inférieures à 55°C (donc pas adapté dans le cas de d'hygiénisation).

- Les difficultés d'analyses

Il est à noter que les études de terrain rapportent essentiellement des données de prévalence (présence / absence des pathogènes) et non une quantification en raison de la lourdeur des méthodes de dénombrement. Par ailleurs, lorsque leur nombre est proche du seuil de détection de la méthode, les bactéries pathogènes peuvent ne pas être détectées dans les échantillons analysés. Ce biais analytique peut conduire à des interprétations erronées de la survie des pathogènes. Il est en effet possible que le pathogène, présent dans l'intrant et dans le digestat ne soit détecté que dans ce dernier, suggérant à tort, une éventuelle augmentation des concentrations au cours de la méthanisation.

Enfin, l'extrapolation de résultats de laboratoire à l'échelle réelle soulève certaines questions :

- si le microorganisme pathogène (virus, bactéries..) dont on cherche à étudier la survie au cours du procédé est ensemencé à forte concentration et qu'il n'y a pas de disparition totale, cela signifie-t-il que l'on retrouve fréquemment ce pathogène dans les digestats épandus dans les champs ?
- la survie des pathogènes inoculés en laboratoire est-elle la même que celle des souches indigènes ? Il semblerait que cela dépende des pathogènes. Les dynamiques de croissance en conditions laboratoire et à l'échelle industrielle pourrait être différentes selon Bonetta *et al.* (2014)
- avant de se retrouver sur les parcelles, le digestat est stocké (pendant parfois plusieurs mois) puis transporté et épandu. La qualité sanitaire du digestat épandu diffère-t-elle de celle du digestat issu du méthaniseur ?

B. LES FACTEURS INFLUENÇANT LA SURVIE DES PATHOGENES

Dans sa revue bibliographique, Sahlström (2003) met en avant la température, le temps de séjour, le pH, les acides gras volatiles (AGV), le process en continu ou batch, les espèces bactériennes, la disponibilité en nutriment et la quantité initiale de pathogènes comme des paramètres qui influencent la réduction des pathogènes pendant la digestion anaérobie.

- La Température et le temps de séjour

La température est souvent cité comme le paramètre le plus important influençant la survie des pathogènes, surtout pour les bactéries (Avery et al., 2014 ; Fröschle et al., 2005 ; Sahlstrom, 2003 ; Kearney et al., 1993, McKain and Hobson, 1987, Sorlini et al., 198,)

Les pathogènes d'origine intestinale sont souvent adaptés à des températures de l'ordre de 30 à 40 °C. Par conséquent des températures supérieures à 40 °C causent généralement une réduction du taux de croissance, une inhibition ou destruction des pathogènes. Ce qui n'est pas le cas pour des formes résistantes comme les spores qui sont capables de résister à des températures extrêmes. Plus le temps

de digestion est important plus les pathogènes sont exposés à ces conditions, ce qui intensifie l'effet d'inactivation. L'effet température est donc indissociable du temps de séjour.

La réduction des pathogènes est de ce fait plus importante dans la plage thermophile (>50°) qu'en mésophile. En régime mésophile, d'autres facteurs peuvent prendre le relais pour influer sur la réduction des pathogènes : la compétition microbienne, la composition du milieu environnant (Orzi et al., 2015 ; Smith et al., 2005)

Pour les bactéries, le temps de réduction décimal (T90) est de quelques jours. Une augmentation de 5 °C (passage de 30 à 35 °C) réduit considérablement cette durée. (Sahlstrom, 2003) De même, une augmentation sensible de la température en thermophile peut aussi avoir des impacts importants (Couturier et Galtier, 1998)

Pour la même température (35°C), Chen *et al.* (2012) ont mesuré les concentrations en *E.coli* et *Salmonella* sp. après 11, 16 et 25 jours et ont observé une augmentation du taux de réduction avec l'augmentation du temps de séjour, mais n'ont pas vu d'effet pour *Shigella* sp.

- La composition du milieu de digestion : pH, AGV et inhibiteurs

Certains composés intermédiaires de la digestion anaérobie ont également un effet hygiénisant et affectent la survie des bactéries : c'est le cas notamment des acides gras volatils, des alcools et des sulfites qui sont produits au cours de la digestion (Sahlström, 2003, Fröschle et al. 2005) Pendant la digestion, des sulfates (SO_4^{2-}) sont réduits en sulfure (S^{2-}) par les bactéries sulfato-réductrices. Le sulfure est toxique pour les rotavirus et plusieurs groupes bactériens.

Le pH a également un rôle : la plupart des bactéries sont en conditions favorables à pH neutre, soit la même gamme de pH recherchée pour la digestion anaérobie. Une augmentation de pH pourra jouer un rôle dans l'équilibre ammonium/ammoniaque, en faveur de l'ammoniaque, qui est toxique pour de nombreuses bactéries pathogènes mais aussi pour les bactéries méthanogènes. Le facteur pH ne sera donc pas de nature à jouer un rôle dans la maîtrise du risque sanitaire.

Une concentration importante en ions métalliques peut être néfaste pour les pathogènes (Chen et al, 2012). L'accumulation de sels, qui augmente la pression osmotique, inhibe la digestion et le développement des pathogènes par les mêmes mécanismes. Néanmoins plusieurs auteurs cités par Fröschle et al (2005) montrent une possible adaptation de la flore microbienne dans les digesteurs sur le long terme à certains inhibiteurs, qui seront néfastes aux pathogènes contenus dans les intrants.

- La compétition microbienne et l'accès aux nutriments

Le développement de la flore bactérienne dans les digesteurs peut « faire barrière » au développement d'organismes pathogènes notamment en utilisant le carbone, l'azote et les micro-nutriments qui ne seront plus disponibles pour le développement des pathogènes. **Ainsi, le moindre accès aux nutriments participe à la réduction des pathogènes** (Smith et al., 2005)

- La qualité initiale du substrat

Le taux de réduction sur les pathogènes dépend également de la concentration initiale dans les effluents (Horan et al., 2004). Plus les concentrations en pathogènes sont importantes, plus il y a des risques de retrouver des pathogènes en sortie. **La maîtrise de la qualité des intrants, liée à la bio-sécurité dans les élevages est donc un facteur clé de maîtrise du risque**. Si les mirco-organismes sont fixés sur des éléments grossiers, les matrices solides peuvent protéger les pathogènes des stress extérieurs et ceux-ci survivent plus longtemps dans les digesteurs. (Fröschle et al., 2005)

Dans une autre publication, on ne voit pas de corrélation claire entre ration entrante et concentration en bactéries entériques dans le digestat, mais la recherche n'a porté qu' à faire varier la proportion de biodéchets par rapport à du lisiers de porcs (Dennehy et al., 2018)

- Le type de procédé : batch vs infiniment mélangé, brassage

La digestion en infiniment mélangé a la particularité, d'une part d'assurer un renouvellement des nutriments réguliers par l'incorporation de substrats frais, d'autre part par le soutirage régulier de digestat. Il est donc difficile de s'assurer que tous les micro-organismes pathogènes subissent le temps de séjour annoncé. Il en résulte que globalement, **quel que soit le régime de température, la réduction des pathogènes est plus importante en batch qu'en infiniment mélangé.**

Les expérimentations de Kearney et al., (1993) montrent un T90 plus court pour la digestion en batch que semi-continue. Les revues bibliographiques de Salhstrom (2003) et de Couturier et Galtier (1998) concluent à partir des travaux de Kearney et al. et d'Olsen et al (1985) que la digestion en batch est plus efficace qu'en infiniment mélangé pour la réduction de pathogènes.

Les travaux de Jing *et al* (2018) ont regardé l'abattement des entérocoques en fonction du mélange de substrats entrants avec un procédé de type voie solide discontinue. Le mélange entrant était composé de biodéchets en quantité variable ajouté à du lisier de porcs ou de la boues anaérobies deshydratées. Un abattement >2 Log a été observé dès le 4ème jour, quel que soit le mélange entrant. La concentration en entérocoque diminue plus rapidement avec le mélange biodéchets + lisier de porcs.

Un brassage efficace, en assurant un développement de la flore bactérienne et archéenne impliquée dans la production de méthane permettra d'améliorer la performance de la digestion anaérobie vis-à-vis des pathogènes non sporulants.

- Le type de pathogène recherché

Enfin, les taux de réduction diffèrent selon les pathogènes, et selon leur résistance aux conditions de l'environnement. De nombreuses publications se sont intéressées à *E.coli* ou *Salmonella*, ainsi qu'aux entérocoques intestinaux, comme indicateurs d'efficacité de traitement. Certaines publications s'intéressent aux virus courants. De nombreux virus sont extrêmement sensibles à une augmentation de température, la digestion anérobie, même en mésophile aura donc un effet hygiénisant certain. Mais là encore, l'effet est variable suivant le type de virus.

C. TAUX DE REDUCTION SUR CERTAINES BACTERIES INDICATRICES ET CERTAINS VIRUS

- Bactéries végétatives

En mésophile

Pour les bactéries, le temps de réduction décimal (T90) est de quelques jours dans la plage mésophile pour les streptocoques et les coliformes fécaux. (Couturier et Galtier, 1998) Pour ces bactéries entériques, les taux de réduction sont en général de 1 à 2 log10 (Taux de réduction de 90% à 99%) (Sorlini et al., 1987)

Dans les expérimentations de Horan *et al*. (2004) qui ont porté sur la digestion de boues primaires urbaines, ils ont montré des taux de réduction de 1,66 Log10 pour *E.coli*, 2.2 pour *Listeria monocytogenes* et *Salmonella* Senftenberg, mais pas d'impact sur *Campylobacter jejuni*. Une étape de digestion secondaire permet d'augmenter les taux de réduction.

Coelho et al. (2018) ont étudié la qualité de digestats provenant de 11 unités de méthanisation de différentes typologies du Royaume Uni et d'Irlande fonctionnant en régime mésophile. Salmonella spp

n'a été retrouvée que dans un échantillon, à faible concentration (7CFU/10g poids frais). Les valeurs en *E.coli* sont faibles, seuls 2 échantillons prélevés sur les 11 digesteurs ont plus de 23 E.Coli/g. Leurs concentrations en *E. coli* sont de 460 et 2400 CFU/g . Cela confirme les analyses effectuées sur les digestats de méthanisation agricole en France lors des programmes DIVA (2015) et VALDIPRO (2014).

Bonetta et al (2014) rapportent des fréquences de détection moins importantes dans les échantillons de digestat que dans les effluents bruts pour *Salmonella*. *E. coli* et *Yersinia spp* n'ont pas été détectés. D'après cette étude, *Listeria monocytogenes* serait moins impactée par la digestion mésophile. Dans une autre étude menée par Orzi et al (2015) sur 8 sites de méthanisation agricole mésophile alimentés avec des lisiers bovins (2 sites) ou porcins (6 sites) la prévalence de *Salmonella*, de *L. monocytogenes* et de *Yersinia enterocolitatica* (comprise entre 25 et 37,5% dans les lisiers) n'a pas été affectée par la méthanisation mésophile.

L'expérimentation conduite par Smith et al., 2005 montre quant à elle que *E. coli* et *Salmonella spp*. sont peu réduits dans les gammes de températures mésophiles. La compétition microbienne et la restriction en substrat semblent être les paramètres primordiaux pour la réduction de la viabilité des bactéries entériques à ces températures.

Impact sur différentes bactéries en conditions mésophile

Bactérie	Conditions opératoires	Type d'effluent	Observation	Référence
E.coli et Entérocoques	35°C - 20 jours	Lisiers bovins	-1 à -2 log10	Sorlini et al. (1987)
E.coli et Entérocoques	Batch 35°– 50 jours	Lisiers bovin	-2 à -4 log10	
E.Coli	34-36°C – 12 jours	effluents urbains	- 1,66 log10	Horan et al., 2004
***Salmonella* Senftenberg**	34-36°C – 12 jours	effluents urbains	-2,23 log10	Horan et al., 2004
Listeria monocytogenes	34-36°C – 12 jours	effluents urbains	-2,23 log10	Horan et al., 2004
E.coli	35°C – 11 à 25 jours	effluents urbains	-1,9 à -3 log10	Chen et al., 2012
Salmonella sp.	35°C - 11 à 25 jours	effluents urbains	-1,9 à -3 log10	Chen et al., 2012
E.coli	Echelle réelle 28°C -24 jours	Lisiers bovins (majoritaire) + lisier porcs, volaille, déchets pommes de terre	-0.5 log10	Kearney et al., 1993a
Salmonella typhymurium			-0.7 log10	
Yersinia enterocolitica			-1.4 log10	
Listeria Monocytogenes				
Campilobacter jejuni			Stable	
Enterobacteriaceae	Echelle réelle 20 à 70 j – 39-42°C	Codigestion agricole	-1 à -2 log10	Orzi et al, 2015
Fecal coliform			-1 à -3 log10	
E.coli			-1 à -3 log10	
Clostridium perfringens			+1 à -1 log10	
E.coli O157 :H7	Echelle réelle Digestion 2 étapes	Co-digestion à base de lisier bovin	Absente	Bonetta et al., 2014
Salmonella			S= 20% / D= 8%	
Listeria monocytogenes			S= 20% / D= 8%	
Yersinia spp.			Absente	
Salmonella typhymurium	35°C	Biodéchets	T90 = 2.3 jours	EFSA, Thermorsuizen et al., 2003
Enteroccus faecalis	35°C	Lisier	T90 = 2 jours	EFSA, Bendixen et al., 1992
Enteroccus faecalis	35°C	Lisier de porcs + biodéchets	T90 = 74-93 jours	EFSA, Hoferer et al., 1992
E.coli	35°C	Lisier	T90 =1.8 jours	EFSA, Bendixen et al., 1992
Salmonella Dublin	35°C	Lisier	T90 =2.1 jours	EFSA, Bendixen et al., 1992
***Salmonella* Senftenberg**	35°C	Lisier de porcs + biodéchets	T90 =27.6 jours	EFSA, Hoferer et al., 1992
Salmonella typhymurium	35°C	Lisier	T90 =2.4 jours	EFSA, Bendixen et al., 1992
Staphylococcus aureus	35°C	Lisier	T90 =0.9 jours	EFSA, Bendixen et al., 1992

Impact sur différentes bactéries en conditions thermophile

Bactérie	Conditions opératoires	Type d'effluent	Observation	Référence
E.coli	55°C	Effluents urbains	T90 <8 min Plus détectable au bout d'1 heure	Smith et al, 2005
Salmonella	55°C	Effluents urbains	T90 <8 min Plus détectable au bout d'1 heure	
Faecal Streptococci **(enterocoques)**	Echelle réelle 56°C – 20 jours	Codigestion agricole	-3.2 log 10	Bendixen, 1996
	Echelle réelle 53°C – 14 jours		-5 log 10	
	Echelle réelle 53°C – 19 jours		-4.6 log 10	
	Echelle réelle 52°C – 15 jours		-3.6 log 10	
Fecal coliform	55°C – 20 jours	Effluents urbains	-5 log10	Scaglia et al., 2014
Fecal coliform	55°C – 60 jours		-5 log 10	
Salmonella sp.	55°C – 20 jours		Abs	
Salmonella sp.	55°C – 60 jours		Abs	
Total coliform	54°C – 20 jours	Effluents urbains	Plus détectable	Llioret et al, 2015
E. coli			Plus détectable	
C. perfringens spores			0 à -1 log10	
Salmonella spp.			Plus détectable	

En thermophile

En thermophile, le T90 est de quelques heures pour les streptocoques et coliformes fécaux.

Smith et al., 2005 observent une inactivation rapide des *E. coli* et des salmonelles lors d'une digestion anaérobie thermophile.

Scaglia et al., 2014 confirment que la digestion anaérobie thermophile conduit à de bonnes performances d'hygiénisation des boues.

Lloret et al., 2013 constatent que la digestion anaérobie thermophile élimine les *E. coli* et les salmonelles.

- Les bactéries sporulantes

Les Clostridium

Les bactéries ayant la capacité de sporuler, sont, en toute logique, résistantes à une augmentation de température, que ce soit à 35, 55 ou 70°C. C'est le cas notamment des *Clostridium*. De nombreuses bactéries appartenant au genre *Clostridium* sont impliquées dans la digestion anaérobie, ce sont des bactéries anaérobies, souvent anaérobies strictes, et il est donc normal, que si les substrats en contiennent, elles se retrouvent dans le digestat.

Dans la revue bibliographique de Fröschle et al. (2015) les résultats de plusieurs études portant sur les *Clostridium* sont rapportés. *Clostridium perfringens* est une bactérie ubiquiste, que l'on retrouve dans l'environnement et notamment dans les sols, de par sa capacité à sporuler. Bagge et al. (2005) ont retrouvé des concentrations identiques en *Clostridium perfringens* dans des unités de méthanisation avant et après digestion, en mésophilie aussi bien qu'en thermophilie.

Une étude conduite sur 154 unités de méthanisation en Allemagne a montré l'absence de *C. botulinum* dans les analyses. En revanche, *Clostridium difficile* a été détecté dans 44% des échantillons. Une analyse en laboratoire a également montré une durée de réduction décimale de *C. botulinum* de 34,6 jours à 38 °C et de 1 jour à 55 °C. Myllykoski *et al.* 2009 indiquent que le risque de retrouver *Clostridium botulinum* est lié à la présence de carcasses d'animaux morts dans les ensilages. En conséquence, la **mise en place de pratiques de biosécurité dans les élevages et sur les sites de méthanisation est primordiale pour prévenir des risques liés au botulisme.**

Bactéries du groupe Bacillus cereus

En 1998, Couturier et Galtier citaient déjà *Bacillus cereus* comme bactérie résistante à la température, même en thermophilie. *Bacillus cereus sensu lato* est un groupe de bactéries qui comprend plusieurs espèces apparentées dont *Bacillus anthracis, Bacillus cereus sensu stricto, Bacillus thuringensis*. Ce sont également des bactéries sporulantes que l'on peut retrouver dans l'environnement, les sols et les déjections animales. Elles ne sont pas affectées par la digestion anaérobie et résistent à l'hygiénisation. (Fröschle *et al.,* 2015)

Mycobacterium Avium Paratuberculosis (MAP)

Mycobacterium avium subsp.paratubercuosis (MAP), l'agent responsable de la paratuberculose chez les ruminants, est également une bactérie sporulante très résistante dans l'environnement.

La durée de vie en condition de stockage du MAP dans un lisier de bovin peut atteindre 98 jours à 15 °C et 252 jours à 5 °C. La réduction d'un log10 pour les MAP est atteinte après 5 à 6,5 jours ce qui est

plus long que pour d'autres pathogènes comme *E.coli*. L'épandage d'un lisier contaminé peut entraîner une contamination des parcelles sur du long terme (années).

Lors d'une expérience en batch réalisé par Olsen et al (1985), en condition de digestion mésophile (35 °C) les MAP restent dénombrables jusqu'au 21ème jour et ne le sont plus au 28ème jour. En thermophile, les MAP ne sont plus détectés au bout de 24 heures. Par conséquent, dans le cas d'une digestion anaérobie semi-continue thermophile avec un intervalle entre l'incorporation et l'évacuation de 24 heures, le process peut assurer une complète destruction des MAP. Au contraire, un process mésophile avec un intervalle de 1 à 2 jours maximum ne permet pas d'assurer la destruction des MAP.

Une comparaison a été faite entre process mésophile (42 °C) en une étape (temps de séjour de 60/65 jours) et en deux étapes (1 temps de séjour de 45/50 jours et un second temps de séjour dans un post-digesteur à 40 °C de 20/30 jours). Des MAP viables ont été retrouvés dans le digestat du processus en une étape tandis qu'aucun ne fut trouvé dans celui en deux étapes.

A échelle réelle, des traces d'ADN ont été retrouvées 12 mois après l'incorporation d'un fumier contaminé dans le digestat d'une installation mésophile (41 °C pendant 50 à 60 jours et post-digesteur 25 à 30 jours) mais plus de cellules viables au bout de 2 mois. Or cet ADN peut provenir de deux sources : de cellules mortes ou de cellules viables mais en nombre inférieur au seuil de détection.

Enfin citons l'étude réalisée par Carine HAAS du GDS 88. Cette étude portait sur 3 sites de méthanisation qui utilisaient respectivement les effluents de quatre, deux et six exploitations. Pour le premier site, une des quatre exploitations était touchée par la paratuberculose. Pour le second, les deux étaient concernées, pour le troisième, c'était trois sur six.

Sur les nombreuses analyses réalisées durant cette enquête, 7 échantillons de digestats sont sortis positifs en PCR[2]. Mais la mise en culture qui a suivi n'a donné qu'un résultat faiblement positif et 6 négatifs. Une mise en culture est donc nécessaire pour pouvoir qualifier de potentiellement contaminant un digestat. L'auteur soulève la question de la dose minimale pour infecter un animal.

Des études complémentaires sont à mener pour répondre à ces questions. (Bonhotal et al., 2011; Mazzone et al., 2018; Michel et al., 2005; Olsen et al., 1985; Slana et al., 2011; Whittington et al., 2004)

- <u>Les virus</u>

Sassi et al. (2018) ont étudié l'impact de la digestion mésophile et thermophile sur différents virus inoculés dans des effluents urbains. Les bactériophages sont considérés par ces auteurs[3] comme de bons indicateurs représentatifs des virus entériques. En mésophile, les taux de réduction des bactériophages sont de l'ordre de 5,9 à 6,6 Log10 pour des taux de réduction de 1,8 à 2,2 Log10 sur des virus animaux. En thermophile des taux de réduction >4Log10 sont observés sur les virus animaux.

Dans l'étude de Bötner et Behlsam (2012), la température est citée comme le paramètre le plus important qui influe sur la survie des virus animaux. En mésophile, les temps d'inactivation vont de quelques heures à une journée alors qu'en thermophile, ils sont inactivés en moins d'une heure. Il existe une exception pour le PPV, virus de la parvovirose porcine, qui nécessite 8 jours à 55°C et 21 semaines à 35°C pour être totalement inactivé.

McKain and Hobson (1987) expliquent que les entérovirus porcins sont largement désactivés au bout d'une à deux journées et que certains persistent jusqu'à 9 jours pendant une digestion anaérobie mésophile En thermophile, ils sont totalement inactivés au bout d'une heure. Lund *et al.* (1996)

[2] PCR : Polymérase Chaine Réaction. Technique d'amplification enzymatique qui permet à partir de l'ADN ou ARN de mesurer la présence de bactéries ou virus

[3] Il n'y aurait pas de consensus scientifique sur ce point. (Communication personnelle avec AM. Pourcher)

montrent qu'il faut 23 heures à 35°C pour atteindre un taux de réduction de 4Log10 contre moins d'une demi-heure à 55°C.

Le rapport de l'EFSA (2007) dresse une liste de T90 pour différents virus qui sont pour la plupart en dessous de 24 heures, sauf pour le parvovirus bovin.

Virus de la grippe aviaire (*Influenza Aviaire*)

Le virus de la grippe aviaire est un virus du groupe Influenza Aviaire Hautement Pathogène (IAHP). La résistance du virus dans les conditions de l'environnement diffère suivant les souches. Lors de l'épisode qui a affecté les élevages de palmipèdes en France à l'hiver 2015-2016, la souche H5N8 était impliquée. D'après l'étude conduite par l'ANSES Ploufragan et l'ITAVI, le virus peut persister jusqu'à 3 semaines dans les fosses à lisier en conditions extérieures. Les lisiers infectés peuvent donc être des sources de contamination potentielle.

Comme tous les virus de la grippe, IAHP est sensible à la température, mais aussi au pH, à la salinité, aux rayons UV, à la présence de matière organique. Ainsi, une combinaison de facteurs favorables associant une température basse, un pH neutre, l'absence d'exposition aux UV et une protection par un milieu riche en matières organiques favorise de manière importante la persistance des particules virales et le maintien de leur infectiosité (Anses - Saisine 2016-SA-0027, 2016). Une montée en température pourrait donc constituer un levier de maîtrise du risque.

Dans sa saisine de 2016, l'ANSES préconise les moyens de maîtrise suivants :

- le traitement en usine agréée de production de biogaz par méthanisation équipée d'une unité d'hygiénisation,
- le traitement par chaulage permettant d'atteindre un pH entre 10 à 12 pendant sept jours,
- l'assainissement naturel sur site par stockage minimum de 60 jours après abattage des animaux.

Le traitement par chaulage est à proscrire d'un point de vue environnemental, du fait du risque important de volatilisation de l'ammoniaque.

Nous n'avons pas trouvé de publication portant spécifiquement sur l'impact de la température sur H5N8. Dans l'étude de Davidson et al., (2010) portant sur H9N2 (une souche Israélienne), le passage à 37°C assure une inactivation du virus en 3 à 5 jours. Dans une étude portant sur une souche coréenne H5N1, le temps d'inactivation passe de plus de 100 jours à 4°C à une cinquantaine de jours à 30°C. Le taux de réduction décimal à 30°C est inférieur à 10 jours pour les 3 types de H5N1 étudiés. Des températures plus élevées n'ont pas été étudiées.

Virus de la peste porcine africaine (*African Swine Virus*)

African swine fever (ASF) est une maladie qui provoque des fièvres hémorragiques dévastatrice chez les porcs avec des taux de mortalité proches de 100% (Costard et al., 2009). Le virus est excrété dans les matières fécales des porcs infectés.

Ce virus la capacité de rester longtemps dans des environnements riches en protéine et pour des pH compris entre 4 et 10.

Nous n'avons pas trouvé d'études spécifiques portant sur l'effet de la digestion anaérobie sur le virus de la peste porcine africaine. ASF est néanmoins sensible à la chaleur. Le temps de survie du virus de l'ASF varie entre 60 et 100 jours. Cette durée est dépendante de la température, du pH et de la charge initiale de pathogènes. Par exemple, une expérimentation a montré un temps de survie de 84 jours lors d'un stockage à 17 °C contre 112 jours à 4 °C.

Dans des études menées par Plowright et Parker (1967), il a été montré que le virus était inactivé (réduction de 5 log) en 90 min à 56 ° C. Cependant, les travaux effectués par Turner et al. (1998) montrent qu'à des températures comprises entre 4 et 40 °C la population de virus reste stable, à partir

de 50 °C il y a un déclin pour arriver à la présence de quelques traces au bout de 24h et à 60 °C au bout de 15 minutes il n'y a plus de virus détecté.

Il existe plusieurs méthodes d'inactivation :

- Des traitements thermiques avec une température d'au moins 60 °C et pendant au minium 20 minutes ;
- Un stockage sur une longue période (jusqu'à 6 mois) mais sans ajout de lisier durant cette période, ce qui est contraignant comme méthode ;
- Un traitement par micro-ondes ou oligolyse qui sont au stade expérimental ;
- Une stabilisation aérobie thermophile ou digestion anaérobie thermophile ;
- Un compostage de la fraction solide.

La résistance du virus implique que le transfert de contamination peut avoir lieu par des vêtements, des véhicules ou des équipements contaminés. Néanmoins, la mise en place d'une bonne biosécurité prévient les risques.

(Bellini et al., 2016; Haas et al., 1995; Penrith and Vosloo, 2009; Turner and Williams, 1998)

Impact sur différents virus en conditions mésophile

Virus	Conditions opératoires	Type d'effluent	Observation*	Référence
Bactérophage MS2	21 jours – 32°C	Effluents urbains	R = 6,6 log10	Sassi *et al.* (2018)
Bactérophage ø6	21 jours – 32°C	Effluents urbains	R >5,9 log10	Sassi *et al.* (2018)
Adenovirus 4	21 jours – 32°C	Effluents urbains	R = 2 log10	Sassi *et al.* (2018)
Poliovirus 1	21 jours – 32°C	Effluents urbains	R = 1,8 log10	Sassi *et al.* (2018)
Murine norovirus	21 jours – 32°C	Effluents urbains	R = 2,2 log10	Sassi *et al.* (2018)
FMDV (fièvre aphteuse)	35°C	lisiers bovins - porcins	I = 24 heures	Bøtner et Belsham (2012)
Porcine Parvovirus	35°C	lisiers porcins	I = 21 semaines	Bøtner et Belsham (2012)
CSVF (peste porcine classique)	35°C	lisiers porcins	I = 4 heures	Bøtner et Belsham (2012)
BVDV (diarrhée virale)	35°C	lisiers bovins	I = 3 heures	Bøtner et Belsham (2012)
SIV (grippe porcine)	35°C	lisiers porcins	I = 24 heures	Bøtner et Belsham (2012)
ECBO-Virus	30°C	lisiers bovins + biodéchets	D = 16 -43 heures	EFSA (d'après Hoferer 2001)
ECBO-Virus	30°C	lisiers porcins + biodéchets	D = 23 -35 heures	EFSA (d'après Hoferer 2001)
ECBO-Virus	35°C	lisiers bovins + biodéchets	D = 11 -17 heures	EFSA (d'après Hoferer 2001)
Equine Rhinovirus	30°C	lisiers bovins + biodéchets	D = 14 -34 heures	EFSA (d'après Hoferer 2001)
Equine Rhinovirus	30°C	lisiers porcins + biodéchets	D = 24 -26 heures	EFSA (d'après Hoferer 2001)
Poliovirus	30°C	lisiers porcins + biodéchets	D = 22 -32 heures	EFSA (d'après Hoferer 2001)
Bovine Parvovirus	30°C	lisiers porcins + biodéchets	D = 7,5 – 13,2 jours	EFSA (d'après Hoferer 2001)
Bovine Parvovirus	30°C	lisiers bovins + biodéchets	D = 1,4 -3,6 jours	EFSA (d'après Monteith *et al.* 1986)
FMDV (fièvre aphteuse)	30°C	lisiers bovins + biodéchets	D = 10 -13 heures	EFSA (d'après Moss *et al.,* 2000)
FMDV (fièvre aphteuse)	30°C	lisiers porcins + biodéchets	D = 5 -12 heures	EFSA (d'après Moss *et al.,* 2000)
FMDV (fièvre aphteuse)	35°C	lisiers bovins + biodéchets	D = 6 13 heures	EFSA (d'après Moss *et al.,* 2000)
FMDV (fièvre aphteuse)	35°C	lisiers porcins + biodéchets	D = 5 -6 heures	EFSA (d'après Moss *et al.,* 2000)
SVDV (maladie vésiculeuse)	30°C	lisiers porcins + biodéchets	D = 23 -67 heures	EFSA (d'après Moss *et al.,* 2000)
SVDV (maladie vésiculeuse)	35°C	lisiers porcins + biodéchets	D = 12 -15 heures	EFSA (d'après Moss *et al.,* 2000)
Pseudorabies Virus	30°C	lisiers porcins + biodéchets	D = 1,4 -1,7 heures	EFSA (d'après Moss *et al.,* 2000)
Pseudorabies Virus	35°C	lisiers porcins + biodéchets	D = 0,5 -1,4 heures	EFSA (d'après Moss *et al.,* 2000)
Influenza Aviaire H9N2	37°C		D= 2,9 – 4,7 jours	Davidson *et al.,* 2010
Influenza Aviaire H5N1	30°C		D= 4 – 9 jours	Paek et al., 2010
Influenza Aviaire H5N1	30°C		I= 51 – 58 jours	Paek et al., 2010

Impact sur différents virus en conditions thermophile

Virus	Conditions opératoires	Type d'effluent	Observation	Référence
Bactérophage MS2	5 jours – 55°C	Effluents urbains	7,1 log10	Sassi *et al.* (2018)
Bactérophage ø6	5 jours – 55°C	Effluents urbains	>5,9 log10	Sassi *et al.* (2018)
Adenovirus 4	5 jours – 55°C	Effluents urbains	>2,8 log10	Sassi *et al.* (2018)
Poliovirus 1	5 jours – 55°C	Effluents urbains	4,6 log10	Sassi *et al.* (2018)
Murine norovirus	5 jours – 55°C	Effluents urbains	>4,1 log10	Sassi *et al.* (2018)
FMDV fièvre aphteuse	55°C	lisiers bovins - porcins	I < 1 heure	Bøtner et Belsham (2012)
parvovirus porcin	55°C	lisiers porcins	I = 8 jours	Bøtner et Belsham (2012
CSVF (peste porcine classique)	55°C	lisiers porcins	I < 5 minutes	Bøtner et Belsham (2012)
BVDV (diarrhée virale)	55°C	lisiers bovins	I = 5 minutes	Bøtner et Belsham (2012)
SIV (grippe porcine)	55°C	lisiers porcins	I = 1 heure	Bøtner et Belsham (2012)

- Parasites

Les parasites sont beaucoup moins étudiés dans la littérature, et leur temps de survie dans l'environnement est généralement beaucoup plus long que pour les bactéries et les virus.

Dans les parasites sont regroupés des Helminthes (vers), des vers plats comme les cestodes (*taenia*) ou trématodes (*grande douve*), les nématodes (*ascaris, strongles*) ainsi que des protozoaires (*giardia, coccidie, cryptosporidie*..).

Bonetta et al (2014) dans l'échantillonnage d'une unité de méthanisation en mésophile sur effluents bovins n'ont relevé aucune trace d'œufs d'helminthes, ni dans les effluents bruts, ni dans les digestats.

L'étude conduite par Orzi et al (2015) sur 11 unités de méthanisation agricoles a cherché différents parasites et a trouvé dans les effluents bruts de 3 unités sur 10 des œufs d'Ascaris, Stronglya, ou des oocystes de Coccidie. Ces parasites peuvent se retrouver dans les digestats.

D. L'HYGIENISATION

- Efficacité du traitement thermique

Plusieurs procédés hygiénisant ont été étudiés dans la littérature, allant de 55°C à 70°C et de 30 à 60 minutes. La pasteurisation, telle que définie par le règlement Européen doit être conduite à 70°C pendant 1 heure, en assurant une taille de particule <12mm.

Globalement, les étapes de pré-traitement réduisent les germes dans les substrats ce qui contribue à la qualité sanitaire du digestat. La pasteurisation est notamment très efficace pour éliminer les bactéries végétatives et les virus.

Dans une publiée par Bagge et al. (2005), des échantillons ont été prélevés sur quatre installations Suédoises de taille industrielle et hygiénisant des biodéchets et SPA de catégorie 3 ainsi que des lisiers et fumiers provenant de plusieurs exploitations (entre 5 en 20) en amont de la digestion. L'étape d'hygiénisation fonctionne en batch pour 3 unités sur 4 et en semi-continu pour 1 installation. 3 unités sur quatre fonctionnent en régime thermophile. Les échantillonnages ont eu lieu avant hygiénisation, après digestion, dans le stockage et dans les stockages décentralisés (sur les fermes). L'étape d'hygiénisation permet d'abattre significativement (en dessous du seuil de détection) les bactéries indicatrices non sporulantes. Seul un échantillon prélevé directement après pasteurisation contenait des bactéries du groupe *Enterococcus spp*, l'hypothèse d'un problème d'échantillonnage n'a pas été écarté. *Clostridium Perfringens* n'a pas été affecté par l'étape de pasteurisation.

Des études plus anciennes mentionnaient déjà que Salmonella spp ne pouvait pas survivre plus de quelques minutes à 70° (Bendixen, 1996 ; Mitscherlich and Marth, 1984).

Dans une étude visant à définir des indicateurs de traitement thermique, Watcharasukarn et al (2009) rapportent que *E.coli* passe en dessous des limites de détection en dix secondes. Enteroccus faecalis est plus résistant avec un maximum de réduction de 1.77 log 10 en 24 heures.

Néanmoins, l'hygiénisation à 70°C ne suffit pas pour éliminer les Clostridium spp. (Böhnel and Lube, 2000; Bianca Fröschle et al., 2015; Gessler and Böhnel, 2006; Neuhaus et al., 2015) Les bactéries du groupe Bacillus cereus ne sont également pas affectées par l'hygiénisation (Fröschle et al, 2015)

- Risques de recontamination

Bagge *et al.* et Sahlstrom mentionnent le risque de recontamination de digestat ayant subi une pasteurisation en post-digestion. On peut supposer que l'absence de compétition avec d'autres micro-organismes, en rendant le milieu stérile, laisse la place à des pathogènes extérieurs de se développer dans le digestat. Dans l'étude de Bagge citée plus haut, l'hypothèse de la contamination via les engins de transport a été évoquée, le même type de Salmonelle (*Salmonella* Agona) ayant été retrouvé en amont de la pasteurisation et dans les stockages décentralisés.

Une pasteurisation après digestion semble donc plus risquée qu'en amont car plus propice à une contamination notamment pendant le transport, et prolifération des pathogènes, comme les Salmonelles ou les coliformes fécaux. (Sahlstrom, 2003) Dans les années 80, des problèmes de recontamination après pasteurisation ont été observées en station d'épuration. Dans ces cas relevés, les moyens de transports n'étaient pas correctement nettoyés. Ces auteurs mentionnent le placement en post-digestion de l'hygiénisation pour des raisons économiques, ce que nous étudierons dans le chapitre VI.

Ce risque était également cité dans la revue de Couturier et Galtier (1998) : *« Les Salmonelles peuvent se multiplier dans la boue stérile s'il n'y a pas de compétition avec d'autres bactéries (Carrington 1982) ou avec d'autres micro-organismes (Gadre, 1986). »*

III. ETAT DES LIEUX DES PRATIQUES D'EPANDAGE ET EVALUATIONS DES RISQUES SANITAIRES LIES A LA METHANISATION EN COLLECTIF

A. LA GESTION ACTUELLE DES EFFLUENTS D'ELEVAGE

La méthanisation présente de nombreux avantages dont *a priori* celui d'assainir les effluents d'élevage avant leur épandage dans les champs.

Comme le décrit la synthèse bibliographique précédente, l'efficacité de la digestion est variable suivant les agents pathogènes. Les réductions de concentrations sont comprises entre 0 et plus de 4 Log10.

Néanmoins on peut considérer cela du point de vue opposé et conclure que cela n'est pas suffisant puisqu'il reste des agents potentiellement pathogènes dans les digestats.

C'est à ce moment-là généralement qu'on oppose méthanisation collective et individuelle :

- Un élevage qui épand ses effluents bruts, fumiers et lisiers principalement, épand donc environ plus d'agents pathogènes que s'il épandait ses effluents méthanisés. Oui, mais dans les deux cas, ce sont aussi ses propres agents pathogènes. Il ne les diffuse pas à d'autres exploitations, ni n'est contaminé par des virus, bactéries ou encore parasites provenant d'autres exploitations.
- En revanche, un élevage qui participe à une installation de méthanisation collective met en quelque sorte ses agents pathogènes en commun avec ceux des autres élevages puisque tous leurs effluents sont mélangés dans un même digesteur. Et en théorie il peut donc diffuser, par le biais des digestats épandus, les maladies de son exploitation vers les autres exploitations, et réciproquement. C'est là la crainte majeure au niveau sanitaire. Celle qui justifie les analyses et mesures d'hygiène prises actuellement sur tous les sites de méthanisation collective, dans le cadre de leur agrément sanitaire.

Mais en réalité, de très nombreux éleveurs épandent sur leurs terres des fumiers et des lisiers, frais ou plus ou moins conservés, issus d'autres exploitations que la leur. C'est une pratique courante, ancienne, et qui jusque-là semble n'avoir posé aucun problème sanitaire.

Les analyses des effluents d'animaux d'élevage, frais et stockés, indiquent qu'ils contiennent tous différents agents potentiellement pathogènes : *Salmonella, E. coli, Cryptosporidium parvum*, *Giardia intestinalis* (Hutchison *et al.* 2004) ou encore *Listeria monocytogenes*, *Campylobacter jejuni*, virus de l'hépatite E (expertise MAFOR 2014).

Concentrations en pathogènes dans les effluents d'élevage en Angleterre.

D'après Hutchison *et al.* (2004). **Etude réalisée sur 1516 échantillons**

	Type de lisier/ fumier	Concentration (UFC/g) Bovins Moyenne[a]	Bovins Max	Porcs Moyenne	Porcs Max	Volailles Moyenne	Volailles Max
Salmonella	Frais	$2{,}1\ 10^3$	$5{,}8\ 10^5$	600	$7{,}8\ 10^4$	220	$2{,}2\ 10^4$
	Stocké	$2{,}5\ 10^3$	$7{,}2\ 10^6$	610	$2\ 10^3$	$4\ 10^3$	$8\ 10^3$
***E. coli* entéropathogène**	Frais	$1{,}2\ 10^3$	$2{,}6\ 10^8$	$3,9\ 10^3$	$7{,}5\ 10^5$		
	Stocké	260	$7{,}5\ 10^4$	$1{,}3\ 10^3$	$1{,}8\ 10^4$		
Cryptosporidium parvum	Frais	19	$3{,}5\ 10^3$	58	$3{,}6\ 10^3$		
	Stocké	11	480	33	310		
Giardia intestinalis	Frais	10	$5\ 10^3$	68	$1{,}6\ 10^5$		
	Stocké	3	36	12	12		

[a] moyenne géométrique

Source : Anne-Marie POURCHER - IRSTEA - Journées Recherche et Industrie biogaz méthanisation 3-5 Février 2015 Rennes
" Impact de la digestion anaérobie sur les pathogènes. Revue bibliographique."

Source : *"Impact de la digestion anaérobie sur les bactéries indicatrices de traitement et les micro-organismes pathogènes zoonotiques"* IRSTEA - Anne-Marie Pourcher, Céline Druilhe Les enjeux agronomiques et sanitaires des digestats 16 septembre 2016- SPACE

Fréquence de détection dans les déjections et effluents d'animaux d'élevage (expertise MAFOR, 2014)

Fréquences de détection minimales et maximales (%)

	Micro-organisme			
bactéries	***Salmonella***	1,6 – 89	0-56	3-100
	Listeria monocytogenes	18-27		26,5
	Campylobacter jejuni	12 -85	81-97	20,6
	***E. coli* O157 : H7 ou VTEC**	0-9	22-78	0-2
parasites	***Cryptosporidium***	3-100	14-63	
	Giardia	7-84	93-100	
virus	**Virus de l'hépatite E**	3-71		

Forte variabilité des prévalences ⇨ utilisation d'indicateurs de traitement

Formes végétatives*: Escherichia coli*, coliformes fécaux, entérocoques

Formes de résistance*: Clostridium perfringens*

Dans les pratiques d'épandage classiques, deux points semblent plus risqués a priori que l'utilisation de digestats collectifs.

- **Utilisation de matériel en commun par le biais des Coopératives d'Utilisation de Matériel Agricole (CUMA) ou délégation des travaux d'épandage à une ETA (Entreprise de Travaux Agricoles)**

La FN CUMA a été contactée et sa plaquette officielle 2017 a été consultée. Il en ressort que :

- ⇨ Il y a près de 12 260 CUMA en France.
- ⇨ Cela représente 212 000 exploitations agricoles adhérentes.
- ⇨ **9 850 épandeurs sont mis en commun**. C'est le 2ème matériel le plus partagé après les remorques agricoles.

Si la possibilité de vider/nettoyer ces matériels dépend des technologies utilisées, il n'existe pas de données sur le pourcentage d'utilisateurs qui prend cette peine. Il est a priori très faible car les éleveurs interrogés répondent généralement : *« Pourquoi nettoyer du fumier si c'est pour remettre du fumier ? ».* Quant à la désinfection de ce matériel, elle n'est tout simplement même pas évoquée.

Or, pour rappel, les effluents d'élevages, frais ou stockés, contiennent environ 100 fois plus d'agents pathogènes que les digestats.

Actuellement le recours aux CUMA et aux ETA se développe. Les prix en hausse des machines (toujours plus grandes, puissantes, équipées…) et les incertitudes sur les conjonctures économiques agricoles poussent de plus en plus d'agriculteurs à recourir à ce mode d'achats en commun. Il est très probable que de plus en plus d'épandeurs voyagerons de ferme en ferme dans la années à venir.

- **Epandage d'effluents provenant d'autres exploitations**

L'entreprise CLASEL, aujourd'hui SEENOVIA, est un groupement qui réalise des prestations de conseil et d'aide à la réalisation des plans de fumure. Des données de plans de fumure réalisées par CLASEL en 2014 et en 2016, en Sarthe et en Mayenne, ont pu être rassemblées et étudiées.

Elles démontrent que **de nombreux élevages importent des fumiers et lisiers issus d'autres élevages.** C'est un flux qui va des zones où il y a le plus d'exploitations vers les zones où il y en a moins, en raison des disponibilités en surface de culture pour épandre, rapportées aux productions d'effluents.

Ces importations ont lieu **sans qu'aucune analyse bactériologique ne soit faite** puisqu'elles ne sont pas obligatoires, ni même tout simplement recommandées. Les seules analyses effectuées, et encore rarement, sont des mesures de valeurs agronomiques de ces fumiers et lisiers en tant que fertilisants.

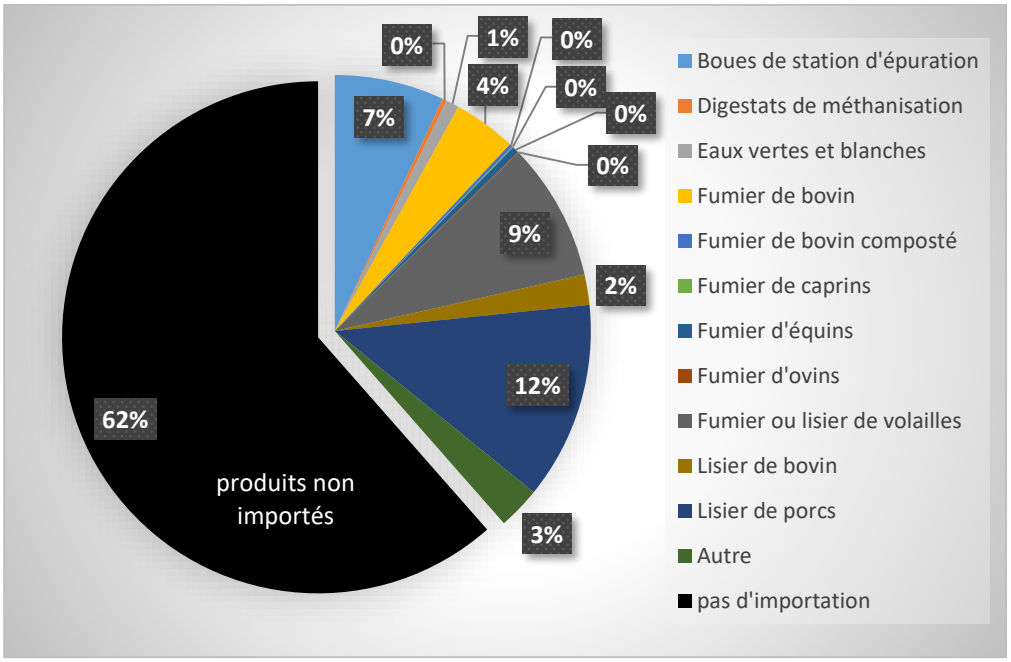
En 2014, sur 1459 plans de fumure réalisés par le CLASEL en Sarthe et en Mayenne en élevages bovins :

- 30 % des élevages ont importé au moins un effluent d'origine externe.
- 0,3% ont importé du digestat de méthanisation alors que 24 % ont importé sur leurs terres au moins un lisier ou un fumier, principalement de porc (32%), de volaille (22%) ou de bovin (15%).
- 10% ont importé des boues de station d'épuration ou des eaux vertes et blanches ou d'autres matières.

Dans le détail, 76% des élevages qui ont eu recours à une matière fertilisante d'origine externe n'ont importé qu'un seul type d'effluent tandis que 20% en ont importé deux différents.

- ⇨ **Il y a donc eu 80 fois plus d'élevages qui ont importé un effluent d'élevage extérieur sans faire d'analyse, que d'élevages qui ont importé un digestat analysé.**

2014 / 1459 élevages	Boues de station d'épuration	Digestats de méthanisation	Eaux vertes et blanches	Fumier de bovin	Fumier de bovin composté	Fumier de caprins	Fumier d'équins	Fumier d'ovins	Fumier ou lisier de volailles	Lisier de bovin	Lisier de porcs	Autre	Total général
Elevages concernés	101	4	12	58	3	1	6	1	127	28	182	39	562
Moyennes des importations	586	450	9216	268	548	60	142	50	147	456	466	158	
Total général des importations	59266	1800	110598	15580	1645	60	854	50	18792	12787	84837	6166	312434



Grahique : Part des produits organiques importés dans les plans de fumure réalisés par le CLASEL en 2014.

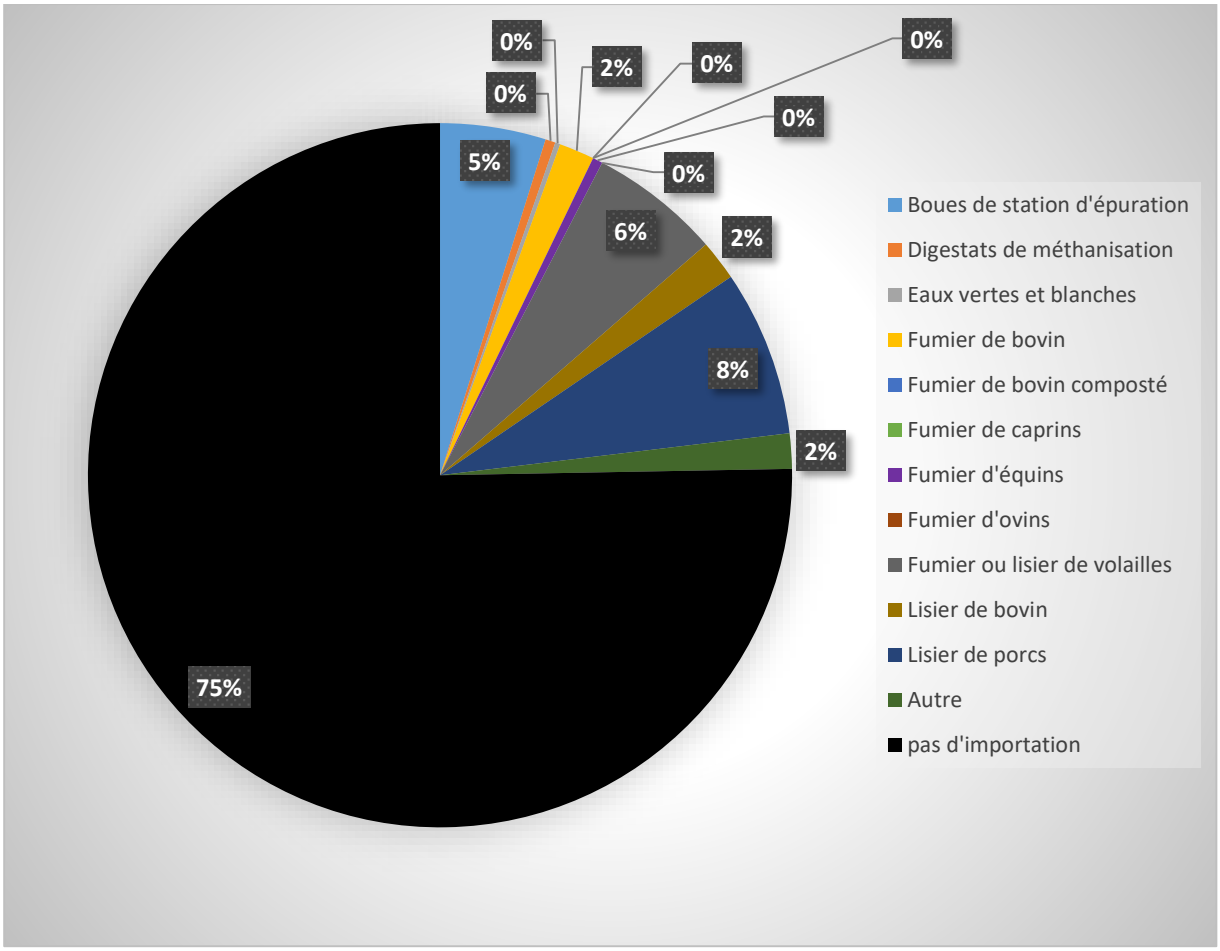
En 2016, sur 433 plans de fumure réalisés par le CLASEL en Sarthe et en Mayenne :

- 22% ont importé au moins un effluent d'origine externe.
- 0,5% ont importé du digestat de méthanisation alors que 16,5 % ont importé sur leurs terres au moins un lisier ou un fumier, principalement de porc (34%), de volaille (27%) ou de bovin (3%).
- 6,7% ont importé des boues de station d'épuration ou des eaux vertes et blanches ou d'autres matières.

Dans le détail, 89% des élevages qui ont eu recours à une matière fertilisante d'origine externe n'ont importé qu'un seul type d'effluent tandis que 11% en ont importé deux différents.

Il y a donc eu 33 fois plus d'élevages qui ont importé un effluent d'élevage extérieur sans faire d'analyse, que d'élevages qui ont importé un digestat analysé.

2016 / 433 élevages	Boues de station d'épuration	Digestats de méthanisation	Eaux vertes et blanches	Fumier de bovin	Fumier de bovin composté	Fumier de caprins	Fumier d'équins	Fumier d'ovins	Fumier ou lisier de volailles	Lisier de bovin	Lisier de porcs	Autre	Total général
Elevages concernés	21	2	1	7	0	0	2	0	26	8	33	7	107
Moyennes des importations	374	316	3583	232	0	0	45	0	135	276	376	633	
Total général des importations	7870	633	3583	1627	0	0	90	0	3527	2212	12439	4434	36415



Grahique : Part des produits organiques importés dans les plans de fumure réalisés par le CLASEL en 2016.

B. RISQUES LIES A LA MISE EN COMMUN DE MATERIEL ET/OU A L'IMPORTATION D'EFFLUENTS

Nous pouvons donc estimer qu'entre 16 et 24% des élevages importent sur leurs terres des fumiers et des lisiers non analysés mais qui contiennent nombres d'agents réputés pathogènes. Des études à plus grandes échelle permettraient de préciser ce chiffre mais en tous cas il est à la fois largement supérieur au pourcentage d'élevages qui importent des digestats analysés, et tout à fait significatif.

Donc logiquement nous devrions rencontrer dans nos campagnes, depuis des décennies, de nombreux cas de contaminations d'une ferme par une autre par le biais des effluents importés : des colibacilloses, des salmonelloses, des paratuberculoses, des infections par le BVD, etc.

Au sein de Seenovia, entreprise de conseil en élevage, des centaines de fermes sont suivies par le réseau de vétérinaire et rien n'a été observé de tel. Nous avons donc questionné les Groupements de Défenses Sanitaires (GDS)

Les GDS ont été créés dans les années 50. Ce sont des associations gérées par et pour les éleveurs. Ils suivent sur le terrain de nombreuses maladies d'élevage et la plupart des exploitations adhèrent à leurs services.

Ont été contactés :

- GDS 53 : Jean Luc Frennet (entretien téléphonique)
- GDS 49 : Dr Clara BOUREL, vétérinaire conseil Maine et Loire (entretien téléphonique)
- GDS 85-72 : Raphaël RALU, directeur GDS Sarthe et Vendée (échange de mail)
- GDS 44 : Laurent DELOBEL directeur du GDS Loire Atlantique (mail et entretien téléphonique)

A la question : Avez-vous eu à gérer ces dernières années des problèmes sanitaires en élevage liés à la pratique de la méthanisation, les vétérinaires des Groupements de Défense Sanitaire contactés entre janvier et février 2019 ont répondu non, pas à ce jour. Ils se disent néanmoins intéressés par le sujet et envisagent (GDS 49) de mettre en place une charte de bonnes pratiques à respecter en cas de recours à ce procédé.

De même, aucun cas de contamination d'un élevage à un autre par le biais de l'épandage d'un effluent d'origine externe n'a été recensé.

Cela ne signifie pas qu'il n'y en a eu aucun, mais simplement que s'il y en a eu, ils ont été suffisamment rares et peu importants pour qu'on ne les repère pas. D'ailleurs la question des épandages n'était jusqu'ici généralement pas abordée lors des enquêtes épidémiologiques.

De ces entretiens sont également ressorties les idées suivantes :

- *La méthanisation collective implique d'avantage d'éleveurs qu'un échange de fumiers/lisiers et semble donc plus risquée (bien que beaucoup moins pratiquée).*
- *Les achats de terres ou reprises de parcelle doivent aussi être comptabilisées dans les pratiques potentiellement dangereuses (ex : parcelle réservée à l'origine aux vaches à réformer pour cause de paratuberculose ou encore parcelle utilisée pour l'épandage de boues de station d'épuration).*

Deux maladies ressortent souvent dans les craintes formulées vis-à-vis des digestats : la paratuberculose et le botulisme.

C'est probablement pour deux raisons. D'une part les deux bactéries responsables apparaissent moins sensibles que d'autres au processus de méthanisation, surtout les formes sporulées de *Clostridium*

botulinum. Et d'autre part les maladies qu'elles provoquent sont incurables, mortelles, compliquées à gérer, et donc font peur.

La paratuberculose :

Dans le cas de la paratuberculose, la contamination a lieu essentiellement sur des veaux qui tètent. Soit lorsque les trayons sont souillés par des matières fécales contaminées, soit quand la mère est en phase clinique de la maladie et que son colostrum/lait contient des *Mycobacterium avium subspecies paratuberculosis (MAP).*

« D'autres modalités de transmission (EFSA, 2004), notamment l'épandage de fumier ou de lisier sur les pâtures, ont été évoquées, mais elles ont un rôle épidémiologique probablement très limité, sinon nul. » Source : https://www.anses.fr/en/system/files/SANT-Ra-Paratuberculose.pdf

La synthèse bibliographique précédente a montré la réduction, voire la destruction complète dans le temps de MAP sur des unités de méthanisation à taille réelle.

Carine Haas conclue dans son étude de 2016, qu'une mise en culture est nécessaire pour pouvoir qualifier de potentiellement contaminant un digestat. Et il faut s'attendre à avoir des résultats faiblement positifs, ce qui amène à la conclusion de Carine HAAS :

« Rien ne nous prouve que le peu de bactérie trouvée puisse contaminer un animal. Une étude de contamination animale devrait pouvoir éclairer cette inconnue : à savoir quel est le nombre de bactérie nécessaire à la contamination des animaux ? »

Le botulisme :

Pour le botulisme, les cas restent rares heureusement. Par exemple en Mayenne cela tourne autour de 1 ou 2 cas par an (selon une déclaration du Dr Frenet du GDS 53).

En 2017 Le Comité Scientifique de l'Agence fédérale pour la Sécurité de la Chaîne Alimentaire de Belgique concluait, à propos d'un foyer de botulisme avéré dans un élevage, que le risque d'intoxication directe de bovins par des fumiers ou des digestats contaminés de cet élevage était « *très faible »*. Mais comme il s'agissait tout de même d'un foyer de la maladie, des mesures préventives étaient préconisées.

Dans la grande majorité des cas étudiés de botulisme en élevage, on trouve à l'origine un cadavre qui a contaminé l'aliment ou l'eau des animaux. Un chat mort dans la cellule à grain, un rat noyé dans une tonne à eau, un lapin qui finit dans un silo après avoir été « récolté » par des machines agricoles toujours plus puissantes et rapides, des poules mortes mélangées à du fumier de poule épandu par la suite sur, ou juste à côté d'une pâture, etc.

A condition donc de laisser pourrir des animaux au mauvais endroit, le risque de botulisme lié à l'épandage de digestats, comme de fumiers frais, est très faible. C'est ce que rapporte Myllykoski et al. (2009) en concluant qu'une bonne biosécurité dans les élevages, que l'on étendra aux sites de méthanisation est de nature à prévenir le risque de botulisme.

IV. APPLICATION DE LA REGLEMENTATION SUR LES SOUS-PRODUITS ANIMAUX AILLEURS EN EUROPE

Cinq pays ont été étudiés : Royaume-Uni, Allemagne, Danemark, Pays-Bas, Belgique. Ils nous ont intéressés de par l'importance de la filière méthanisation (Allemagne), l'antériorité de la filière (Danemark) les problématiques de concentration d'élevages (Danemark Pays Bas, Belgique), et l'existence de système d'assurance qualité pour les digestats (Belgique, Royaume-Uni). Les fiches d'enquête par Pays se trouvent en annexe.

A. RAPPELS DE LA REGLEMENTATION EUROPEENNE

- Les textes Européens en vigueur

La méthanisation, en tant que procédé valorisant des sous-produits animaux (SPA) est encadrée par les règlements Européens suivants :

- **Règlement (CE) n° 1069/2009** établissant des règles sanitaires applicables aux sous-produits animaux et produits dérives non destines à la consommation humaine.
- **Règlement (UE) n° 142/2011** portant application du règlement (CE) n° 1069/2009 du Parlement Européen et du Conseil établissant des règles sanitaires applicables aux sous-produits animaux et produits dérivés non destines à la consommation humaine (...)

Ainsi, toute unité de méthanisation valorisant des effluents d'élevage dans l'UE doit obtenir une autorisation de la part de l'autorité sanitaire compétente pour son Pays. (article 24 – point 1 – alinéa g) Le demandeur doit notamment appuyer sa demande sur la base d'une méthode HACCP.

En France, les textes suivants ont été publiés en application des règlements Européens :

- **Arrêté du 8 décembre 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.
- **Arrêté du 9 avril 2018** fixant les dispositions techniques nationales relatives à l'utilisation de sous-produits animaux et de produits qui en sont dérivés, dans une usine de production de biogaz, une usine de compostage ou en compostage de proximité, et a l'utilisation du lisier.

Dans la Règlementation sur les SPA, le terme utilisé pour nommer la méthanisation est la « conversion en biogaz »

- Le classement des Sous-Produits Animaux et les règles de traitement

Les sous-produits animaux sont classés en 3 catégories :

- **Catégorie 1 :** Produits à haut risque, interdits en méthanisation, en dehors de la glycérine C1 (exemples : cadavres d'animaux familiers, d'animaux issus d'expérimentation, matériels à risques spécifiés et cadavres en contenant, dégrillage des équarrissages, déchets de cuisine et tables issus de moyens de transports internationaux…)
- **Catégorie 2 :** Liste ouverte (exemples : dégrillages abattoirs porcs, poussins morts dans l'œuf, animaux morts autrement que par abattage…), cette catégorie comprend notamment les effluents d'élevage et les matières stercoraires
- **Catégorie 3 :** Produits à faible risque sanitaire, voire sans risque – Toutes les parties d'animaux qui ont été considérées propres à la consommation humaine ou aptes à l'abattage (exemples : SPAN issus IAA, anciennes denrées alimentaire, déchets cuisine et tables, sang, lait cru, ancien petfood….)

Un mélange de sous-produits animaux est classé dans la catégorie du SPA le plus risqué.

S'ils sont convertis en biogaz, les traitements suivants doivent être appliqués aux produits :

- Matières de catégorie 2 :

    - En règle générale, transformation en amont de la digestion par **stérilisation sous pression** (133°C ; pendant 20 min ; sous 3 bars ; taille des particules< 50 mm)
    - Pour les produits dérogatoires (les lisiers, les matières stercoraires, le lait et produits dérivés, colostrum, œufs): sans transformation préalable si l'autorité compétente estime qu'il n'y a pas de risques
- Matières de catégorie 3 : hygiénisation/pasteurisation à 70°C pendant 1 heure, taille des particules <12mm

Le règlement 142/2011 précise : « Une usine de production de biogaz doit être équipée d'une unité de pasteurisation/d'hygiénisation incontournable pour les sous-produits animaux ou produits dérivés » ce qui place la méthanisation sans hygiénisation, nécessairement dans un cadre dérogatoire, laissé à la discrétion des « autorités compétentes », qui sont en France les préfets de départements.

En France, l'arrêté du 9 avril 2018 précise les conditions pour lesquelles la DDCSPP peut accorder des dérogations à l'obligation d'hygiénisation, si l'administration estime qu'il n'y a pas de danger.

- <u>Pour utiliser d'autres méthodes de traitement</u>

Le Règlement UE 142/2011 laisse la possibilité d'utiliser d'autres paramètres de conversion.

Pour les matières de catégorie 3 uniquement : (Annexe IV , Chapitre III, section 1), méthode de transformation n°7 : toute méthode dont l'exploitant aura démontré, après une analyse des dangers, par un prélèvement quotidien d'échantillons pendant 30 jours :

- *Clostridium Perfringens :* absence dans 1g de produit prélevé directement après le traitement
- *Salmonella :* absence dans 25 g de produits, 5 échantillons à prélever dans le stockage du produit fini
- *Enterobacteriacecae :* 5 échantillons à prélever dans le stockage du produit fini, tous ne dépassant pas 300 bactéries, et au maximum 2 échantillons compris entre 10 et 300 bactéries.

Pour les sites valorisant des matières de catégorie 2 et 3, l'hygiénisation peut se faire par d'autres paramètres de conversion normalisée (Annexe V, Chapitre III, section 2).

Il faut dans ce cas faire valider auprès de la DDCSPP la méthode utilisée, et notamment apporter la preuve de la réduction des germes pathogènes par :

- Réduction de 5 log10 d'*Enterococcus faecalis* ou de *Salmonella* Senftenberg (77W, H2S négatives),
- Réduction du titre d'infectivité des virus thermorésistants, tel Parvovirus, d'au moins 3 log 10.

Nous allons voir que dans les cinq Pays étudiés, tous font référence aux textes Européens et demandent, de façon plus ou moins facilité pour les exploitants un agrément sanitaire. Certains Pays utilisent d'autres couples temps/température comme procédé de traitement des SPA de façon récurrente.

B. AU ROYAUME-UNI

- Transposition des Règlements Européens

Les Règlements Européens ont été transcrits dans les lois nationales en 2013 et 2014 : The Animal By-products Enforcement Regulations 2013 (Angleterre, Ecosse) et The Animal By-products Enforcement Regulations 2014 (Pays de Galle). Les sites de méthanisation incorporant des SPAn doivent obtenir un agrément sanitaire par l'APHA (Animal and Plant Health Agency). Un portail Internet d'information, très clair et très bien expliqué, simple à comprendre, a été mis en ligne par le gouvernement[4] :

Pour obtenir l'agrément, un formulaire disponible en ligne est à remplir, il comprend tous les points demandés aux exploitants, tels que le décrit le Règlement 142/2011 : description du site, des produits, mesures de maîtrise dont l'analyse HACCP… A noter que le formulaire donne des conseils sur ce qui est attendu (en termes de nettoyage des véhicules par exemples, stockages des produits….)

- Contrôles de la qualité du digestat

Pour être agrées, les sites de production de biogaz doivent avoir des analyses conformes pour 12 lots consécutifs, les analyses doivent être faites dans un laboratoire accrédité. (Mêmes paramètres qu'en France, *Salmonella* et *E.coli* ou *Entrococcaceae*)

Ensuite les tests de routines doivent être faits pour chaque lot de production.

- Obligations concernant l'hygiénisation

Concernant les obligations de traitements des SPA, trois cas de figures se trouvent :

Lorsqu'il n'y a pas de SPAn de catégorie 3, ni de catégorie 2 autres que les effluents d'élevage, les matières stercoraires et le lactosérum, l'hygiénisation n'est pas nécessaire.

Lorsque les seuls produits entrants sont les suivants :

Matières de catégorie 2 :

- Effluents d'élevage
- Contenu de rumen (avec ou sans le contenant)
- Produits laitiers, colostrum
- Œufs et produits dérivés

Matières de catégorie 3 :

- Déchets de restauration. Deux catégories existent : déchets de restauration sans produits carnés (avec séparation à la source) ou avec. Dans le deuxième cas ils devront subir un traitement thermique à part, avec stockage séparé 18 jours après traitement

Si seuls ces SPA rentrent dans l'unité de méthanisation, alors il est possible d'appliquer la méthode standardisée nationale, à savoir : traitement thermique à 57°C, pendant au minimum 5 heures, avec une taille des particules inférieure à 50 mm.

[4] https://www.gov.uk/government/collections/guidance-for-the-animal-by-product-industry

System	Minimum temp	Minimum time at minimum temp	Maximum particle size
Composting (closed reactor)	60°C	2 days	400mm
Biogas	57°C	5 hours	50mm
Composting (closed reactor) or biogas	70°C	1 hour	60mm
Composting (housed windrow)	60°C	8 days (during which windrow must be turned at least 3 times, at no less than 2 day intervals)	400mm

Lorsque la méthode nationale est utilisée, il n'est pas possible d'exporter le digestat, seul l'épandage sur le territoire national est autorisé.

Enfin, lorsque des matières de catégorie 3 autres que les déchets de restauration ou des matières de catégorie 2 autres que ceux cités précédemment entrent dans l'unité, les méthodes standardisées tels que définies dans le règlement 1069/2009 doivent être utilisées, à savoir :

- Matières de catégorie 2 : stérilisation à 133° pendant 20 minutes, sous 3bars en amont de la digestion
- Matières de catégorie 3 : pasteurisation à 70°C pendant 1 heure, taille des particules inférieure à 12mm, en amont ou en aval de la digestion.

Dans tous les cas, l'étape de traitement des SPA doit comprendre : moyens de contrôle et d'enregistrement de la température en continu, système de sécurité pour assurer la montée en température. Le flux à traiter ne doit pas pouvoir contourner l'étape d'hygiénisation.

- Statut du digestat (Réglementation Environnement)

Depuis 2009, le Royaume Uni a développé un système d'assurance qualité (facultatif), le PAS 110 qui permet de sortir du statut de déchets. En plus des spécifications sur le volet sanitaire, le PAS 110 impose des contrôles sur la qualité agronomique du digestat et son innocuité (ETM, CTO…)

C. EN ALLEMAGNE

- Agrément sanitaire

Le Règlement 1069/2009 a été transposé dans la loi Allemande « TierNebG » (Tierische Nebenprodukt-Beseitigungsgesetz), révisée en août 2016. Le décret d'application TierNebV (Tiersiche Nebenprodukte-Beseitigungsverordnung) n'a pas encore été révisé et s'appuie toujours sur le règlement 1774/2002.

Néanmoins les unités de méthanisation qui incorporent des effluents d'élevage et tout autre type de C2 ou C3 doit avoir une autorisation sanitaire. La procédure est parfois commune avec le permis de construire et l'autorisation environnementale. Lors de la procédure, les porteurs de projet doivent solliciter l'avis de des services vétérinaires sur les points suivants :

- Nature et origine des matières
- Procédé de traitement
- Devenir du digestat
- Procédures d'hygiène

En Allemagne, on fait une distinction entre les unités sans hygiénisation (Plus de 7500 unités de méthanisation valorisent des effluents d'élevage sans hygiénisation) et celles qui disposent d'une étape d'hygiénisation (200 unités qui reçoivent des SPAC3)

- Obligations concernant l'hygiénisation

Les intrants suivants bénéficient d'une dérogation à l'hygiénisation :

Matières de catégorie 2 :

- effluents d'élevage
- contenu de rumen

Matières de catégorie 3 :

- lactosérum
- lait et produits dérivés
- colostrum et produits dérivés
- déchets de restauration

Si d'autres types de SPA sont incorporés (il s'agit de déchets d'abattoirs principalement), alors les méthodes décrites dans le règlement Européen s'imposent. (cf § IV.A)

Les dérogations à l'hygiénisation sont accordées, si les autorités estiment que le risque sanitaire est faible, conformément aux dispositions du Règlement Européen. **A noter que les services vétérinaires allemands commencent à imposer l'hygiénisation des biodéchets et parfois des effluents d'élevage.** Ces demandes sont de plus en plus fréquentes d'après le Fachverband Biogas.

Méthodes de traitement alternatifs à l'hygiénisation :

Environ 120 unités de méthanisation incorporent des déchets de restauration, sans hygiénisation.

Pour les biodéchets triés à la source, l'ordonnance pour les biodéchets permet l'utilisation de deux méthodes alternatives à l'hygiénisation :

- Digestion anaérobie thermophile, T>50°C, réalisée généralement en batch ou en piston
- Post-compostage du digestat, à 55°C pendant 2 semaines ou 60°C/1 semaine

- Statut du digestat et assurance qualité

En Allemagne, le digestat n'est pas un déchet mais a le statut produit si les seuls intrants sont des effluents d'élevage et/ou des cultures énergétiques.

Il existe de plus un système d'assurance qualité, non obligatoire, qui permet de certifier la qualité du digestat comme au Royaume-Uni : le RAL, avec deux normes en fonction des intrants

RAL GZ 245 pour digestats avec SPA : qui garantit, entre autres, un produit « hygiénisé » avec pasteurisation ou procédé équivalent dont l'efficacité a été prouvée et qui garantit une absence de salmonelles + valeurs limites en *E.coli* ou entérocoques. (À cela s'ajoutent des critères agronomiques et environnementaux)

RAL GZ 246 pour digestats à base de cultures énergétiques : la liste positive des produits autorisés comprend tout de même les effluents d'élevage. Pour le RAGZ246, une température de digesion>37° pendant au minimum 20 jours est requis.

Ces deux normes existent pour les digestats liquides (<15%MS) ou solides (>15%MS).

Pour la certification, les échantillons d'analyses sont pris par un préleveur externe, formé. Un manuel d'assurance qualité est fourni par l'organisme certificateur.

D. AU DANEMARK

- Agrément sanitaire

Le Règlement Européen a été transcrit dans la loi Danoise, et les unités de méthanisation doivent être agrées par les autorités sanitaires. Un portail Internet, comme au Royaume-Uni est disponible, où l'on trouve de nombreuses explications sur les conditions d'obtention de l'agrément sanitaire et notamment sur les méthodes d'hygiénisation autorisées[5]. Un formulaire est également en ligne pour faire la demande d'agrément, mais ne contient peu d'éléments techniques du dossier qui doivent être fournis à part.

- Obligations concernant l'hygiénisation

Le Danemark distingue trois types d'unités de méthanisation :

- Unités de méthanisation sans hygiénisation ;
- Unités de méthanisation équipées d'hygiénisation ;
- Unités de méthanisation avec traitement thermique alternatif, dont la « Méthode Bendixen »

A noter qu'il n'y a pas de distinction de taille concernant les obligations d'hygiénisation, et les sites moyens font entre 300 000 et 600 000 T/an.

Dans le premier cas, les unités traitant uniquement les substrats suivants, n'ont pas besoin d'hygiénisation :

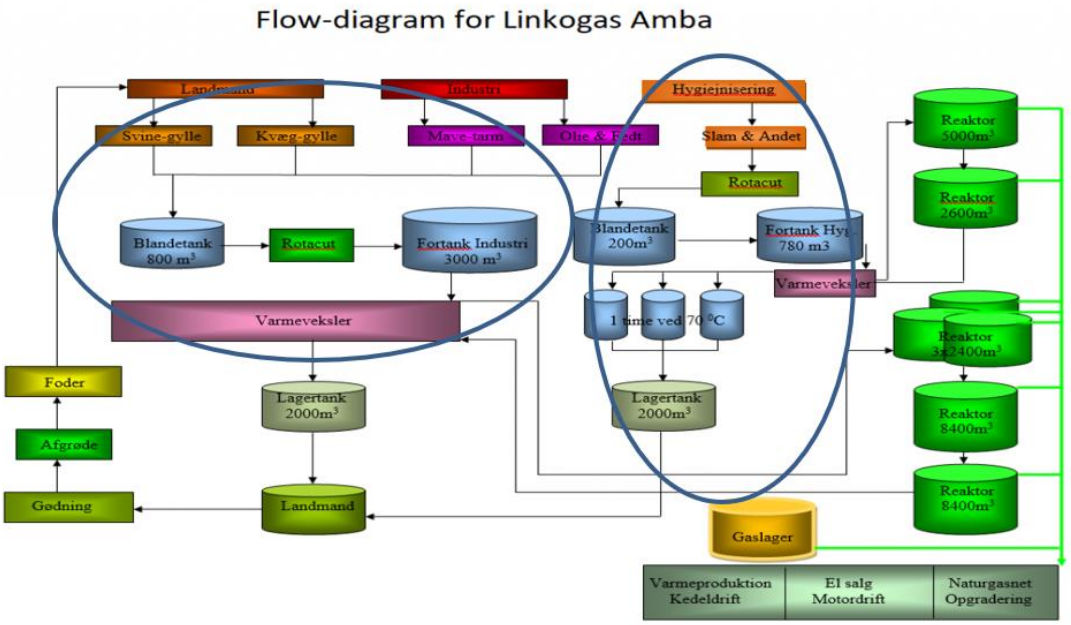
- Effluents d'élevage
- Contenu de rumen sans le contenant
- Lait et produits dérivés, colostrum et dérivés du colostrum

Lorsque des produits de catégorie 3 autres que ceux cités ci-dessus sont incorporés, une étape d'hygiénisation est nécessaire. A condition de ne pas mélanger les catégories de produits, seuls les C3 ont besoin d'être hygiénisés. C'est la façon de faire la plus répandue. On a donc 2 (ou plus) lignes de digestion, bien séparées. Seul le biogaz produit est mélangé, les digestats sont stockés également séparément.

L'étape d'hygiénisation doit bien entendu respecter les paramètres du Règlement Européen : maintien à 70° pendant 60 min, avec une taille des particules inférieure à 12mm. Elle doit disposer de moyens de contrôle et d'enregistrement de la température en continu et d'un système de sécurité pour assurer la montée en température. Le flux à traiter ne doit pas pouvoir contourner l'étape d'hygiénisation.

Ex de synoptique d'une unité Danoise :

[5] https://www.foedevarestyrelsen.dk/Leksikon/Sider/Biogasanl%C3%A6g.aspx



Certaines unités utilisent une méthode alternative, également appelée méthode de Bendixen.

La **méthode dite de Bendixen** propose des couples temps/températures qui permettent un abattement équivalent à la pasteurisation. Le traitement thermique est soit en amont ou en aval de la digestion, soit un des digesteurs en régime thérmophile fait office d'étape d'hygiénisation, en apportant la preuve que le respect du temps de séjour minimum est respecté (délai entre deux incorporations de matière fraîche). Pour obtenir l'agrément sanitaire avec ce type d'unités, il faut au préalable faire valider le taux d'abattement du process par l'administration sanitaire. Pour se faire, il est en général utilisé l'analyse du taux de réduction d'*E.faecalis*.

Température	**Temps de rétention minimum garanti dans un** digesteur thermophile*	**Temps de rétention minimum garanti dans** une cuve **en amont ou aval d'un digesteur** thermophile*	**Temps de rétention minimum garanti dans** une cuve **en amont ou aval d'un digesteur** mésophile**
52,0°C	10 heures		
53,5°C	8 heures		
55,0°C	6 heures	5,5 heures	7,5 heures
60,0°C		2,5 heures	3,5 heures

** Température de digestion de 52°C avec temps de rétention hydraulique minimum de 7 jours*
***Température de digestion compris entre 20°C et 52C avec temps de rétention hydraulique minimum de14 jours*

Tableau : couples temps/température proposés dans la méthode Bendixen pour assurer une hygiénisation suffisante par le Ministère Danois de l'Energie et l'environnement.

Pour ce type d'unité, conformément au Règlement Européen, seule l'utilisation sur le sol national est autorisée, l'export est interdit.

- Statut du digestat

Les produits résiduels issus du traitement de produits organiques comprenant des sous-produits animaux ont un statut à part au Danemark : « Organiske gødningsstoffer og jordforbedringsmidler med animalsk indhold (OGJ) « Fertilisants ou Amendements organiques comprenant des sous-produits animaux »

Les OGJ (dont les digestats) qui comprennent des SPA autres que ceux dérogatoires (effluents d'élevage, contenu de panse, lait et dérivés) sont soumis à plusieurs contraintes, notamment sur les obligations de traitement et de traçabilité. Les agriculteurs qui épandent des OGJ doivent être enregistrés s'ils possèdent aussi des animaux. Après épandage d'OGJ, un délai de 21 jours avant retour au pâturage ou récolte est imposé.

E. AUX PAYS-BAS

- Agrément sanitaire

Aux Pays-Bas, les unités de méthanisation doivent demander un agrément sanitaire auprès du Nederlands Voedsel- en warenautoriteit (NVWA)

On trouve 123 établissements de production de biogaz agrées par le NVWA pour la digestion anaérobie de sous-produits animaux.

Au niveau des sous-produits animaux, les matières de catégorie 1 et 2 (autres que les effluents d'élevage et matières stercoraires) ne sont pas autorisées en méthanisation.

- Hygiénisation

Si l'unité ne reçoit aucun SPAC3, et que seuls les effluents d'élevage et matières stercoraires sont des SPA, alors l'hygiénisation n'est pas imposée. Le digestat ne pourra pas être exporté.

Si l'unité reçoit des SPAC3 ou que l'export est nécessaire :

- Méthode d'hygiénisation normalisée 70°C, 1 heure, 12mm

OU

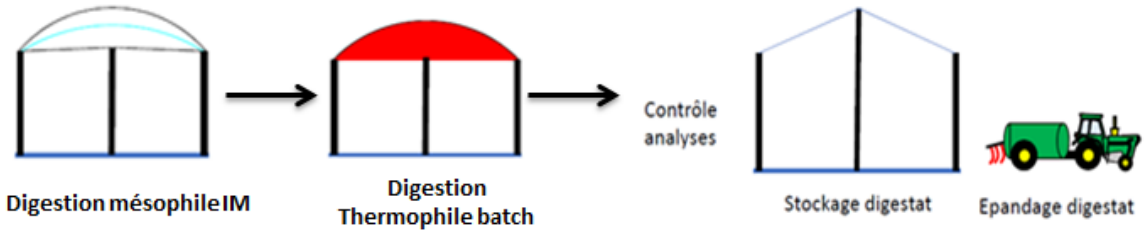
- Méthode alternative validée

Basé sur le retour d'unités en fonctionnement, les Pays-Bas ont mis au point un protocole standardisé (NTA8777:2011) pour évaluer la réduction en charge pathogènes des unités de méthanisation et valider les méthodes alternatives. Cette méthode, dite **méthode Elsinga** du nom du chercheur qui l'a mise au point, se base sur la détermination d'*Enterococcus faecalis* à des régimes thermophiles. Néanmoins, chaque site doit faire une demande individuelle. Une trentaine de sites au minimum utilisent cette méthode.

Les couples temps/températures indicatifs pour respecter le taux de réduction sont les suivants :

Température	Temps de rétention minimum garanti (MGRT)	D-Value (hr)
50	7,9 heures	1,6
55	2,5 heures	0,5
60	0,6 heures	0,1

Synoptique de la méthode Elsinga :



- Statut du digestat

Le règlement d'exécution de la Loi sur les engrais (Uitvoeringsregeling Meststoffenwet), publié en 2005, détermine sous quelles conditions le digestat obtenu en co-digestion peut être transporté, commercialisé et utilisé comme « engrais d'animal » :

Si les coproduits utilisés apparaissent sur la liste positive présentée en annexe du règlement et si au moins 50% du mélange méthanisé est constitué par des effluents d'élevage, le digestat peut être considéré comme « engrais d'animal » et donc être transporté, commercialisé et épandu.

Il peut être considéré comme engrais organique dans le cas d'un mélange constitué à 100% par des intrants végétaux figurant sur cette même liste positive.

Dans les autres cas le digestat est considéré comme un déchet et son épandage est interdit. Une dérogation peut être demandée aux autorités provinciales, afin de pouvoir l'épandre, mais il est très difficile de trouver des débouchés pour de tels sous-produits.

Du digestat provenant de Hollande est exporté vers la France. Pour être exporté, une étape d'hygiénisation est imposée.

A. EN BELGIQUE FLAMMANDE

En Belgique, les compétences sont réparties entre l'échelon fédéral et l'échelon régional, il existe des différences notables entre la Wallonie et les Flandres. Nous nous intéresserons ici seulement à la partie Flamande, région d'élevage à forte densité, et qui exporte du digestat en France. La notion d'export s'entend en dehors des frontières régionales.

- Cas de l'épandage sur le sol Flamand :

Un simple enregistrement au titre du règlement 1069/2009 est nécessaire soit par l'OVAM (déchets) soit par VLM Mestbank, dans le cas où les SPA sont majoritairement des effluents d'élevage. Pour pouvoir être épandu, l'unité de méthanisation doit demander une dérogation à l'arrêté royal et le digestat sera considéré comme fertilisant ou amendement organique. Pour cela, le site doit être certifié par l'organisme VLACO (organisme agréée par le Ministère) et le digestat doit répondre aux règles de qualité VLAREMA. VLACO réalise un audit annuel des unités, et réalise l'échantillonnage du digestat. Le producteur s'engage à suivre le manuel qualité mis en place par VLACO.

S'il n'est pas exporté et que les intrants comprennent uniquement les SPA suivants

- effluents d'élevage
- contenu de rumen
- laits et dérivés
- œufs et dérivés

Alors aucune hygiénisation n'est nécessaire.

- Cas de l'export de digestat

En 2015, la Flandre produisait 800 000 tonnes de digestat et en exportait 56%, principalement vers la France et l'Allemagne, sous forme de digestat composté.

Lorsque le digestat est exporté, un agrément sanitaire complet est à demander auprès de l'OVAM ou de VLM. Les producteurs sont contrôlés annuellement par la FAVV (Agence Fédérale pour la sécurité de la chaîne alimentaire). Le digestat doit satisfaire les seuils bactériologiques fixés par le règlement 142/2011

Pour pouvoir être exporté en France les SPA de catégorie 2 dérogatoires et les SPA3 doivent être pasteurisés (70°C, 1 heure, 12 mm), en amont ou en aval de la digestion.

Comme dans la majorité des cas, les digestats subissent un post-traitement soit par compostage (avec des végétaux, mais aussi potentiellement des fientes de volaille ou des restes de restauration) notamment pour pouvoir rentrer dans la norme NFU 44051 (voire 42-001) soit par séchage thermique, l'hygiénisation à 70°C/1 heure est peu pratiquée.

- Méthodes alternatives d'hygiénisation

Plusieurs sites ont fait valider, avec la méthode « Elsinga » (cf §précédent), des **digesteurs thermophiles** comme méthode alternative à la pasteurisation. (À noter que des sites de co-compostages de biodéchets ont également fait valider des couples temps/températures alternatifs)

En résumé, les digestats belges qui rentrent sur le sol Français, doivent en théorie subir une étape d'hygiénisation ou ont fait valider une autre couple temps/température. S'il n'est pas exporté et que seuls les SPA font partie de la liste dérogatoire, il n'y a pas besoin d'hygiénisation, peu importe le volume d'effluents d'élevage.

V. MESURES DE BONNES PRATIQUES D'HYGIENE

Comme l'a montré la synthèse bibliographique en première partie, la digestion anaérobie mésophile permet un abattement sur de nombreux pathogènes, mais n'assure pas une hygiénisation totale des effluents. Actuellement, et cela a été rappelé dans la seconde partie, ces effluents sont épandus aujourd'hui tels quels dans les champs, sans contrôle préalable.

La méthanisation, en mélangeant des effluents de plusieurs exploitations, pourrait être un facteur de dissémination de pathogène d'une ferme à l'autre, comme peut l'être la mise en commun de matériel d'épandage ou l'épandage chez des prêteurs de terres. Si l'hygiénisation est un moyen efficace pour assurer une inactivation de nombreux pathogènes, certains pathogènes résistent encore à 70°C et le risque de contamination après pasteurisation n'est pas à négliger. Il faut donc considérer la maîtrise sanitaire plus largement que sous l'angle de l'efficacité d'un procédé de traitement, et **mettre en place des mesures de bonnes pratiques d'hygiène, réalistes et réalisables dans les conditions économiques actuelles.** En effet, il n'apparait pas raisonnable, de demander à une filière de production d'énergie renouvelable que l'on souhaite développer, de baisser ses coûts de façon importante[6] d'une part et d'autre part, d'imposer des contraintes règlementaires qui ont pour conséquence l'augmentation des investissements et/ou des charges d'exploitation.

Chaque exploitant, dans sa demande d'agrément sanitaire, doit faire une analyse des dangers et mettre en place un plan de maîtrise sanitaire en conséquence. Ces bonnes pratiques vont donc faire partie de son plan de maîtrise et certaines sont imposées par les règlements Européens (traçabilité avec les DAC, analyses bactériologiques par lot…) Néanmoins, il est nécessaire d'apporter une vision plus globale pour assurer la maîtrise du risque sanitaire à l'échelle du bassin de production et de valorisation des effluents d'élevage.

A. LE SUIVI DES PATHOGENES

- Analyser la prévalence de certaines maladies dans les élevages

Avant de mettre en place des moyens de prévention, il faut pouvoir estimer la présence ou non des pathogènes qui peuvent être présents :

- Globalement, dans la zone géographique de collecte de l'unité mais sans affecter une ferme fournissant des effluents ;
- Sur une ferme du projet, mais dont ce type d'effluent n'est pas apporté
- Dans les effluents collectés mais dont le pathogène ne se retrouve pas dans le digestat (du fait de la dilution et de l'abattement par la digestion)
- Dans le digestat, par le suivi analytique.

Ce suivi des pathogènes peut se faire par analyses au niveau des effluents bruts et du digestat et par prélèvements sur les animaux ou dans les bâtiments dans le cadre de certaines prophylaxies ou suivi de certaines productions. La fréquence des analyses et les pathogènes recherchés seront à définir dans l'agrément sanitaire.

Pour les sites recevant des effluents d'autres exploitations, il est demandé de recueillir tous les ans les bilans de santé des élevages apporteurs de matière. Néanmoins, si l'analyse des dangers se limite à fournir des attestations papier cette mesure aura des limites. Il faut inviter les porteurs de projet, accompagnés de leurs vétérinaires conseils, à provoquer une **communication et un échange d'information sur les situations sanitaires des élevages liés par le projet de méthanisation**.

[6] Projet de Programmation Pluriannuelle de l'Energie publiée le 25 janvier 2019, en cours de consultation publique au moment de la rédaction de ce rapport.

- Améliorer la qualité des effluents bruts :

Il ne faut pas oublier que la première mesure pour assurer une qualité sanitaire du digestat satisfaisante est d'améliorer la qualité des effluents bruts.

Pour ce faire, généraliser des formations à la bio-sécurité dans les élevages et notamment les mettre en place dans les élevages bovins qui sont moins habituellement ciblés que les élevages hors-sols, est une piste à creuser.

Les Groupements de Défense Sanitaire, peuvent notamment être des organismes utiles sur lesquels s'appuyer pour aider à identifier les maladies à suivre et à améliorer les pratiques.

- Traçabilité et allotissement du digestat

Pour répondre aux exigences de la règlementation encadrant l'usage des SPA, le digestat doit être contrôlé tous les ans, avec des analyses pour chaque « lot » de digestat sur *Salmonella* et *E.coli* ou *Entrococcaceae*.

La notion de lot en infiniment mélangé consiste à faire des prélèvements avant chaque grande période d'épandage, ce qui revient à faire deux ou trois lots par an en général. Dans la plupart des cas cela sera suffisant. **Pour les collectifs regroupant un grand nombre de fermes, il peut être conseillé de multiplier les stockages et d'augmenter ainsi le nombre de lot.** Il faut pouvoir assurer une traçabilité de chacun de ses lots et pouvoir attendre le résultat des analyses avant l'épandage (les stockages décentralisés sont souvent des solutions optées par les collectifs pour optimiser les transports et la logistique)

De même, afin d'assurer une traçabilité sans faille pour les sites collectifs, **l'équipement d'un logiciel de gestion spécialisé** est indispensable.

Il est à noter que depuis l'arrêté du 9 avril 2018 (mais également pour respecter les prescriptions du cahier des charges DigAgri1), la seule utilisation possible d'un digestat avec présence de Salmonelles est l'élimination. Dans la pratique, cela conduit à des impasses, car il n'existe pas ou peu de sites d'incinération capables de recevoir de telles quantités de matière liquide. Ces effluents bruts qui peuvent contenir de la Salmonelle par exemple en petite quantité (car la valeur seuil est 0) auraient été épandus dans les champs s'ils n'avaient pas été méthanisés, car il n'y aurait pas eu d'analyses avant épandage. L'avantage de la méthanisation à assurer une meilleure traçabilité devrait laisser la possibilité aux exploitants d'épandre ces digestats sur cultures de vente (en excluant tout épandage sur fourrage) tout en identifiant les causes de la contamination.

Si l'unité peut garantir l'absence du pathogène dans la zone de collecte alors le risque devient nul et les vecteurs de contamination (transport, digestat) n'ont pas à être suivi d'une manière aussi draconienne. Il faut toutefois pouvoir mettre des moyens de prévention en place si le pathogène apparaît.

B. MAITRISER LES VECTEURS DE CONTAMINATION

En considérant que l'animal sera infecté par ingestion du pathogène, la source de contamination est sa nourriture, l'eau d'abreuvement et l'air qu'il respire (pour les pathogènes se disséminant par voie aérienne). Il faut donc identifier les vecteurs potentiels de contamination.

- Contamination de la nourriture et de l'eau par les engins de transport

Cette contamination peut se faire par le vecteur des engins de transport. Lorsque l'engin vient sur site il peut soit contaminer directement le fourrage en roulant à proximité (si l'unité de méthanisation est annexée à un élevage) soit disséminer des germes pathogènes sur le passage des tracteurs qui viendront ensuite distribuer le fourrage.

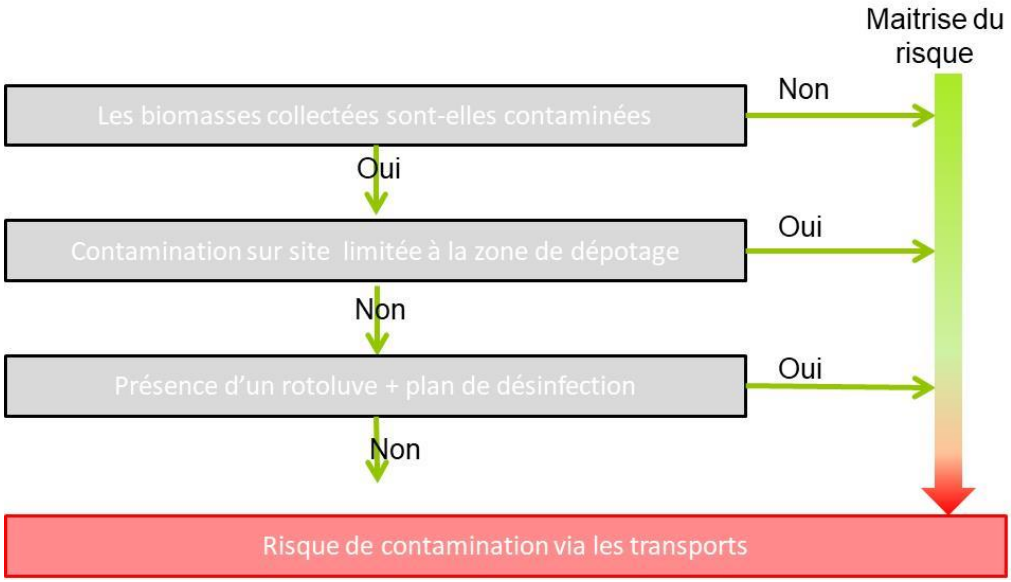
Les moyens de préventions sont dans ce cas :

- Définir des plans de circulation permettant d'assurer une marche en avant sur le site de méthanisation
- Veiller à la propreté du site de méthanisation

Pour les sites collectifs :

- Réfléchir aux emplacements des stockages de fumiers et aux déplacements des engins de manutention sur cette zone de chargement/ déchargement. Dans le cas des sites collectifs, le stockage des fumiers en fosse avec reprise au grappin, permet d'éviter aux engins venant apporter des fumiers frais de rouler sur du fumier stocké.
- Nettoyage des roues des camions et embouts des bras de la tonne lisier. La présence d'un rotoluve pourra être envisagée pour les sites les plus importants.

Photo : exemple de dépotage de fumier dans un stockage en fosse profonde



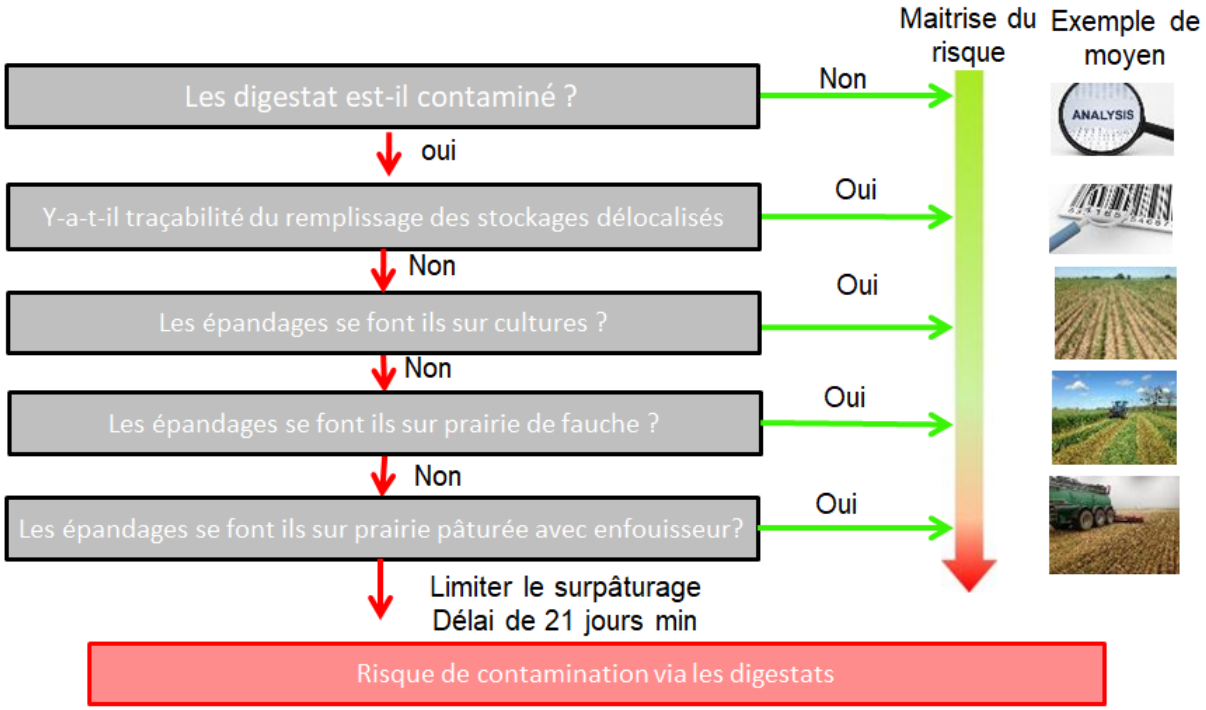
- Contamination de la nourriture et de l'eau par le digestat

Cette contamination peut se faire par l'épandage de digestat contaminé. Dans le cas d'épandage sur cultures de vente, le délai entre apport de digestat (par exemple en sortie d'hiver) et la récolte est suffisamment long pour qu'il n'y ait pas de risque de contamination dans la chaîne alimentaire. En zone d'élevage, une majorité des épandages se font avant le semis de maïs. Dans ce cas il n'y a pas de

contact avec le fourrage qui sera récolté 5 mois plus tard. Pour le cas des prairies de fauche l'apport aura lieu au moins 30 à 45 jours avant la récolte et le digestat ne sera pas épandu directement sur le fourrage. Lors de la fauche l'andain sera mis au sol mais le chaume de la prairie assure une certaine distance entre le sol qui aura reçu du digestat 30 ou 45 jours avant l'herbe fauchée.

Le risque est le plus fort en cas d'épandage suivi de pâture, mais des moyens de prévention existent :

- Connaitre la qualité sanitaire des digestats par analyse régulière
- Gérer le stockage en lot permettant en cas de problème sanitaire de valoriser le digestat avant un travail du sol puis semis d'une culture
- Epandage avec disques enfouisseurs ou sabot pour limiter la présence de digestat sur le sol
- Délai de 21 jours avant retour des animaux au pâturage (délai toutefois insuffisant pour certains pathogènes). Ce délai pourrait être rallongé à 5 ou 6 semaines.



- <u>Contamination par voie aérienne</u>

Cette contamination peut se faire par dissémination via les engins de transport ou lors des épandages. Pour ce dernier point, l'épandage à la buse/palette est déjà proscris compte tenu du risque volatilisation de l'ammoniac (Règlementation ICPE). L'usage des pendillards limitera fortement la dissémination des germes pathogènes dans l'air.

C. REDUIRE LES PATHOGENES LORS DE LA DIGESTION

La grande partie de la demande d'agrément sanitaire va se concentrer sur la maîtrise du procédé de digestion (assurer la maîtrise de la température et du pH notamment), faisant de la digestion le point de contrôle de maitrise ou CCP (Critical Control Point) dans l'étude HACCP des projets.

Une bonne compétence dans le suivi biologique est donc nécessaire, que l'exploitant devra acquérir par des formations initiales et/ou continues.

Cela va permettre en effet d'installer la flore bactérienne qui fera compétition dans le milieu et pourra empêcher le développement incontrôlé de germes pathogènes.

Enfin, lorsque l'analyse des dangers l'identifie, et notamment lorsque l'étude de la prévalence de certaines maladies le rend nécessaire, il pourra être nécessaire d'ajouter un traitement thermique supplémentaire :

- Par batch thermophile en amont ou en aval de la digestion ;
- Par hygiénisation à 70°C en amont de la digestion ;
- Par hygiénisation à 70°C en aval.

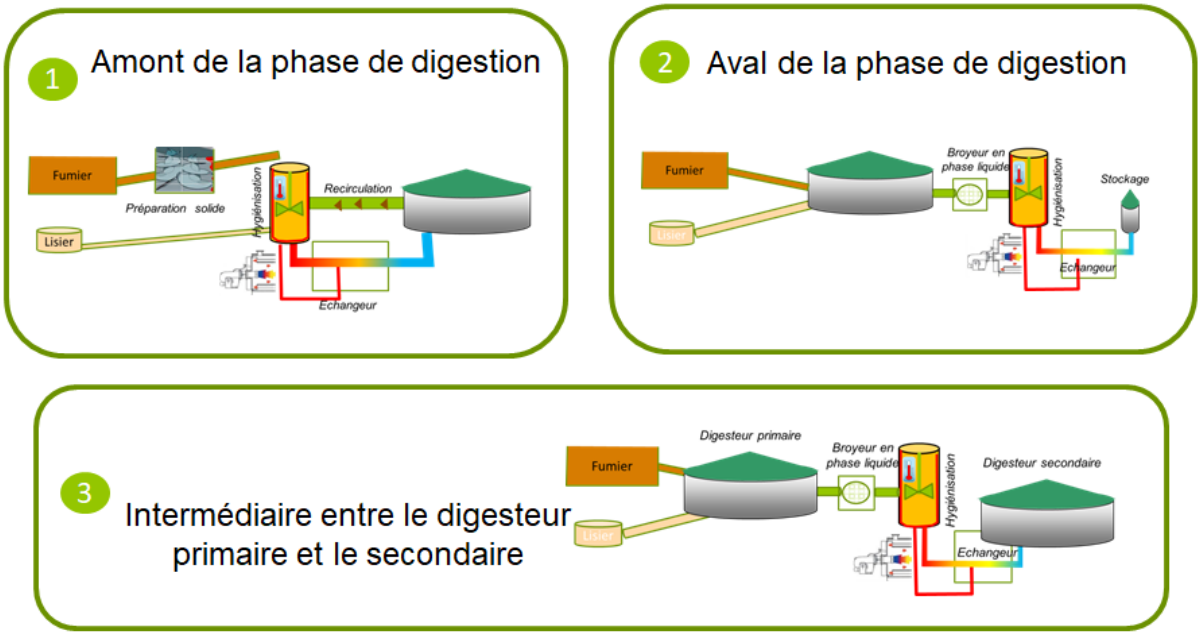
L'étude technico-économique présentée dans le paragraphe suivant regarde la faisabilité des différentes solutions techniques.

VI. EVALUATION TECHNICO-ECONOMIQUE DE METHODES D'HYGIENISATION DES EFFLUENTS D'ELEVAGE

L'hygiénisation en amont des SPAC3 par pasteurisation à 70°C se fait actuellement sur des sites de méthanisation industriels ou à la ferme. Lorsque la quantité d'effluent à traiter est limitée, la mise en œuvre d'une étape d'hygiénisation, qui plus est pour des gisements de déchets à redevance, ne pose pas de soucis technico-économiques majeurs.

La situation est plus complexe lorsqu'il s'agit d'hygiéniser l'ensemble des effluents d'élevage, qui peuvent constituer jusqu'à 100% des intrants d'un projet de méthanisation collectif. Se pose plusieurs questions :

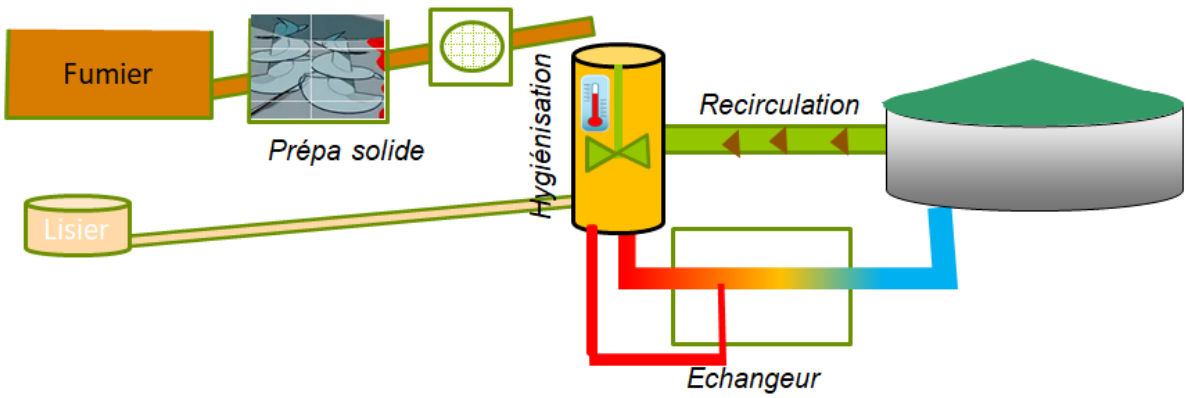
Quel positionnement de l'étape d'hygiénisation par rapport à la digestion ?



A. HYGIENISATION A 70°C /60 MINUTES

- **En amont de la digestion**

Schéma de principe :



Pour rappel, le règlement Européen 142/2011 impose que l'étape d'hygiénisation soit équipée de :

- Moyens de mesure de la température en continu correctement étalonnés
- Moyens d'enregistrement et traçabilité à conserver sur le site
- Equipement de sécurité en cas de défaillance du système de chauffe
- Moyens pour assurer que l'étape de traitement thermique ne peut pas être by-passé

Dans le cas où l'on devrait hygiéniser des effluents d'élevage en amont de la digestion, les équipements spécifiques à prévoir sont :

- Ligne de préparation des solides, comprenant un broyeur
- Un échangeur tubulaire
- Une ou plusieurs cuves d'hygiénisation
- Augmentation de la puissance de la chaudière (sites avec injection de biométhane) ou nouvel échangeur thermique (sites avec cogénération)

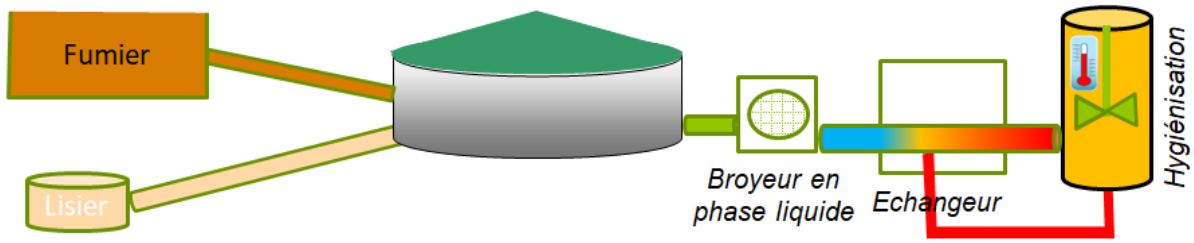
Les effluents d'élevage en tant que matières dérogatoires n'ont pas nécessairement besoin de respecter le critère de taille des particules inférieur à 12mm. Il est néanmoins nécessaire de broyer les fumiers pour assurer leur dilution et leur pompabilité. Par ailleurs des matières trop grossières font baisser l'efficacité du traitement thermique. (Tout en gardant en mémoire que la pasteurisation n'affectera pas les kystes et bactéries sporulées, peu importe sa position par rapport au procédé.)

Avantages et inconvénients :

Hygiénisation AMONT 70°C	Avantages	Inconvénients
Réglementaire	Répond à l'arrêté SPA	
Economique		Vente en moins de biométhane ou d'eau chaude
Sanitaire	Détruit les agents pathogènes hors kystes et bactéries sporulantes le plus tôt possible après leur entrée sur le site.	Possible destruction de la flore méthanogène ? Les travaux menés actuellement dans le cadre du projet Clodia[7] tendent à rassurer sur ce point.
Consommation énergétique		Utilisation de biogaz et forte consommation électrique.
Technique et cout d'exploitations		Entretien des échangeurs, temps de préparation et cout de maintenance des équipements Cuves d'hygiénisation sensibles aux inertes, Besoin d'une forte recirculation pour avoir un produit pompable Difficulté de travailler une biomasse brute non hydrolysée, sèche avec des inertes

- **En aval de la digestion**

Schéma de principe :



[7] D'après Anne-Marie Pourcher, IRSTEA de Rennes.

Equipements à prévoir :

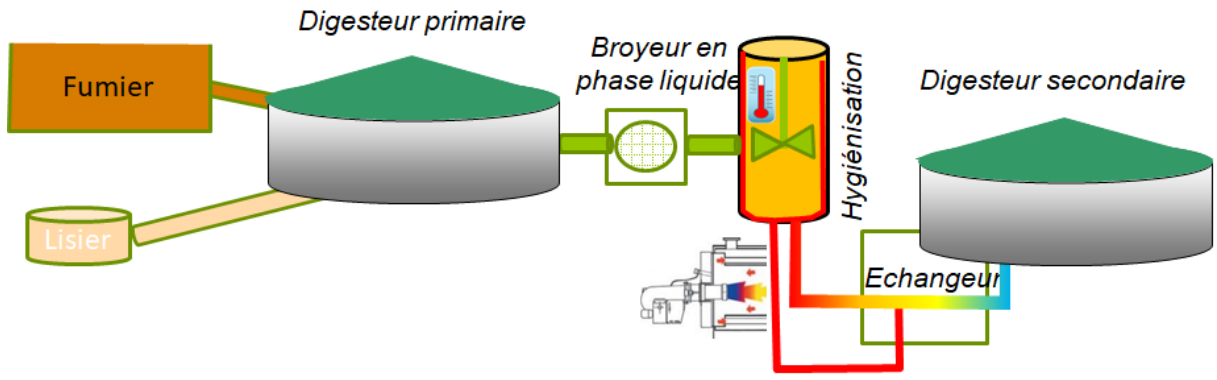
- Broyeur en phase liquide
- Echangeur tubulaire
- Une ou plusieurs cuves d'hygiénisation en fonction du volume
- Augmentation de la puissance de la chaudière (sites avec injection de biométhane) ou nouvel échangeur thermique (sites avec cogénération)

Avantages et inconvénients :

Hygiénisation AVAL 70°C	Avantages	Inconvénients
Réglementaire		Dérogation à demander vis-à-vis de l'arrête SPA
Economique	En injection possibilité d'acheter du gaz naturel pour la montée à 70°C et valoriser la chaleur fatale de l'hygiénisation pour chauffer la biomasse entrante : donc la vente de biométhane augmente.	En cogénération, la chaleur disponible pour la vente ou la valorisation diminue
Sanitaire		Risques de recontamination du digestat lors du transport ? (à vérifier)
Consommation énergétique	Meilleur efficacité énergétique pour chauffer la biomasse déjà entre 37 et 50 °C et en phase liquide	
Technique et coûts d'exploitation	Pompe + broyage en phase liquide plus facile à entretenir	Même après échangeur, envoi d'un digestat chaud en stockage et/ou traitement de digestat type presse à vis : sollicitation du matériel et risque de perte de NH3

- **Entre un digesteur primaire et secondaire**

Schéma de principe



Equipements à prévoir :

- Broyeur en phase liquide
- Echangeur tubulaire
- Une ou plusieurs cuves d'hygiénisation en fonction du volume
- Augmentation de la puissance de la chaudière (sites avec injection) ou nouvel échangeur thermique (sites avec cogénération)

Avantages et inconvénients :

Hygiénisation 70°C entre 2 digesteurs	Avantages	Inconvénients
Réglementaire		Dérogation à demander vis-à-vis de l'arrête SPA
Economique	En injection possibilité d'acheter du gaz naturel pour la montée à 70°C et valoriser la chaleur fatale de l'hygiénisation pour chauffer la biomasse entrante : donc la vente de biométhane augmente.	En cogénération, la chaleur disponible pour la vente ou la valorisation diminue
Sanitaire	Pas de risque de re-contamination	Destruction des bactéries non sporulées et des archées méthanogènes. Quel impact sur la production de biogaz résiduel ?
Consommation énergétique	Meilleur efficacité énergétique pour chauffer la biomasse déjà entre 37 et 50 °C et en phase liquide	
Technique et cout d'exploitations	Pompe + broyage en phase liquide plus facile à entretenir	Besoin de garantir la baisse de température avec envoi dans le secondaire Non réalisable sur certaines installations

Quelles solutions techniques existent pour assurer les 70°C/1 heure et les coûts sont-ils supportables ?

- **Cuve d'hygiénisation fonctionnant en batch**

Détail de l'équipement et mode de chauffage :

- Cuve inox calorifugée double enveloppe
- Chauffage par « bain marie »
- Pompe dilacératrice + agitateur

Cet équipement est relié au tuyau d'arrivée de la biomasse et au digesteur. Lors de la sortie de la cuve le digestat doit passer dans un échangeur afin de diminuer la température qui devra être acceptable en entrée de digesteur. Pour des unités traitant plusieurs 10 000 T de digestat il faudra plusieurs cuves de 15 à 20 m^3 de capacité.

Etape et durée d'un batch :

- Remplissage de la cuve
- Montée en température à 70°C
- Maintien de la température
- Vidange

La durée d'un batch varie en fonction de la température de la biomasse à l'entrée de la cuve, du débit des pompes et de la température dans la double enveloppe. Ce temps peut varier de 2 h à 4 h selon les constructeurs.

Ex de cuve d'hygiénisation en batch :
Biochop de LANDIA

- **Hygiénisation en flux continu**

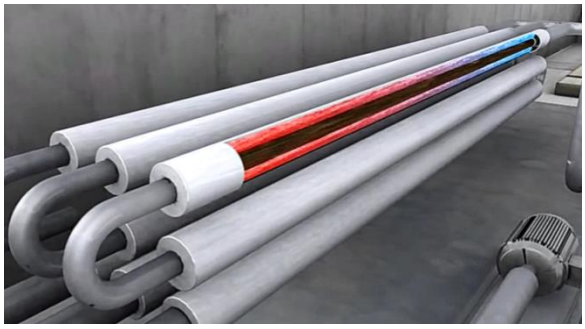
Ce type d'hygiénisation est courant en IAA où la matière est plus facile à chauffer et risque moins de colmater les échangeurs

D'un point de vue technique, il faut prévoir des échangeurs tubulaires corrugués pour faciliter les échanges et limiter les encrassements. Pour des volumes importants de digestats à hygiéniser, il faut prévoir des sections et des longueurs de tube importants : plusieurs dizaines de mètres.

Etape et durée d'un batch :

La biomasse rentre dans les tubes et monte à 70 à °C. Elle est ensuite maintenue à température, et la biomasse va rester 60 min dans l'échangeur. Les calculs de débit des pompes et longueur de l'échangeur sont calculés sur cette bases afin de garantir le temps de séjour dans l'échangeur.

Sortie de cette échangeur la biomasse continuera dans un 2ème échangeur afin de faire diminuer la température du digestat est permettre de recycler une partie de la chaleur.



Exemple d'hygiénisation en continu par échangeur tubulaire

- **Hygiénisation en flux semi-continu**

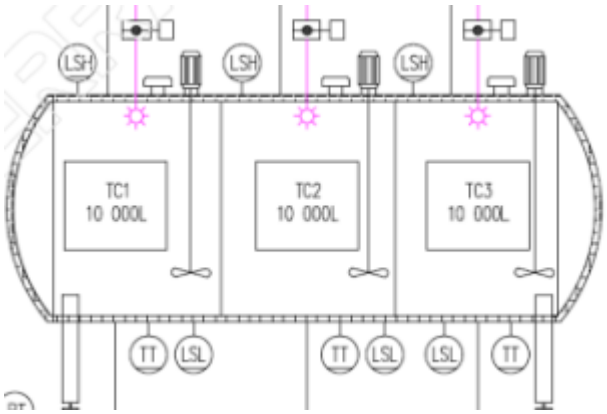
Ce système compile les 2 précédents. La biomasse est d'abord chauffée à 70°C dans des échangeurs tubulaires. Une fois la température atteinte, au lieu de faire le temps de séjour de 60 min dans un tube, la biomasse chaude est envoyée dans une cuve dans laquelle elle est maintenue à température. En installant 2 ou 3 cuves (une en remplissage, une en maintient l'autre en vidange), cela permet d'avoir une alimentation en continue, tout en garantissant les 60 min à 70 °C en batch. Ce système est notamment utilisé dans l'agro-aimentaire.

Etape et durée d'un batch :

La biomasse rentre dans les tubes et monte à 70°C. Elle passe ensuite dans les cuves pour être maintenue à température pendant 60 min.

Sortie de cette cuve, la biomasse continuera dans un 2ème échangeur afin de faire diminuer la température du digestat est permettre de recycler une partie de la chaleur.

Le dimensionnement de l'installation permettra d'avoir un cycle très court entre 1 h et 1h30 et ainsi d'optimiser le cout énergétique et les investissements.



Système de cuves en série
Schéma LG Conseil

- **Comparaison des systèmes**

	Avantages	Inconvénients
En batch	Système éprouvé Facilité d'entretien Système de chauffage rustique avec usage limité d'échangeur	Temps de chauffe de la biomasse par la double enveloppe longueur Cycle assez long > 3H, nécessitant l'installation de plusieurs cuves Besoin en énergie important
En continu	Fonctionnement régulier avec moins d'appel de puissance : dimensionnement des équipements de pompage, chaudière et échangeur plus faible, Installation simple : pas de cuve ni brasseur	Investissement Temps de maintien en température plus difficile à garantir Longueur des échangeurs Risque de bourrage et colmatage de l'installation pour des matières très pailleuses Besoin de surface d'échange importante donc longueur de tuyau + difficile à mettre en œuvre en amont de la phase de digestion
En semi-continu	Consommation énergétique plus faible Garantie des 60 min Fonctionnement régulier	Investissement plus important Entretien des échangeurs tubulaires + difficile à mettre en œuvre en amont de la phase de digestion

- **Analyse économique**

L'analyse économique évalue l'impact de la mise en œuvre de l'hygiénisation de la totalité des effluents d'élevage avec les différentes solutions décrites précédemment. Elle est réalisée pour un projet type valorisant 75 000 T d'effluents annuels sur la base de devis. Les calculs thermiques ont été proposés par les fournisseurs.

- Les charges :
  - Prise en compte du matériel à acquérir amorti sur 12 ans
  - Entretien et consommables liées à cet atelier, notamment achat de gaz naturel pour le chauffage dans le cas de l'injection biométhane
  - Main d'œuvre supplémentaire : +0.2 ETP
- Impact sur le chiffre d'affaire :
  - Vente supplémentaire de biogaz si valorisation de la chaleur fatale de l'hygiénisation

- Chaleur à valoriser en moins dans le cas de la cogénération (impact qui peut être faible si la chaleur est mal valorisée)

Le détail des calculs se trouve en *Annexe 3*

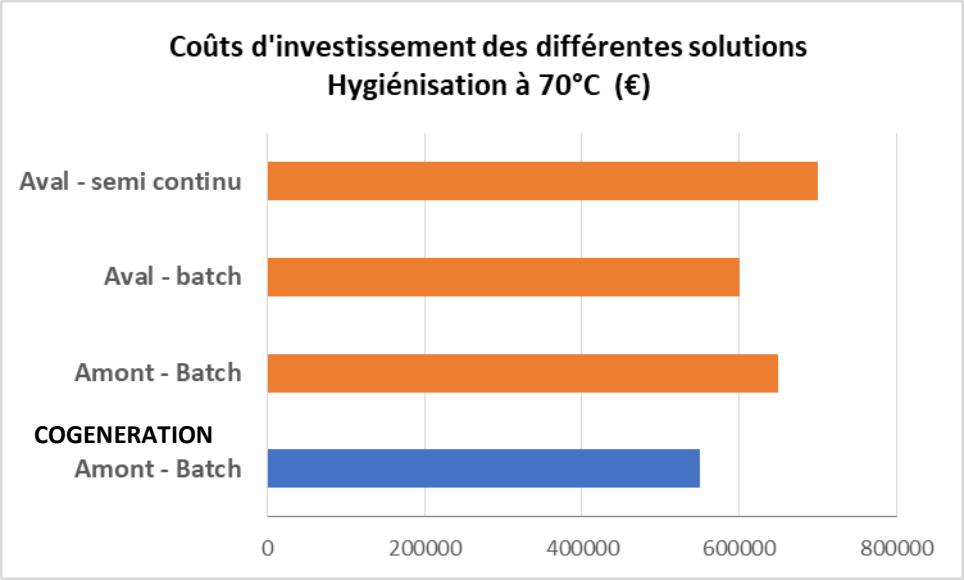
Synthèse économique :

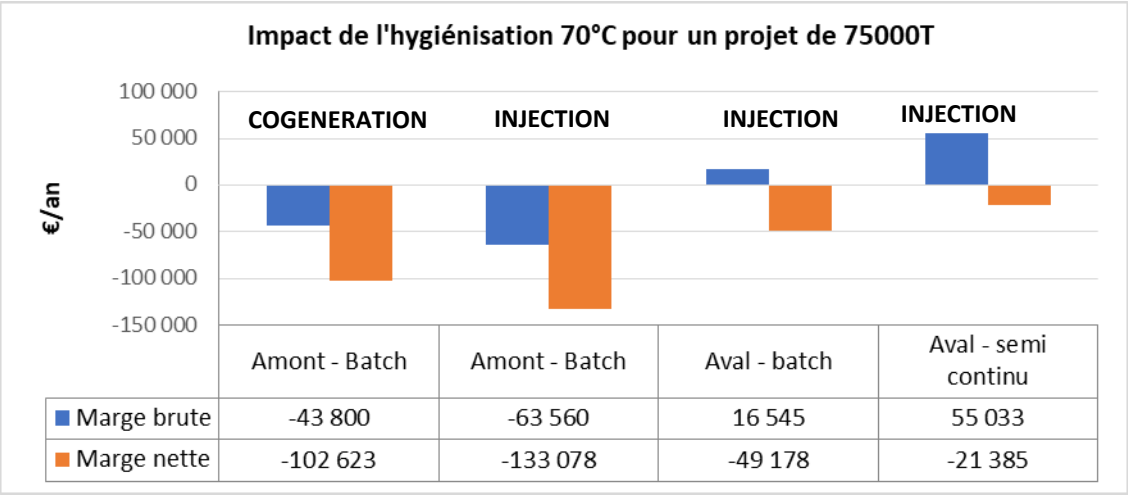
L'hygiénisation en amont des effluents des élevages (avec fumiers) à 70°C pendant une heure n'est pas faisable économiquement, cela représente un coût annuel de 100 à 130 k€ pour un projet de 75 000T :

- Augmentation des investissements de 5 à 10 %
- Dépenses électriques : + 5 %
- En injection, un chiffre d'affaire liée à la vente de biométhane en moins autours de 10 % malgré les échangeurs

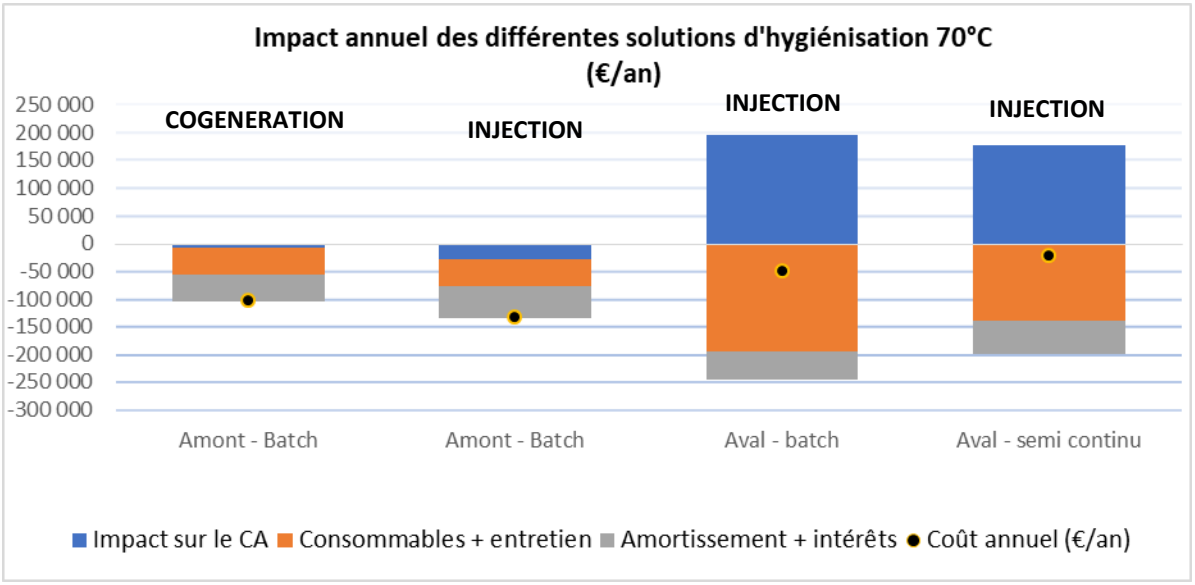
En injection, l'hygiénisation post-digestion est réalisable économiquement, à condition d'optimiser le bilan énergétique avec une hygiénisation en semi-continu (récupération de thermie pour chauffer les intrants). Du fait de l'utilisation de gaz naturel pour les besoins thermiques de l'hygiénisation, le bilan sur la marge brute pourrait même être positif. Néanmoins, cela représente des coûts d'investissement très élevés (700k€ pour un projet de 75000T), qui grèvent la marge nette. Dans le contexte où le financement des projets agricoles peut déjà s'avérer difficile, il convient d'être prudent sur la généralisation de ce type d'investissement.

Enfin, **la mise en conformité d'un site déjà en fonctionnement qui n'a pas prévu l'hygiénisation n'a pas été étudié, mais sera forcément plus lourde à mettre en place** : VRD à casser, tuyauteries et canalisations à rajouter et gestion des flux moins optimisée.





	Amont - Batch	Amont - Batch	Aval - batch	Aval - semi continu
Marge brute	-43 800	-63 560	16 545	55 033
Marge nette	-102 623	-133 078	-49 178	-21 385



Comparaison économique de l'hygiénisation : Exemple projet 75 000 T

Détail technique du projet					
tonnage annuel hors recirculation	75 000 T	Prix gaz net	4,5 cts/kwh	Prix biométhane	9 cts/kwh
tonnage annuel avec recirculation	120 000 T	Prix élec	10 cts/kwh		

OPEX	Hygién. Amont -cogé	Hygién. Amont -inject	Hygién. aval-inject	Hygiéni. aval optimisé-inject	Unité
Besoin **net** de thermie en GN- montée de t°C de 37 à 70 °C	0	0	3 291 000	2 100 000	kwh
Besoin en biométhane autoconsommé	0	2 730 000	0	230 000	kwh
Conso electrique (pompe, broyeur, agitateur)	122 000	122 000	122 000	93 075	kwh
Cout gaz à la T de biomasse entrante (90 % efficacité)	0,0	0,0	43,9	28	kwh/t
Cout gaz à la T de biomasse traitée (90 % efficacité)	0,0	0,0	27,4	0	kwh/t
Cout électricité à la T de biomasse entrante	1,6	1,6	1,6	1	kwh/t
Cout électricité à la T de biomasse traitée	1,0	1,0	1,0	0	kwh/t
Dépense conso énergie en plus (gaz nat + élect)	-12 200	-12 200	-160 295	-103 808	**€/an**
Energie récupérée sur le process : biométhane vendu en +	0	0	2 176 000	1 976 000	kwh/an
Recette supplémentaire biomethane	0	0	195 840	177 840	**€/an**
Chaleur ou biométhane non vendus, utilisé pour l'hygiéniser	-7 600	-27 360	0	0	**€/an**
Consommable : couteaux broyeur, lobbe pompe, entretien	-15 000	-15 000	-10 000	-10 000	**€/an**
Cout salarié = 0,2 ETP	-9 000	-9 000	-9 000	-9 000	**€/an**
Bilan marge brute par an	-43 800	-63 560	16 545	55 033	**€/an**

CAPEX et entretien matériel	Hygién. Amont -cogé	Hygién. Amont -inject	Hygién. aval-inject	Hygiéni. aval optimisé-inject	Unité
Investissement	550 000	650 000	600 000	700 000	€
Amortissement installation	45 833	54 167	50 000	58 333	€/an
Vérification périodique chaudière	0	0	1 500	1 500	€/an
Entretien gros matériel	11 000	13 000	12 000	14 000	€/an
Cout de la dette	1 989	2 351	2 223	2 584	€/an
Cout capex annualisé sur 12 ans	-58 823	-69 518	-65 723	-76 418	€/an

Bilan annuel de l'hygiénisation	-102 623	-133 078	-49 178	-21 385	€/an

B. SOLUTIONS ALTERNATIVES A L'HYGIENISATION DE TOUS LES EFFLUENTS 70°C – 1 HEURE

- Batch thermophile

Dans plusieurs Pays, l'hygiénisation est assurée par une montée en température autour de 53-57°C pendant plusieurs heures (6 heures à 55°C par exemple). Le régime thermophile permet en effet d'assurer un taux d'abattement important sur de nombreux pathogènes. Le point à respecter est de pouvoir assurer un temps de rétention minimum garanti, pendant lequel aucune matière fraîche n'est incorporée et aucune matière n'est soutirée. Ce fonctionnement en mode batch peut se positionner en amont ou en aval d'un digesteur thermophile ou mésophile.

Un digesteur thermophile pourrait aussi bien faire office d'étape d'hygiénisation mais à condition de garantir le temps de séjour minimal (l'incorporation de matière fraîche devra donc être séquentielle) et de respecter le maintien de la température et la traçabilité. Les digesteurs pistons thermophiles sont notamment de bons candidats pour cette méthode.

Afin de faire valider cette méthode comme alternative à l'hygiénisation auprès de la DD(CS)PP concernée, le processus de validation à respecter est décrit en Annexe V du Règlement 142/2011 (cf partie IV.A)

Pour apporter les preuves d'efficacité sur l'abattement en pathogènes demandés, le coût des analyses et du montage du dossier avoisinerait les 30 000€[8].

Avantages et inconvénients

Hygiénisation Batch thermophile	Avantages	Inconvénients
Réglementaire		Méthode à faire valider selon l'annexe V du règlement 142/2011
Economique		Besoins d'échangeurs de chaleur pour optimiser la consommation énergétique. La possibilité d'utiliser du gaz naturel parait peu probable.
Sanitaire	Abattement du pathogène tout en maintenant la flore méthanogène	
Consommation énergétique	Consommation énergétique moindre qu'à 70°C	
Technique et cout d'exploitations		

- Traitement partiel du digestat

Enfin d'autres alternatives peuvent être proposées en fonction de l'analyse des dangers. Il est par exemple possible, de prévoir l'équipement d'une cuve d'hygiénisation, mais de la réserver en solution de secours en cas de non-conformité d'un lot de digestat. Dans ce cas, il convient de fonctionner avec un nombre de lots importants et multiplier les stockages

Fonctionnement :

1- Prise d'échantillon au niveau du post-digesteur
2- Attente retour d'analyse
3- Si le digestat est conforme, il peut être envoyé dans une des fosses de stockage
4- Si le digestat est non-conforme, il passe une étape d'hygiénisation. Un nouvel échantillon est pris après l'hygiénisation et peut être envoyé en stockage après validation de sa conformité

[8] Communication personnelle, pour une prestation réalisée par Elsinga Policy Planning

Il est également possible de ne traiter que partiellement le digestat, en fonction des usages de celui-ci si l'étude des dangers le justifie. Notamment en cas de paratuberculose identifiée chez des apporteurs de fumiers à un site collectif, l'hygiénisation pourrait être réservée uniquement pour le digestat liquide envoyé sur pâture. Cela permet de diminuer le dimensionnement de la cuve d'hygiénisation et de limiter l'impact sur la consommation énergétique.

VII. CONCLUSION

D'un point de vue sanitaire, l'impact de la digestion anaérobie sur les effluents d'élevage est variable en fonction des microorganismes pathogènes et en fonction des procédés de digestion. La réduction en élément pathogène peut atteindre 99.99% pour certaines bactéries ou virus, alors que d'autres pathogènes résistants à la chaleur ne seront pas du tout réduits au cours de la digestion. D'un point de vue sanitaire, il faut retenir que les digestats sont de qualité au moins équivalente à celles des effluents bruts et améliorée pour certains pathogènes (*Salmonella, E.coli*…) Les procédés de digestion thermophile réduisent plus significativement les cellules végétatives, virus et parasites qu'en régime mésophile.

Le retour au sol des digestats doit donc se faire avec les mêmes bonnes pratiques d'hygiène que les épandages d'effluents bruts : pas de pâturage avant 21 jours sur des parcelles ayant reçu du digestat, ne pas manger ni boire sur les lieux d'épandage, mettre en place un plan de maîtrise sanitaire sur les unités de méthanisation. La mise en commun des effluents de plusieurs exploitations dans un même digesteur pourrait être un vecteur de contamination d'agents pathogènes d'un élevage à un autre. Néanmoins l'impact de la méthanisation est à relativiser au regard des pratiques actuelles en zone d'élevage : le matériel d'épandage est très souvent mis en commun, les épandages chez les tiers sont très fréquents. Pour minimiser le risque de contamination via les transports, des moyens de nettoyage et de désinfection peuvent être mis en place sur les unités de méthanisation. De plus l'agrément sanitaire des unités imposent la mise en place d'analyses bactériologiques qui permettent de mieux apprécier la qualité sanitaire des produits avant leur épandage.

Dans tous les cas, l'analyse des dangers doit identifier dans le contexte local, à partir des bilans sanitaires des apporteurs d'effluents et au regard de la prévalence de certaines maladies chez les apporteurs si la situation nécessite la mise en place de procédé hygiénisant ou si une dérogation à sa mise en place peut être demandée aux services vétérinaires de la préfecture.

En effet l'utilisation de fumiers, lisiers étant encadrée par la règlementation sur les sous-produits animaux, leur usage en méthanisation sans traitement préalable est dérogatoire. Parmi les 5 Pays/Régions étudiés, plusieurs stratégies ont été mises en place. Des paramètres nationaux ont été établis par exemple au Royaume-Uni (57°C/5heures) Les sites de taille importante fonctionnent généralement en thermophile et font valider leur couple temps/température comme méthode de traitement alternatif à l'hygiénisation (Danemark, Pays-Bas, Belgique Flamande). Dans aucun des Pays étudiés, un seuil de volume ou de nombre d'apporteurs d'effluents n'a été mis en place dans la règlementation nationale. Localement, les autorités compétentes imposent parfois l'hygiénisation à 70°C/1 heure, en fonction du contexte.

Si l'hygiénisation de tous les effluents doit être mise en place, son positionnement par rapport au procédé impacte fortement sa faisabilité technico-économique. Parmi les simulations étudiées, seul le positionnement en aval avec un procédé de type semi-continu est réaliste d'un point de vue économique, mais reste très lourd à supporter. Dans le cas de la cogénération, l'impact sera dépendant de la valorisation de la chaleur. Dans tous les cas, la faisabilité dépend du type d'effluent à traiter et du volume à traiter par rapport au reste des biomasses méthanisées. Il faut néanmoins garder en tête que l'hygiénisation n'affectera pas tous les pathogènes et que l'exploitation de l'unité d'hygiénisation avec un volume important de fumiers reste délicat, avec peu de retours d'expérience. Les risques de sous-estimations des coûts de fonctionnement et de maintenance sont donc réels. Cela ne doit donc pas être la seule mesure de maîtrise du risque sanitaire pour les unités, mais un des moyens à la disposition des exploitants.

D'autres mesures sont à renforcer sur les sites collectifs : suivi de la qualité de la biomasse entrante, amélioration de la traçabilité, formations à la biosécurité généralisées pour les apporteurs de biomasses et repreneurs de digestats, amélioration des procédures de nettoyage des engins de transport...

Références bibliographiques

Albihn, A., Vinnerås, B., 2007. Biosecurity and arable use of manure and biowaste — Treatment alternatives. Livest. Sci. 112, 232–239. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2007.09.015

Anses - Saisine 2016-SA-0027, 2016. Avis de l'Agence nationale de la sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à l'évaluation des conditions d'assainissement des bâtiments d'élevage de volailles vis-à-vis du risque d'influenza aviaire.

Avery, L.M., Anchang, K.Y., Tumwesige, V., Strachan, N., Goude, P.J., 2014. Potential for Pathogen reduction in anaerobic digestion and biogas generation in Sub-Saharan Africa. Biomass Bioenergy 70, 112–124. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.01.053

Bagge, E., Sahlström, L., Albihn, A., 2005. The effect of hygienic treatment on the microbial flora of biowaste at biogas plants. Water Res. 39, 4879–4886. https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.03.016

Bendixen, H.., n.d. Hygiene en sanitation requirements in Danish biogas plants.

Bonetta, Si, Ferretti, E., Bonetta, Sa, Fezia, G., Carraro, E., 2011. Microbiological contamination of digested products from anaerobic co-digestion of bovine manure and agricultural by-products. Appl. Microbiol. 53, 552–557.

Bonhotal, J. Schwarz, M., Stehman, S.M., 2011. How Mycobacterium avium paratuberculosis is affected by the composting process. Trends Anim Vet Sci J 2011 2(1):5-10

Chen, Y., Fu, B., Wang, Y., Jiang, Q., Liu, H., 2012. Reactor performance and bacterial pathogen removal in response to sludge retention time in a mesophilic anaerobic digester treating sewage sludge. Bioresour. Technol. 106, 20–26. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.093

Coelho, J.J., Prieto, M.L., Dowling, S., Hennessy, A., Casey, I., Woodcock, T., Kennedy, N., 2018. Physical-chemical traits, phytotoxicity and pathogen detection in liquid anaerobic digestates. Waste Manag. 78, 8–15. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.017

Côté, C., Massé, D.I., Quessy, S., 2006. Reduction of indicator and pathogenic microorganisms by psychrophilic anaerobic digestion in swine slurries. Bioresour. Technol. 97, 686–691. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.03.024

Couturier, C., Galtier, L., 1998. Etat des connaissances sur le devenir des germes pathogènes et des micropolluants au cours de la méthanisation des déchets et sous-produits organiques. 98.

Davidson, I., S. Nagar, R. Haddas, M. Ben-Shabat, N. Golender, E. Lapin, A. Altory, L. Simanov, I. Ribshtein, A. Panshin and S. Perk. , 2010. Avian Influenza Virus H9N2 Survival at Different temperatures and pHS. Avian Diseases. DOI: 10.1637/8736-032509-ResNote.1

Dennehy, C., Lawlor, P.G., McCabe, M.S., Cormican, P., Sheahan, J., Jiang, Y., Zhan, X., Gardiner, G.E., 2018. Anaerobic co-digestion of pig manure and food waste; effects on digestate biosafety, dewaterability, and microbial community dynamics. Waste Manag. 71, 532–541. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.047

European Food Safety Authority (EFSA), 2007. Opinion of the Scientific Panel on biological hazards (BIOHAZ) on the safety vis-à-vis biological risk of the mesophilic process of biogas and compost treatment of Animal By-Products (ABPs): Opinion of the Scientific Panel on biological hazards (BIOHAZ) on the safety vis-à-vis biological risk of the mesophilic process of biogas and compost. EFSA J. 5, 465. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2007.465

Fröschle, B., Heiermann, M., Lebuhn, M., Messelhäusser, U., Plöchl, M., 2015. Hygiene and Sanitation in Biogas Plants, in: Guebitz, G.M., Bauer, A., Bochmann, G., Gronauer, A., Weiss, S. (Eds.), Biogas Science and Technology. Springer International Publishing, Cham, pp. 63–99. https://doi.org/10.1007/978-3-319-21993-6_3

Gadre, R.V., Ranade, D.R., Godbole, S.H., 1986. A note on survival of salmonellas during anaerobic digestion of cattle dung. J. Appl. Bacteriol. 60, 93–96. https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.1986.tb03364.x

Henry, D.P., Frost, A.J., Samuel, J.L., O'Boyle, D.A., Thomson, R.H., 1983. Factors affecting the survival of Salmonella and Escherichia coli in anaerobically fermented pig waste. J. Appl. Bacteriol. 55, 89–95. https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.1983.tb02651.x

Horan, N.J., Fletcher, L., Betmal, S.M., Wilks, S.A., Keevil, C.W., 2004. Die-off of enteric bacterial pathogens during mesophilic anaerobic digestion. Water Res. 38, 1113–1120. https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.12.004

Jiang, Y., Dennehy, C., Lawlor, P.G., Hu, Z., Zhan, X., Gardiner, G.E., 2018. Inactivation of enteric indicator bacteria and system stability during dry co-digestion of food waste and pig manure. Sci. Total Environ. 612, 293–302. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.214

Kearney, T.E., Larkin, M.J., Frost, J.P., Levett, P.N., 1993a. Survival of pathogenic bacteria during mesophilic anaerobic digestion of animal waste. J. Appl. Bacteriol. 75, 215–219. https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.1993.tb02768.x

Kearney, T.E., Larkin, M.J., Levett, P.N., 1993b. The effect of slurry storage and anaerobic digestion on survival of pathogenic bacteria. J. Appl. Bacteriol. 74, 86–93. https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.1993.tb03000.x

Kunte, Yeole, Chiplonkar, Ranade, 1998. Inactivation of Salmonella typhi by high levels of volatile fatty acids during anaerobic digestion. J. Appl. Microbiol. 84, 138–142. https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.1997.00335.

Le Bouquin, S. Schmitz, A, Pertusa, M., Scoizec, A., Rousset, N., Eterradossi, N, 2017. Evaluation de la survie des virus Influenza aviaires H5N8 dans les lisiers d'élevages de palmipèdes gras. Bulletin épidémiologique, santé animale et alimentation n°80.

Lloret, E., Salar, M.J., Blaya, J., Pascual, J.A., 2013. Two-stage mesophilic anaerobic–thermophilic digestion for sludge sanitation to obtain advanced treated sludge. Chem. Eng. J. 230, 59–63. https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.06.066

Massé, D., Gilbert, Y., Topp, E., 2011. Pathogen removal in farm-scale psychrophilic anaerobic digesters processing swine manure. Bioresour. Technol. 102, 641–646. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.020

Mazzone, P, Corneli, S., Di Paolo, A. Maresca, C., Felici,A., Biagetti, M., Ciullo, M., Sebastiani, C., Pezzotti, G., Leo, S., Ricchi, M., Arrigoni, N., 2018. Survival of Mycobacterium avium subsp. paratuberculosis in the intermediate and final digestion products of biogas plants. Journal of Applied Microbiology 125, 36–44

McKain, N., Hobson, P.N., 1987. A note on the destruction of porcine enteroviruses in anaerobic digestions. Biol. Wastes 22, 147–155. https://doi.org/10.1016/0269-7483(87)90047-4

Olsen, J.E., Jorgensen, J.B, 1985. On the Reduction of Mycobacterium paratuberculosis in Bovine Slurry Subjected to Batch Mesophilic or Thermophilic Anaerobic Digestion. Agricultural Wastes 13 (1985)273-280

Olsen, J.E., 1988. Studies on the reduction of pathogenic and indicator bacteria in liquid pig manure treated by sedimentation and anaerobic filter digestion for methane generation. Biol. Wastes 24, 17–26. https://doi.org/10.1016/0269-7483(88)90023-7

Orzi, V., Scaglia, B., Lonati, S., Riva, C., Boccasile, G., Alborali, G.L., Adani, F., 2015. The role of biological processes in reducing both odor impact and pathogen content during mesophilic anaerobic digestion. Sci. Total Environ. 526, 116–126. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.038

Paek, MR., Lee, YJ., Yoon, H., Kang HM., Kim, MC., Choi JG., Jeong, OM., Kwon, OS. ,Moon, OK., Lee, SJ.,Kwon, JH., 2010. Survival rate of H5N1 highly pathogenic avian influenza viruses
at different temperatures. Poultry Science 89 :1647–1650. doi: 10.3382/ps.2010-00800

Pesaro, F., Sorg, I., Metzler, A., 1995. In Situ Inactivation of Animal Viruses and a Coliphage in Nonaerated Liquid and Semiliquid Animal Wastes. APPL Env. MICROBIOL 61, 6.

Popat, S.C., Yates, M.V., Deshusses, M.A., 2010. Kinetics of inactivation of indicator pathogens during thermophilic anaerobic digestion. Water Res. 44, 5965–5972. https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.07.045

Resende, J.A., Silva, V.L., de Oliveira, T.L.R., de Oliveira Fortunato, S., da Costa Carneiro, J., Otenio, M.H., Diniz, C.G., 2014. Prevalence and persistence of potentially pathogenic and antibiotic resistant bacteria during anaerobic digestion treatment of cattle manure. Bioresour. Technol. 153, 284–291. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.007

Sassi, H., 2018. Comparative survival of viruses during thermophilic and mesophilic anaerobic digestion. Sci. Total Environ. 615, 15-19. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.205

Sahlstrom, L., 2003. A review of survival of pathogenic bacteria in organic waste used in biogas plants. Bioresour. Technol. 6.

Scaglia, B., D'Imporzano, G., Garuti, G., Negri, M., Adani, F., 2014. Sanitation ability of anaerobic digestion performed at different temperature on sewage sludge. Sci. Total Environ. 466–467, 888–897. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.114

Skillman, L.C., Bajsa, O., Ho, L., Santhanam, B., Kumar, M., Ho, G., 2009. Influence of high gas production during thermophilic anaerobic digestion in pilot-scale and lab-scale reactors on survival of the thermotolerant pathogens Clostridium perfringens and Campylobacter jejuni in piggery wastewater. Water Res. 43, 3281–3291. https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.04.031

Slana, I., Pribylova, R., Kralova, A., Pavlik, R., 2011. Persistence of Mycobacterium avium subsp. paratuberculosis at a Farm-Scale Biogas Plant Supplied with Manure from Paratuberculosis-Affected Dairy Cattle. Appl. & Env. Microbiol., May 2011, p. 3115–3119

Smith, S.R., Lang, N.L., Cheung, K.H.M., Spanoudaki, K., 2005. Factors controlling pathogen destruction during anaerobic digestion of biowastes. Waste Manag. 25, 417–425. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.02.010

Sorlini, C., Allievi, L., Ranalli, G., Ferrari, A., 1987. A note on the removal of fecal bacteria in cattle slurry after different farm and laboratory treatments. Biol. Wastes 22, 39–47. https://doi.org/10.1016/0269-7483(87)90098-X

Traub, F., 1986. Method for Determining Virus Inactivation during Sludge Treatment Processes. APPL Env. MICROBIOL 52, 6.

Turner, C., Burton, C.H., 1997. The inactivation of viruses in pig slurries: A review. Bioresour. Technol. 61, 9–20. https://doi.org/10.1016/S0960-8524(97)84693-7

Watanabe, H., Kitamura, T., Ochi, S., Ozaki, M., 1997. Inactivation of pathogenic bacteria under mesophilic and thermophilic conditions. Water Sci. Technol. 36, 25–32.

ANNEXES

Annexe 1 : Synthèse et recommandations

Annexe 2 : Benchmark des règlementations

Annexe 3 : Détail de l'analyse technico-économique