

MÉTHANISATION DES EFFLUENTS ET DÉCHÊTS ORGANIQUES : ÉTAT DES CONNAISSANCES SUR LE DEVENIR PATHOGÈNE

THESE
pour obtenir le grade de
DOCTEUR VÉTÉRINAIRE

DIPLOME D'ÉTAT

*présentée et soutenue publiquement en 2001
devant l'Université Paul-Sabatier de Toulouse*

par

Laurent, Emmanuel MARACHE
Né, le 25 novembre 1974 à PAU (Pyrénées-Atlantiques)

Directeur de thèse : M. le Docteur BRUGERE

JURY

PRESIDENT :
M. DABERNAT

Professeur à l'Université Paul-Sabatier de TOULOUSE

ASSESEUR :
M. BODIN

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

MINISTERE DE L'AGRICULTURE ET DE LA PECHE
ECOLE NATIONALE VETERINAIRE DE TOULOUSE

Directeur par intérim	: M.	G. BONNES
Directeurs honoraires.....	: M.	R. FLORIO
	M.	R. LAUTIE
	M.	J. FERNEY
	M.	G. VAN HAVERBEKE
Professeurs honoraires.....	: M.	A. BRIZARD
	M.	L. FALIU
	M.	C. LABIE
	M.	C. PAVAU
	M.	F. LESCURE
	M.	A. RICO

PROFESSEURS CLASSE EXCEPTIONNELLE

- M. **CABANIE Paul**, Histologie, Anatomie pathologique
- M. **CAZIEUX André, (sur nombre)** Pathologie chirurgicale
- M. **DORCHIES Philippe**, Parasitologie et Maladies Parasitaires
- M. **GUELFY Jean-François**, Pathologie médicale des Equidés et Carnivores

PROFESSEURS 1^{ère} CLASSE

- M. **AUTEFAGE André**, Pathologie chirurgicale
- M. **BENARD Patrick**, Physique et Chimie biologiques et médicales
- M. **BODIN ROZAT DE MANDRES NEGRE Guy**, Pathologie générale, Microbiologie, Immunologie
- M. **BRAUN Jean-Pierre**, Physique et Chimie biologiques et médicales
- M. **CHANTAL Jean**, Pathologie infectieuse
- M. **DARRE Roland**, Productions animales
- M. **DELVERDIER Maxence**, Histologie, Anatomie pathologique
- M. **ECKHOUTTE Michel**, Hygiène et Industrie des Denrées Alimentaires d'Origine Animale
- M. **EUZEBY Jean**, Pathologie générale, Microbiologie, Immunologie
- M. **FRANC Michel**, Parasitologie et Maladies Parasitaires
- M. **GRIESS Daniel**, Alimentation
- M. **MILON Alain**, Pathologie générale, Microbiologie, Immunologie
- M. **PETIT Claude**, Pharmacie et Toxicologie
- M. **REGNIER Alain**, Physiopathologie oculaire
- M. **SAUTET Jean**, Anatomie
- M. **TOUTAIN Pierre-Louis**, Physiologie et Thérapeutique

PROFESSEURS 2^e CLASSE

- Mme **BENARD Geneviève**, Hygiène et Industrie des Denrées Alimentaires d'Origine Animale
- M. **BERTHELOT Xavier**, Pathologie de la Reproduction
- M. **CORPET Denis**, Science de l'Aliment et Technologies dans les industries agro-alimentaires
- M. **DUCOS DE LAHITTE Jacques**, Parasitologie et Maladies parasitaires
- M. **ENJALBERT Francis**, Alimentation
- M. **LIGNEREUX Yves**, Anatomie
- M. **MARTINEAU Guy**, Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de basse-cour
- M. **PICAVET Dominique**, Pathologie infectieuse
- M. **SCHELCHER François**, Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de basse-cour

PROFESSEUR CERTIFIE DE L'ENSEIGNEMENT AGRICOLE

- Mme **MICHAUD Françoise**, *Professeur d'Anglais*
M. **SEVERAC Benoît**, *Professeur d'Anglais*

MAITRES DE CONFERENCES HORS CLASSE

- M. **JOUGLAR Jean-Yves**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de basse-cour*

MAITRES DE CONFERENCES 1^{ère} CLASSE

- M. **ASIMUS Erick**, *Pathologie chirurgicale*
Mme **BENNIS- BRET Lydie**, *Physique et Chimie biologiques et médicales*
M. **BERGONIER Dominique**, *Pathologie de la Reproduction*
M. **BERTAGNOLI Stéphane**, *Pathologie infectieuse*
Mme **BOUCRAUT-BARALON Corine**, *Pathologie infectieuse*
Mme **BOURGES-ABELLA Nathalie**, *Histologie, Anatomie pathologique*
M. **BOUSQUET-MELOU Alain**, *Physiologie et Thérapeutique*
M. **BRUGERE Hubert**, *Hygiène et Industrie des Denrées Alimentaires d'Origine Animale*
M. **CONCORDET Didier**, *Mathématiques, Statistiques, Modélisation*
Mlle **DIQUELOU Armelle**, *Pathologie médicale des Equidés et des Carnivores*
M. **DUCOS Alain**, *Zootchnie*
M. **DOSSIN Olivier**, *Pathologie médicale des Equidés et des Carnivores*
Mlle **GAYRARD Véronique**, *Physiologie de la Reproduction, Endocrinologie*
M. **GUERRE Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*
M. **LEFEBVRE Hervé**, *Physiologie et Thérapeutique*
M. **LYAZRHI Faouzi**, *Statistiques biologiques et Mathématiques*
M. **MATHON Didier**, *Pathologie chirurgicale*
Mme **MESSUD-PETIT Frédérique**, *Pathologie infectieuse*
Mme **PRIYMENKO Nathalie**, *Alimentation*
M. **SANS Pierre**, *Productions animales*
M. **VALARCHER Jean-François**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de basse-cour*

MAITRES DE CONFERENCES 2^e CLASSE

- M. **BAILLY Jean-Denis**, *Hygiène et Industrie des Denrées Alimentaires d'Origine Animale*
Mlle **BOULLIER Séverine**, *Immunologie générale et médicale*
Mlle **CAMUS Christelle**, *Biologie cellulaire et moléculaire*
M. **FOUCRAS Gilles**, *Pathologie du Bétail*
Mme **HAGEN-PICARD Nicole**, *Pathologie de la Reproduction*
Mlle **HAY Magali**, *Zootchnie*
M. **JACQUIET Philippe**, *Parasitologie et Maladies Parasitaires*
M. **JAEG Jean-Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*
Mme **LETRON-RAYMOND Isabelle**, *Anatomie pathologique*
M. **MEYER Gilles**, *Pathologie des ruminants*
Mlle **TRUMEL Catherine**, *Pathologie médicale des Equidés et Carnivores*
M. **VERWAERDE Patrick**, *Anesthésie, Réanimation*

ASSISTANTS D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE CONTRACTUELS

- M. **GUERIN Jean-Luc**, *Productions animales*
M. **MAREDA Marc**, *Pathologie de la Reproduction*
Mlle **MEYNADIER Annabelle**, *Alimentation*
Mme **MEYNAUD-COLLARD Patricia**, *Pathologie chirurgicale*
M. **MONNEREAU Laurent**, *Anatomie, Embryologie*

A monsieur le professeur Henri DABERNAT
Professeur des Universités
Praticien hospitalier
Bactériologie, virologie

qui nous a fait l'honneur d'accepter la présidence de notre jury de thèse.

Hommage respectueux

A monsieur le docteur Hubert BRUGERE
Maître de conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse
Hygiène et industrie des denrées alimentaires d'origine animale

initiateur de ce travail, pour son aide précieuse tout au long de cette étude

Qu'il veuille bien accepter ici le témoignage de notre reconnaissance

A monsieur le professeur Guy BODIN-ROZAT-de MANDRES-NEGRE
de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse
Pathologie générale, Microbiologie, Immunologie

qui nous a fait l'amitié de prendre en considération ce travail

Sincères remerciement

A mes parents pour leur amour et leur patience.

A mes amis pour leur soutien et leur presence.

AVANT PROPOS

Cette thèse a pour origine un travail auquel nous avons collaboré. Ce travail se nomme:

"Etat des connaissances sur le devenir des germes pathogènes et des micropolluants au cours de la méthanisation des déchets et des sous-produits organiques"

Ce travail a été écrit par Christian Couturier et Laurent Galtier de SOLAGRO, avec la collaboration de Phillipe Puech de l'ARM (Agence Régionale de Mécanisation), de Hubert Brugère et Laurent Marache de l'ENVT (Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse) et de Michel Kaemmerer de l'ENSAT (Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse).

Ce travail a été proposé par SOLAGRO à l'ADEME dans le cadre de l'appel à projets du programme Santé-Déchets, en 1998 (numéro de contrat 9893024 ; date de contrat 19/11/2000.).

Abréviations

%	Pourcentage
/j	Par jour
°C	Degré celsius
Ax	Animaux
BV	Bovin
C	Carbone
C3	Molécule organique à trois carbones
C4	Molécule organique à quatre carbones
Ca	Calcium
CH4	Méthane
CN	Chien
CO2	Gaz carbonique
CP	Caprin
CT	Chat
CV	Cheval
DBO	Demande biochimique en oxygène
DCO	Demande Chimique en oxygène
DI50	Dose infectieuse 50%
DL50	Dose létale 50%
DMI	Dose moyenne infectieuse
g/l	Gramme par litre
h	Heure
H	Homme
H2	Hydrogène
H2O	Eau
j	Jour
K	Potassium
kg	Kilogramme
m3	Mètre cube
m3/j	Mètre cube par jour
MES	Matière en suspension
Mg	Magnésium
mg/kg	Milligramme par kilogramme
mg/l	Milligramme par litre
MGRT	Temps de rétention moyen garanti
Min.	minute
ml	Millilitre
mol/l	Mole par litre
mV	millivolt
N	Azote
Na	Sodium
NH3	Ammoniac
OISX	Oiseaux

OV	Ovin
PC	Porc
pH	Potentiel d'hydrogène
Sem.	Semaine
STEP	Station d'épuration
T90	Temps de réduction décimal
TRH	Temps de rétention hydraulique
VOL	Volaille

Introduction	1
Première partie : La méthanisation	2
A Principes généraux	2
I Définition et historique	2
II Le mécanisme de la méthanisation	2
1. Les bactéries de la fermentation anaérobie	3
a. La flore non méthanogène	3
a.1 Les bactéries hydrolytiques	3
a.2 Les bactéries acidogènes	3
b. Les bactéries méthanogènes	4
2. Les différentes étapes de la méthanisation	4
III Les conditions nécessaires à la fermentation	7
1. La température	8
2. L'absence d'oxygène	9
3. Le pH et le potentiel d'oxydoréduction	9
4. L'absence d'inhibiteurs contenus dans le substrat	9
5. Le rapport C/N	10
6. L'ammoniac	11
7. L'humidité	11
8. Le taux de charge en matière organique	11
9. Le temps de rétention hydraulique	11
10. Le brassage	12
B Les différents avantages de la méthanisation	13
I Les produits obtenus	13
II La méthanisation, un processus permettant la dépollution des déchets	13

C Les différents types d'installation de production de biogaz existantes	15
I Les différents digesteurs	15
1. Définition	15
a. Les digesteurs discontinus	15
b. Les digesteurs continus	17
2. Les exemples de réacteurs discontinus	17
3. Exemples de digesteurs continus	19
a. Les réacteurs de type indien	19
b. Les réacteurs de type chinois	19
c. Les réacteurs à pistons	19
d. Les réacteurs mixtes (à pistons et infiniment mélangés).	19
e. Les réacteurs de seconde génération	23
e.1 Les réacteurs homogènes	23
e.1.1 Cas général	23
e.1.2 Les réacteurs homogènes infiniment mélangés	23
e.2 Les autres exemples de réacteurs de seconde génération	23
e.2.1 Les réacteurs homogènes avec récupération externes des cellules ou «contact anaérobie »	23
e.2.2 Les réacteurs à lits de boues	26
e.2.3 Les réacteurs à cellules fixes	26
f. Cas particuliers	26
II Les différents déchets pouvant être traités par le principe de la méthanisation et installations utilisées	27
1. Le traitement des effluents d'élevage	27
a. La forme et la composition des déchets à traiter	27
a.1 La forme des déchets	27
a.2 La comparaison des quantités de déjections produites selon les espèces	28
a.3 La composition des différents déchets d'élevage	29
a.3.1 Le lisier de porc	29

a.3.2 Le lisier en élevages bovins	29
a.3.3 La composition des déjections de l'espèce ovine	32
a.3.4 La composition du lisier de volaille	32
b. Exemples d'installations existantes dans le domaine de l'élevage	32
b.1 Exemples d'installations à la ferme	32
b.2 Les installations de biogaz centralisées	37
2. Le traitement des déchets organiques des industries	39
a. Les différents déchets	39
b. Exemples d'installations de biogaz existantes en industrie	39
3. Les eaux usées urbaines	42
a. La forme de ces déchets	42
b. Exemple d'installation de traitement anaérobie dans une station d'épuration	43
4. Les ordures ménagères traitables par méthanisation	43
a. La composition des ordures ménagères	43
b. Exemples d'installations existantes	43
III La répartition des installations de biogaz	46
1. La méthanisation en France	47
2. Quelques exemples de niveau d'équipement dans d'autres pays	47
a. Le Royaume Uni	47
b. La Suisse	47
c. La Norvège	48
d. Le Danemark	49
e. L'Autriche	50
Deuxième partie : les agents pathogènes	52
A Généralités et définitions	52
B. Les différents organismes pathogènes présents dans les déchets organiques	53

I les bactéries	53
1.Généralités	53
2.Exemples de bactéries pathogènes	54
a.Les salmonelles	54
b.Les shigelles	56
c.Escherichia coli	56
d.Clostridium botulinum et perfringens	58
e.Bacillus anthracis	59
II Les virus	60
1.Généralités	60
2.Exemples de virus pathogènes	61
a.Virus de l'hépatite A	61
b.Le virus de l'hépatite E	61
c.Les Enterovirus : Les Poliovirus, les Coxsackievirus et les Echovirus	62
d.Les Rotavirus	62
III les parasites	62
1.Les helminthes	63
a.Un exemple de trématode pathogène : Fasciola hepatica	64
b.Un exemple de cestode pathogène : Taenia saginata	65
c.Un exemple de nématode pathogène : Ascaris lumbricoïdes	65
2. Les protozoaires	66
a.Généralités	66
b.Exemples de protozoaires pathogènes	67
b.1 Giardia sp.	67
b.2 Cryptosporidium sp.	67
b.3 Toxoplasma gondii	68
 Troisième partie : Les risques sanitaires dus aux micro-organismes pathogènes contenus dans les déchets organiques	 71

A Principe de l'évaluation d'un risque de contamination	71
B. Les différentes voies de contamination des hommes et des animaux	72
C. Les conditions et l'évaluation des risques réels	77
Quatrième partie : L'action sur les pathogènes de la méthanisation selon le type d'effluent à traiter	80
A. Les difficultés rencontrées lors de l'étude de l'effet sur les pathogènes de la digestion anaérobie	80
I. Les difficultés d'analyse et d'extrapolation des résultats des études	80
II. Les difficultés rencontrées lors des études expérimentales	81
1. Difficultés d'isolement et de numération des pathogènes	81
2. Difficultés d'analyse et d'extrapolation des résultats	82
B. L'effet de la méthanisation sur les pathogènes présents dans les effluents organiques	82
I. Données générales sur l'action de la méthanisation sur les pathogènes	82
1. L'action sur les pathogènes en général	83
2. L'action de la méthanisation sur les bactéries	84
3. L'action de la méthanisation sur les virus	85
4. L'action de la méthanisation sur les parasites	90

II. Données sur l'efficacité de la digestion anaérobie contre les pathogènes suivant les différents effluents utilisés	94
1. Les lisiers	94
a. L'action de la méthanisation sur les pathogènes en général	94
b. L'action de la méthanisation sur les bactéries	95
c. L'action de la méthanisation sur les virus	102
d. L'action de la méthanisation sur les parasites	108
2. Les eaux usées des STEP	110
a. L'action de la méthanisation sur les bactéries	110
b. L'action de la méthanisation sur les virus	114
c. L'action de la méthanisation sur les parasites	114
3. L'action de la méthanisation sur la fraction organique des déchets municipaux	118
4. L'action de la méthanisation sur les autres déchets	118
C. Les risques d'un mauvais déroulement de la digestion anaérobie	121
I. Les risques liés aux antibiotiques, aux additifs et aux désinfectants	121
II. Les autres risques d'une mauvaise digestion anaérobie	123
D. Les facteurs permettant la réduction des pathogènes	124
I. Les facteurs permettant l'élimination des bactéries durant la méthanisation	124
II. Les facteurs permettant l'élimination des virus durant la méthanisation	125
III. Les facteurs permettant l'élimination des parasites durant la méthanisation	126

E. Le contrôle de l'effet réducteur de la digestion anaérobie	126
Conclusion	132
Annexes	134
Bibliographie	145

Introduction

Les pays industrialisés se préoccupent chaque jour un peu plus de l'environnement. D'où la recherche de moyens de production d'une énergie renouvelable et propre, de procédés de recyclage des déchets, mais aussi la volonté de trouver une solution permettant de juguler la pollution liée aux effluents des élevages intensifs.

Parmi les différentes solutions envisagées, la méthanisation est fréquemment citée. La digestion anaérobie est, en effet, souvent présentée comme une solution miraculeuse. Elle serait capable d'apporter une réponse à une très grande partie des problèmes posés par les effluents organiques, comme, par exemple, la nuisance olfactive et la pollution, en réduisant la charge organique.

Un autre problème lié aux effluents organiques est la dissémination d'agents pathogènes et les risques pour la santé humaine et animale qui en résultent. Là encore, le plus souvent, la méthanisation passe pour résoudre sans difficulté ce problème. Mais ces affirmations ne s'appuient que très rarement sur des études scientifiques. Nous pouvons donc nous demander où en sont les recherches sur les effets de la méthanisation quant à la survie des différents agents pathogènes pour l'homme et les animaux.

Pour réaliser un état des connaissances sur le devenir des germes pathogènes lors de la méthanisation des effluents et déchets organiques, nous aborderons d'abord la méthanisation, elle-même. Dans cette première partie, nous nous préoccupons de son principe, des différents procédés existants et des effluents qu'elle permet de traiter. Puis, nous nous intéresserons aux différents agents pathogènes qui peuvent exister dans les effluents organiques en fonction de leur origine. Ensuite, nous nous pencherons sur les différentes voies de dissémination des agents pathogènes et sur la notion de risque pour la santé humaine et animale. Enfin nous aborderons les relations entre germes pathogènes et méthanisation.

Première partie : La méthanisation.

A. Principes généraux.

I. Définition et historique.

La méthanisation consiste en la dégradation de la matière organique. Cette dégradation se déroule dans des conditions anaérobies. Ce phénomène permet la production de biogaz, qui est un gaz combustible (CH_4 essentiellement). (47)

La méthanisation, qui est aussi souvent appelée production de biogaz ou fermentation méthanique ou encore digestion anaérobie, est un phénomène naturel, qui se retrouve dans le tractus digestif des ruminants, les marais avec les feux follets, les sédiments lacustres et marins (67) et les phénomènes de «grisou » (47).

La méthanisation est décrite pour la première fois en 1776 par Voltat. Il mit en évidence le méthane dans le gaz issu de la décomposition des déchets végétaux en atmosphère confinée (67).

Dans les années 1940, Ismar et Ducellier, professeurs à l'Ecole Nationale d'Agriculture d'Alger, étudièrent le phénomène pour obtenir de l'énergie avec du fumier et des déchets riches en matière organique (47).

En 1942, ils déposèrent un brevet pour une installation de production de gaz en cuve hermétique (67).

La méthanisation retrouva un regain d'intérêt suite aux chocs pétroliers de 1973 et 1976 (47).

II. Le mécanisme de la méthanisation.

La méthanisation est donc un processus naturel, qui peut être décomposé en plusieurs étapes. Le déroulement de ces étapes permet

d'obtenir à partir de la matière organique une production de gaz composé de méthane (CH₄), d'eau (H₂O) et de gaz carbonique (CO₂). Dans chacune de ces étapes, une catégorie bien précise de bactéries entre en jeu. Ces bactéries vivent de manière symbiotique (47).

1. Les bactéries de la fermentation anaérobie.

a. La flore non méthanogène.

Les espèces et la quantité de ces bactéries dépendent surtout du substrat (67).

Cette flore mixte permet d'obtenir et de maintenir le milieu anaérobie essentiel aux bactéries méthanogènes en consommant l'oxygène (67).

a.1 Les bactéries hydrolytiques.

Les bactéries hydrolytiques sont cellulolytiques, protéolytiques et lipolytiques (67). Elles dégradent la matière organique brute en matière organique soluble (47).

Nous trouvons des bactéries hémicellulolytiques telles que *Bacteroides tyminicola*, des bactéries amylolytiques telles que *Clostridium butyricum* et les bactéries protéolytiques qui comprennent des bactéries du genre *Clostridium* (67).

Dans cette catégorie se trouvent aussi des bactéries sulfatoréductrices, qui permettent de baisser la pression partielle en hydrogène qui deviendrait toxique, si elle s'élevait (47).

a.2 Les bactéries acidogènes.

Les bactéries acidogènes permettent la transformation de la matière organique soluble en acides organiques (alcools, acides gras volatils) et la production de gaz carbonique (CO₂) et d'hydrogène (H₂) (47).

b. Les bactéries méthanogènes.

Les bactéries méthanogènes consomment l'acide acétique, formé à partir des acides organiques, de l'hydrogène et du gaz carbonique par les bactéries acétogènes, pour produire du méthane (CH₄) et du gaz carbonique (67).

Il est considéré que 70% du méthane provient de l'acétate. Les bactéries méthanogènes acétoclastes évitent, aussi, qu'une accumulation des acides gras volatils puisse se produire. Cette accumulation est nuisible à la production de méthane (47).

Ce groupe de bactéries a un temps de dédoublement très lent de l'ordre de vingt quatre heures. Alors que les bactéries acidogènes ont un temps de dédoublement de l'ordre de quelques heures (67).

2. Les différentes étapes de la méthanisation.

La méthanisation se décompose en trois étapes :

L'hydrolyse, durant laquelle les molécules organiques sont transformées en produits plus simples.

L'acidogénèse, qui permet la formation d'acides gras volatils.

La méthanogénèse, qui, à partir des acides gras, du dioxyde de carbone et de l'hydrogène, produit du méthane. Cette dernière étape est due à l'activité des bactéries acétogènes et méthanogènes (47). (Voir le schéma n° 1 et n° 2 et le tableau n°1).

Les phases d'hydrolyse et d'acidogénèse, qui font intervenir des bactéries aérobies et anaérobies, n'ont pas besoin d'un milieu anaérobie strict. Ce n'est pas le cas de la phase de méthanogénèse, qui doit se dérouler dans des conditions d'anaérobiose stricte (47).

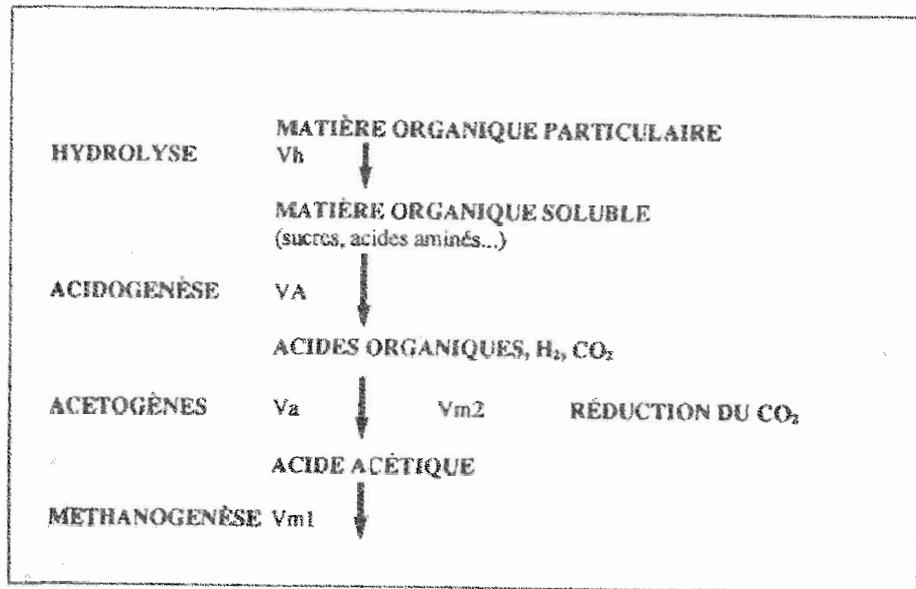


Schéma n° 1 : Schéma global du déroulement de la fermentation méthanique (47).

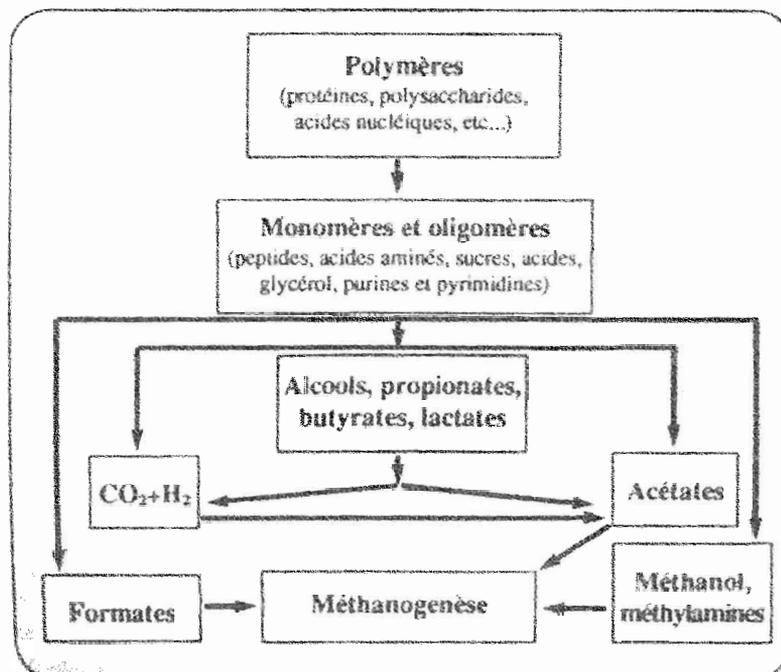


Schéma n° 2 : Les différentes étapes de la dégradation de la matière organique et des différents produits obtenus durant la méthanisation (47).

Substrat brut (composants principaux)	Étape 1	Étape 2	Étape 3
ÉTAPES	Hydrolyse	Formation d'acides	Production de méthane
BACTÉRIES	Bactéries hydrolytiques	Bactéries acidogènes	Bactéries méthanogènes
LIPIDES	Acides gras Glycérol	Chaînes longues Acides gras (Acide acétique)	Produits volatils
PROTÉINES	Acides aminés Chaînes courtes Peptides	Alcools Aldéhydes Cétones CO ₂	Méthane CO ₂ Eau
POLYSACCHARIDES	Monosaccharides Disaccharides	Eau Accroissement bactérien	

Tableau n°1 : Les différentes étapes de la méthanisation, leurs bactéries spécifiques et leurs nutriments principaux (47).

La fermentation anaérobie n'est que très faiblement exothermique, à l'opposé des fermentations aérobies (47). Durant la digestion anaérobie, il n'est pas observé de hausse de température importante. Cette faible production d'énergie calorifique pose le problème du maintien de la température au cours de la méthanisation, surtout si celle-ci est thermophile. Il faut souvent chauffer la cuve, où se déroule la méthanisation pour avoir toujours la même température durant la digestion, ce qui est coûteux en énergie. De plus, le pic thermique obtenu lors de la digestion aérobie permet l'élimination de nombreux pathogènes. Alors on peut donc se demander si l'absence de ce phénomène exothermique ne limite pas l'effet réducteur de la digestion anaérobie sur le nombre de pathogènes.

Chaque phase a sa vitesse de réaction spécifique (67). Suivant le type de substrat, l'étape limitante ne sera pas la même. Pour le fumier, l'étape limitante sera l'hydrolyse. Pour les effluents agro-alimentaires, l'étape limitante sera la méthanogénèse et le risque d'accumulation d'acides gras est, donc, plus important (47).

La digestion anaérobie correspond donc à un enchaînement de réactions chimiques dépendantes les unes des autres. Cette succession de réactions n'est possible que grâce à la population bactérienne, qui se développe dans le milieu. Ces bactéries réalisent ces réactions chimiques et maintiennent les conditions de vie nécessaires à leur survie. Mais le milieu, où se déroule la digestion anaérobie, est un écosystème très fragile et très spécifique. Quelles sont donc les conditions nécessaires à la réalisation de la digestion anaérobie ?

III. Les conditions nécessaires à la fermentation.

Pour que la méthanisation puisse se dérouler normalement certaines conditions doivent être remplies.

1. La température.

La digestion anaérobie peut se réaliser sous trois gammes de température. De 15 à 25°C, nous avons une fermentation psychrophile, de 25 à 45°C, nous sommes en présence d'une fermentation mésophile et de 55 à 65°C, la fermentation est dite thermophile.

Ces températures de fonctionnement dépendent surtout du réacteur (cette partie de l'installation où se déroule la digestion anaérobie est aussi appelée digesteur), qui est prévu pour fonctionner dans une de ces gammes de températures.

Les digesteurs mésophiles sont les plus fréquents, mais souvent les grandes installations sont prévues pour fonctionner à des températures thermophiles (47). En effet, plus la température est haute, plus on obtient la même quantité de gaz en moins de temps (67). Plusieurs raisons sont à l'origine de ce phénomène. Tout d'abord, la phase d'hydrolyse est très sensible à la température. Sa vitesse est augmentée avec la hausse de celle-ci (67). En effet, l'activité des micro-organismes est dépendante de la température, qui règne dans le digesteur. Cette activité des micro-organismes devient intéressante et exploitable à partir de 15°C et s'accroît fortement à partir de 20°C, pour atteindre un maximum à 37-40°C pour les fermentations mésophiles (67) et 55°C pour les fermentations thermophiles (47). Dans l'écart des températures mésophiles, pour une hausse de 1°C, la production de gaz augmente de 5% (67).

Mais, nous avons vu, que la fermentation anaérobie ne produisait que peu de chaleur. Donc, pour fonctionner dans des gammes de températures mésophiles et surtout thermophiles, les digesteurs ont besoin d'un apport de chaleur extérieur fourni par un chauffage externe (47). Or, plus il est nécessaire de chauffer le digesteur, plus le coût augmente. Donc la température de fonctionnement d'un digesteur est choisie suivant le but de l'installation de méthanisation par un compromis entre la productivité en gaz et le coût de production.

2. L'absence d'oxygène.

L'absence d'oxygène est une condition *sine qua non* pour le développement des bactéries méthanogènes, qui sont anaérobies strictes (67).

3. Le pH et le potentiel d'oxydoréduction.

Le niveau de pH idéal se situe à 7. Une acidification du milieu provoque une accumulation des acides gras volatils, qui, en trop grande quantité, bloquent la production de méthane (47).

Le potentiel d'oxydoréduction dans le réacteur doit être de l'ordre de -300 mV (47).

4. L'absence d'inhibiteurs contenus dans le substrat.

Les substrats ne doivent pas contenir de molécules inhibitrices comme des antibiotiques ou des antiseptiques. Leur présence peut provoquer un mauvais fonctionnement du digesteur (67). Le problème se présente, par exemple, dans les élevages, qui utilisent du *Monensin* comme facteur de croissance pour les taurillons. Cette molécule se retrouve dans les déjections (67) et limite la dégradation totale du substrat (47). Le chloroforme (à partir de 10 mol/L) peut aussi inhiber la formation d'acétate et la méthanogénèse. De même, les composés phénoliques et les résidus terpéniques inhibent l'activité bactérienne (67).

Les métaux lourds pourraient aussi perturber le processus de méthanisation (67).

Les cations présenteraient, eux aussi, une toxicité à une certaine concentration vis à vis de la méthanisation en se liant aux acides gras volatils (voir tableau n°2) (67).

Ions	Stimulation	Inhibition modérée	Inhibition totale
	mg/L	mg/L	mg/L
Na+	100/200	3500/5500	8000
K+	200/400	2500/4500	12000
Ca ⁺⁺	100/200	2500/4500	8000
Mg ⁺⁺	75/150	1000/1500	3000
NH ₄ ⁺	50/100	1500	3000

Tableau n°2 : Concentrations en ions provoquant la stimulation ou l'inhibition de la méthanisation (67).

5. Le rapport C/N.

Le carbone et l'azote sont des éléments essentiels à la nutrition des micro-organismes, ainsi que le phosphore et le soufre. Le carbone est primordial pour les bactéries en tant que source d'énergie et l'azote en tant qu'élément de structure cellulaire. L'azote est aussi utile dans le maintien du niveau de pH. En effet, ce maintien est dû aux bicarbonates et aux phosphates. Or, les ions bicarbonates sont obtenus à partir du NH₄ et du CO₂, provenant de la dégradation des protéines.

Pour un fonctionnement optimum d'un réacteur à chargement continu, le rapport C/N idéal est de 30 (67). En effet, les bactéries ont besoin de trente fois plus de carbone que d'azote. Si ce rapport n'est pas maintenu, on observe un défaut de croissance des bactéries ou bien une accumulation des nutriments et donc un changement des caractéristiques biochimiques du milieu. Un rapport C/N adéquat est donc important pour avoir un bon fonctionnement de la digestion anaérobie.

6. L'ammoniac.

Stimulant à faible concentration, l'ammoniac devient toxique pour la fermentation anaérobie, en bloquant la méthanogénèse, quand sa concentration dépasse 3g/l d'azote ammoniacal.

Sa forme non ionisée semble être le facteur toxique (47).

7. L'humidité.

L'eau est essentielle à la survie et surtout à la multiplication des micro-organismes. Une humidité minima de 60-70% est nécessaire à la méthanisation (67).

8. Le taux de charge en matière organique.

Le taux de charge représente la quantité de matière à dégrader introduite par jour et par mètre cube de fermenteur (47).

La concentration de substrat doit rester à un niveau acceptable par rapport à la population microbienne (67).

9. Le temps de rétention hydraulique.

Le temps de rétention hydraulique (TRH) représente le temps de séjour moyen du substrat dans le fermenteur (67), c'est à dire le rapport du volume utile du fermenteur sur le débit volumique du substrat (47).

La valeur optimale du temps de rétention hydraulique dépend du procédé employé (c'est à dire du type de digesteur, du temps de fonctionnement et du substrat traité). Il varie de quelques heures à quelques mois (voir le tableau n° 3: différents exemples de TRH suivant le procédé de digestion anaérobie). La valeur limite inférieure de durée de ce temps de rétention hydraulique correspond à un renouvellement plus rapide du contenu de la cuve que le taux de croissance de la population bactérienne (67). Si le TRH est plus bas que la valeur limite inférieure, on parle de lessivage. Les bactéries actives n'ont pas

une croissance assez rapide par rapport au renouvellement du contenu de la cuve de digestion.

Procédé	TRH
Réacteurs homogènes conventionnels	10 à 40j minimum
Digesteurs infiniment mélangés	10 à 20j
Réacteurs de seconde génération : contact anaérobie	6 à 8j
Réacteurs avec décantation interne des bactéries	15j
Réacteurs à cellules fixées	0,5 à 4j suivant le substrat

Tableau n°3 : Différents exemples de TRH suivant le procédé de digestion anaérobie employé (47).

10. Le brassage.

Le brassage n'est pas essentiel pour que la fermentation anaérobie se déroule. Cependant, il permet l'obtention d'un milieu homogène et évite les courts-circuits dans le réacteur (47). Un court circuit correspond à la sortie prématurée d'une partie du substrat de la cuve, car celle-ci ne suit pas le parcours habituel. L'effluent ne subit donc pas la méthanisation en totalité.

Les conditions de déroulement de la digestion anaérobie sont donc assez strictes et il n'est pas facile de les maintenir en état. Mais ces conditions sont aussi assez fluctuantes en fonction de la technologie employée et du substrat traité. Les installations de production de biogaz sont donc très diverses.

Après avoir étudié les mécanismes et les conditions de déroulement de la méthanisation, nous nous intéresserons aux avantages que présente son utilisation.

B. Les différents avantages de la méthanisation.

La méthanisation représente un traitement biologique des substrats organiques, qui semble offrir beaucoup d'avantages. Ces avantages se répartissent dans différents domaines, qui sont ceux de la transformation des effluents et de l'obtention d'un produit de digestion, mais aussi, celui de la dépollution.

I. Les produits obtenus.

La fermentation anaérobie des déchets permet l'obtention d'un gaz combustible et d'un engrais à haute valeur fertilisante (67) par un principe simple, fiable, mais souvent cher pour l'instant, car les réacteurs sont, encore, des prototypes (47).

L'utilisation du biogaz permet l'obtention de chaleur. Celle-ci est produite simplement et de façon peu onéreuse, mais peu souple. Elle permet aussi l'obtention d'électricité, dont la production est plus onéreuse. Le biogaz peut aussi servir de carburant (47).

L'effluent à la sortie des réacteurs peut servir d'engrais. C'est un amendement organique contenant des précurseurs de l'humus. Ce processus, de plus, permet une perte minimale en minéraux et l'obtention d'un substrat contenant une concentration en minéraux supérieure à celle présente avant son entrée dans le réacteur (67).

II. La méthanisation, un processus permettant la dépollution des déchets.

La méthanisation permet d'obtenir une dépollution des déchets organiques sous plusieurs aspects.

La méthanisation permet de désodoriser les déchets. C'est un moyen peu cher par rapport aux autres traitements désodorisants employés habituellement. Il permet en moyenne une économie d'énergie de 30 à 40% (47). La fermentation anaérobie diminue les odeurs de 70 à 100%.

La méthanisation provoque aussi la baisse de la charge organique des déchets, donc de la charge polluante. Les principaux moyens pour connaître le niveau de pollution consistent en la mesure de la DBO (demande biochimique en oxygène) et de la DCO (demande chimique en oxygène). La DBO évalue la quantité d'oxygène nécessaire aux micro-organismes pour détruire et dégrader les matières organiques d'un effluent. La DBO sera d'autant plus grande que l'effluent sera riche en matière organique. Le critère DBO le plus utilisé est la DBO5, c'est à dire le nombre de mg/L d'oxygène consommé en 5 jours à 20°C (67). La DCO représente la quantité apportée en oxydant énergétique pour oxyder chimiquement le substrat organique. La DCO apporte, donc, une bonne représentation de la population totale (minérale et organique). C'est le critère le plus objectif de pollution. Le taux de réduction de la DCO est différent suivant le type de substrat traité par la méthanisation. Il est de 50 à 60% pour les effluents d'élevages, de 80 à 95% pour les effluents d'industries agro-alimentaires, de 60 à 85% pour la portion organique des ordures ménagères, de 45 à 50% pour les boues de stations d'épuration. Cette dépollution ne permet pas, cependant, le rejet direct du substrat sans traitement supplémentaire dans la nature, car la méthanisation ne traite ni les nitrates, ni les produits toxiques, par exemple.

De plus, la méthanisation ne contribue pas à l'effet de serre, car elle ne fait que restituer le CO₂ appartenant au cycle du carbone et ne produit pas un excès de CO₂ (47).

La méthanisation apparaît donc comme un moyen technologique très efficace pour le traitement des déchets organiques dans le respect de l'environnement. Mais, attention, la méthanisation ne règle pas tous les problèmes, en effet, elle est inefficace contre les nitrates, les produits toxiques et les métaux lourds. Après cet exposé des différents avantages de la méthanisation, nous étudions les différentes sortes d'installations de production de biogaz existantes et leurs caractéristiques.

C. Les différents types d'installation de production de biogaz existantes.

Les installations de biogaz sont la plupart du temps composées de quatre secteurs :

- le stockage et le prétraitement des effluents,
- le réacteur de méthanisation,
- le stockage, le traitement et les utilisations du biogaz,
- le stockage et les traitements des effluents après digestion. (47)

(voir le schéma n°3 : Les différents secteurs existants dans une installations de biogaz)

I. Les différents digesteurs.

1. Définition.

Nous pouvons distinguer deux catégories de digesteurs, les digesteurs continus et discontinus.

a. Les digesteurs discontinus.

La cuve de fermentation est chargée, dans les réacteurs discontinus, en une seule fois, avant la fermentation et est déchargée, quand celle-ci est finie (67).

Les substrats peuvent être immergés ou non (47).

Une préfermentation aérobie est effectuée pendant quelques jours, afin de dégrader les molécules peu polymérisées, qui peuvent acidifier le milieu.

C'est un procédé utilisé, surtout, pour un substrat tel que des fumiers pailleux ou des ordures ménagères (67).

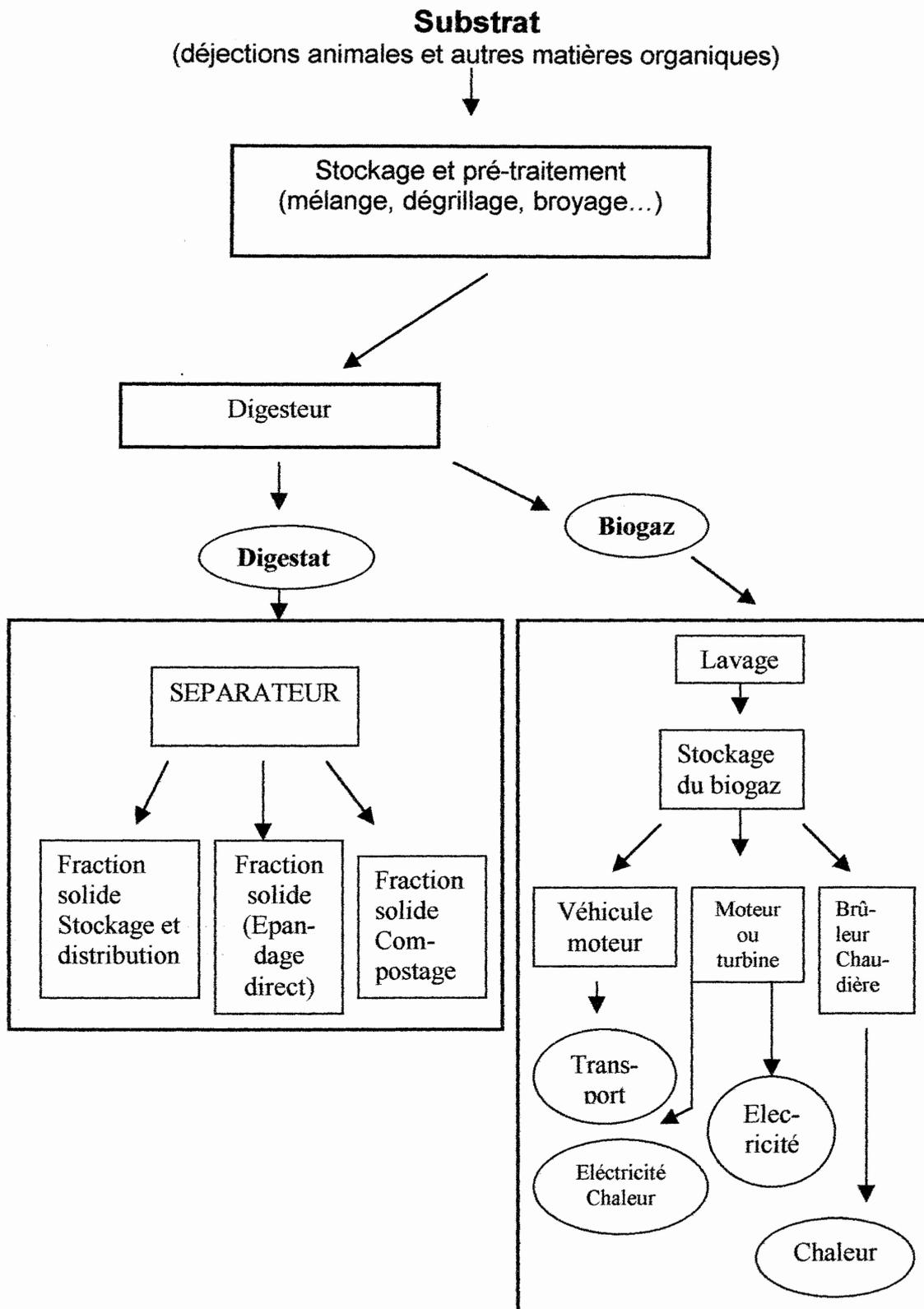


Schéma n°3 : Les différents secteurs existant dans une installation de biogaz (47).

b. Les digesteurs continus.

Les réacteurs continus sont réalimentés quotidiennement avec une quantité spécifique de substrat. Cette introduction est accompagnée par la vidange d'un volume égal d'effluent. Ce procédé réclame des conditions de fonctionnement plus précises que pour les réacteurs discontinus. Il faut une alimentation régulière, un contrôle du pH, un contrôle de la température et un brassage, si nécessaire (67).

2. Les exemples de réacteurs discontinus.

Le procédé de Ducellier-Isman :

Ce digesteur est composé d'une cuve de 10 à 50 mètres cubes avec une cloche servant de gazomètre au-dessus. L'étanchéité est assurée par de l'eau qui sert de joints gazeux. La présence d'eau entre le couvercle et le corps de la cuve forme un joint hydraulique, empêchant le gaz de s'échapper.

Une étape initiale de fermentation aérobie de 4 à 7 jours est nécessaire pour faire monter la température et éviter l'acidification du milieu.

La fermentation anaérobie produit du gaz pendant deux mois avec une moyenne de 0,17 mètres cubes/mètre cube/jour.

Ce procédé a été amélioré, pour la méthanisation des résidus d'élevage, avec une préfermentation aérobie de 2 jours par insufflation d'air. Le démarrage s'effectue grâce au mélange du substrat à fermenter et d'une partie de celui de la cuve précédente. La productivité monte à des niveaux de 0,8 à 0,9 mètres cubes/mètre cube/jour.

Les réacteurs non immergés avec recirculation des liquides :

C'est une amélioration du procédé Ducellier-Isman. Cette amélioration est obtenue par un arrosage séquentiel de la masse en fermentation (47).

Voir le schéma n°4 : un exemple de digesteur discontinu développé par le Centre International de l'Energie et de l'Hydraulique (Burkina Faso) (67).

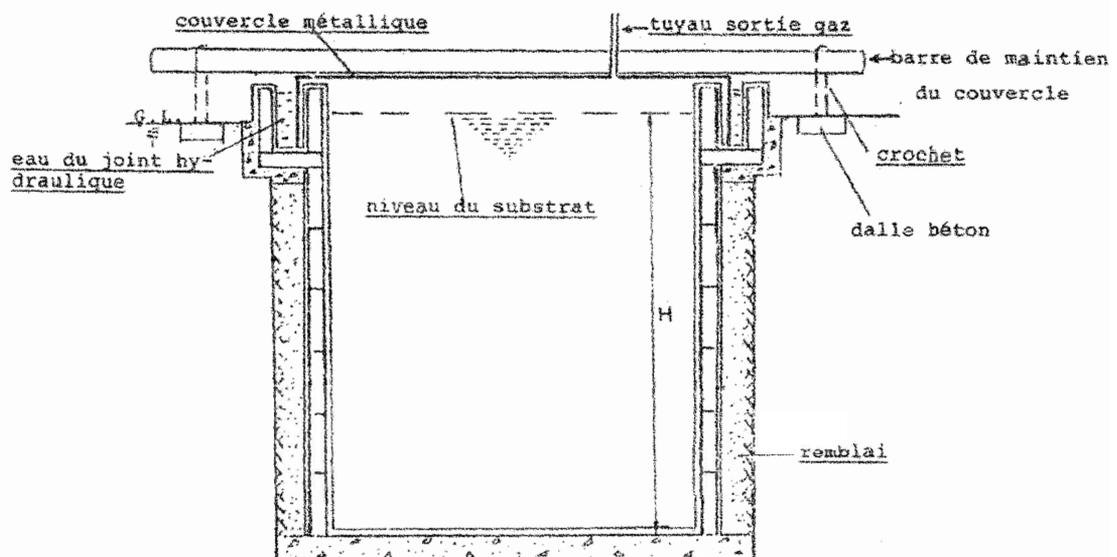


Schéma n°4 : Un exemple de digesteur discontinu développé par le centre international de l'énergie et de l'hydraulique (CIEH Burkina FASO) (67).

3. Exemples de digesteurs continus.

a. Les réacteurs de type indien.

Les réacteurs de type indien sont constitués d'un puits enterré dont le volume va de 2 à 140 mètres cubes, avec des temps de séjour d'environ 55 jours de la matière à fermenter et une productivité moyenne est de 0.25 mètres cubes/mètre cube/jour (47).

Schéma n°5 (67).

b. Les réacteurs de type chinois.

Les réacteurs de type chinois sont essentiellement sphériques et sont alimentés, au moins, une fois par jour. Ils sont d'un volume de 6 à 8 mètres cubes. Leur productivité est de 0,15 à 0,30 mètres cubes/mètre cube/jour (47).

Schéma n°6 (67).

c. Les réacteurs à pistons.

Les réacteurs à pistons sont surtout employés dans le traitement des résidus solides agricoles, car ce traitement a un coût de fonctionnement faible et permet une bonne maîtrise du temps de séjour des solides (47).

d. Les réacteurs mixtes (à pistons et infiniment mélangés).

Ces réacteurs sont infiniment mélangés en ce qui concerne la partie liquide et à pistons pour la partie solide des déchets traités. L'écoulement est ascensionnel (grâce au système piston). Le temps de séjour est bien maîtrisé dans cette technique (47).

Schéma n°7 (47)

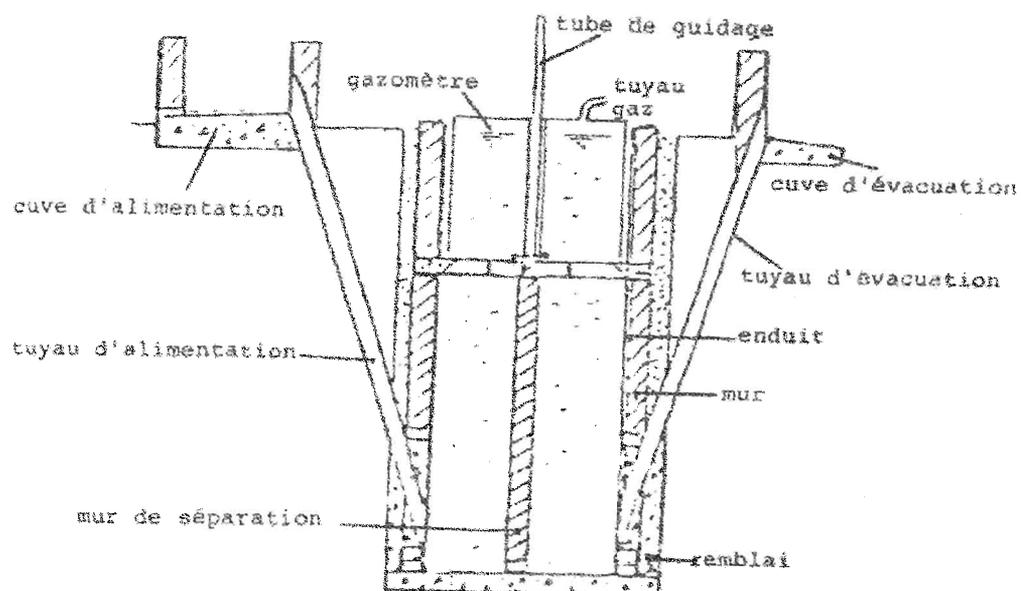


Schéma n°5 : Schéma d'un digesteur type indien (67).

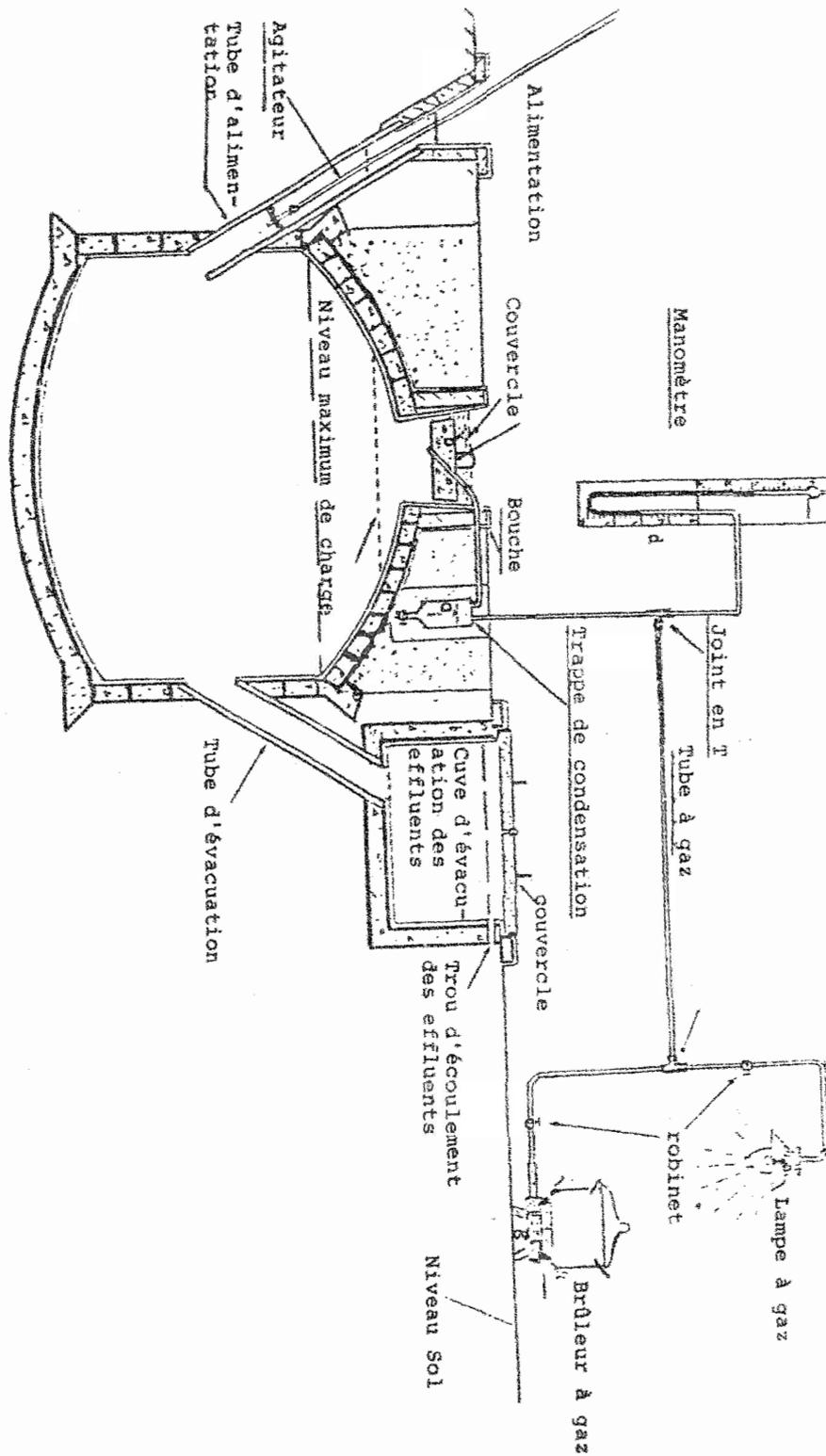


Schéma n°6 : Schéma d'une installation de biodigester type chinois (67).

Le réacteur mixte
(infiniment mélangé pour les liquides et piston pour les solides)
de l'INSA et Elf
Biorecherches (29)

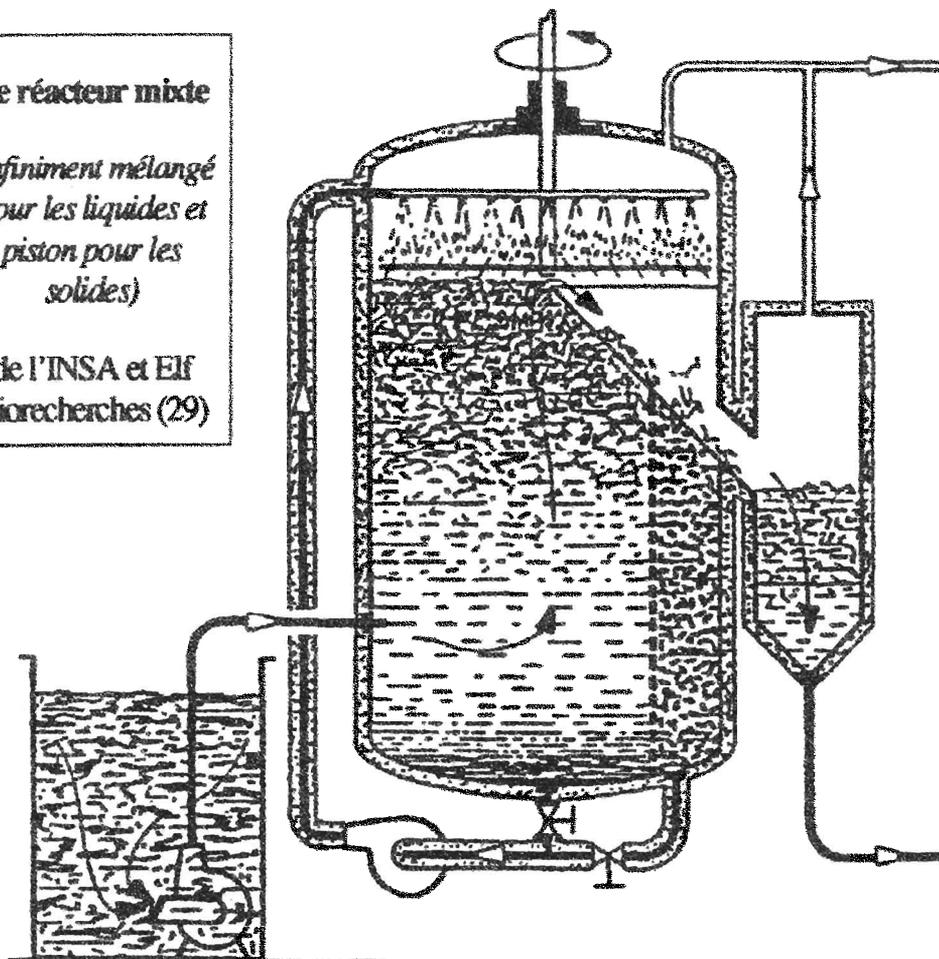


Schéma n°7 : Schéma du fonctionnement d'un réacteur mixte (47).

e. Les réacteurs de seconde génération.

e.1. Les réacteurs homogènes.

e.1.1. Cas général.

Ce sont des réacteurs, qui traitent surtout des effluents liquides. Ils ont un temps de séjour des liquides plus faibles que les autres réacteurs continus. Les temps de séjour dans les réacteurs homogènes sont de l'ordre de l'heure. Il faut, donc, pour retenir les micro-organismes dans les réacteurs, penser à des mécanismes comme la formation de granules, la décantation, la fixation sur un support (47). Schéma n°8 (47)

e.1.2. Les réacteurs homogènes infiniment mélangés.

Ces réacteurs sont équipés d'un système d'agitation-brassage. Ces réacteurs peuvent traiter des effluents riches en matière en suspension. Le temps de rétention hydraulique est de 10 à 20 jours. La production de biogaz est de 0,8 à 1,2 mètres cubes/mètre cube/jour en milieu mésophile. Le rendement en DCO est de 40% en continu (47). Schéma n°9 (47)

e.2. D'autres exemples de réacteurs de seconde génération.

e.2.1. Les réacteurs homogènes avec récupération externes des cellules ou «contact anaérobie».

Ces réacteurs retiennent les micro-organismes anaérobies dans le réacteur en recyclant les boues avec des décanteurs. Leur temps de rétention est de 6 à 8 jours. La production de biogaz est de 1,8 à 2,2 mètres cubes/mètre

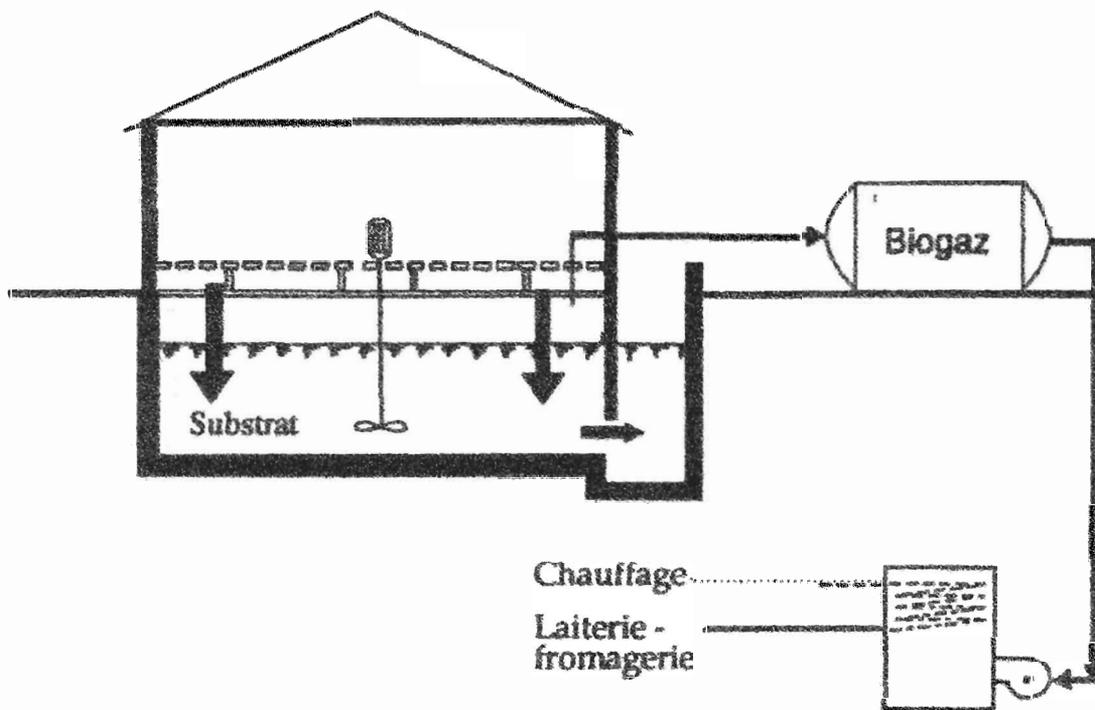
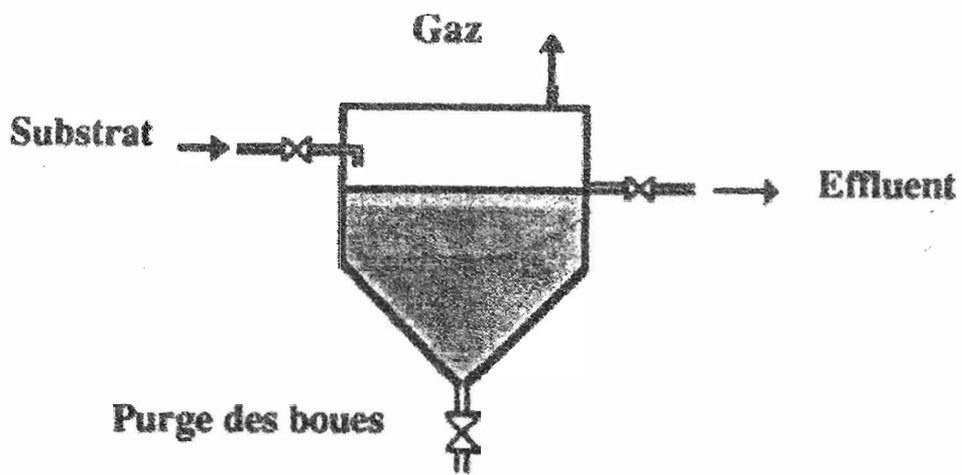


Schéma n° 8 : Principe d'un réacteur homogène et exemple d'une installation (47).

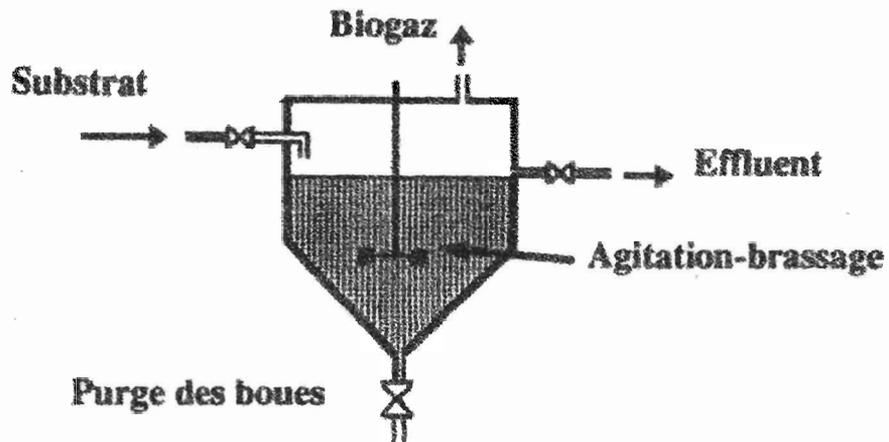


Schéma n°9 : Principe d'un réacteur infiniment mélangé (47).

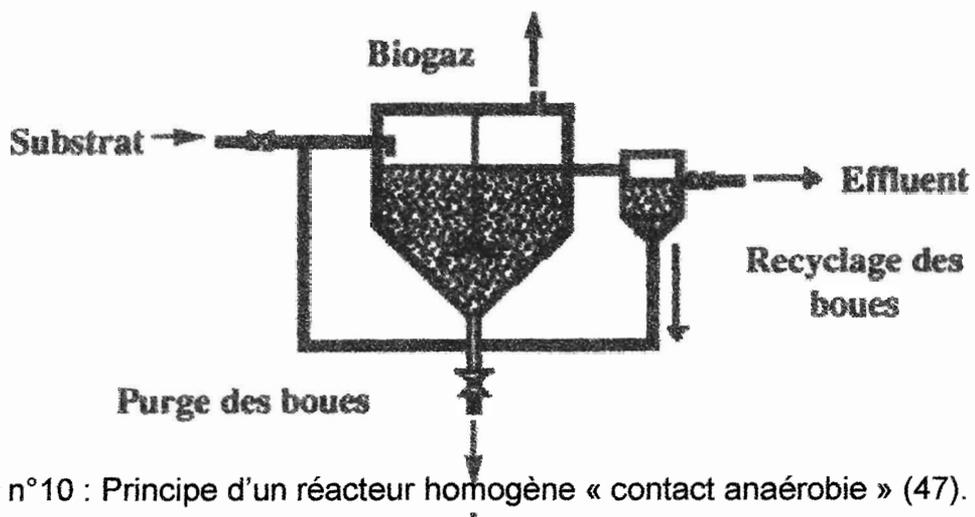


Schéma n°10 : Principe d'un réacteur homogène « contact anaérobie » (47).

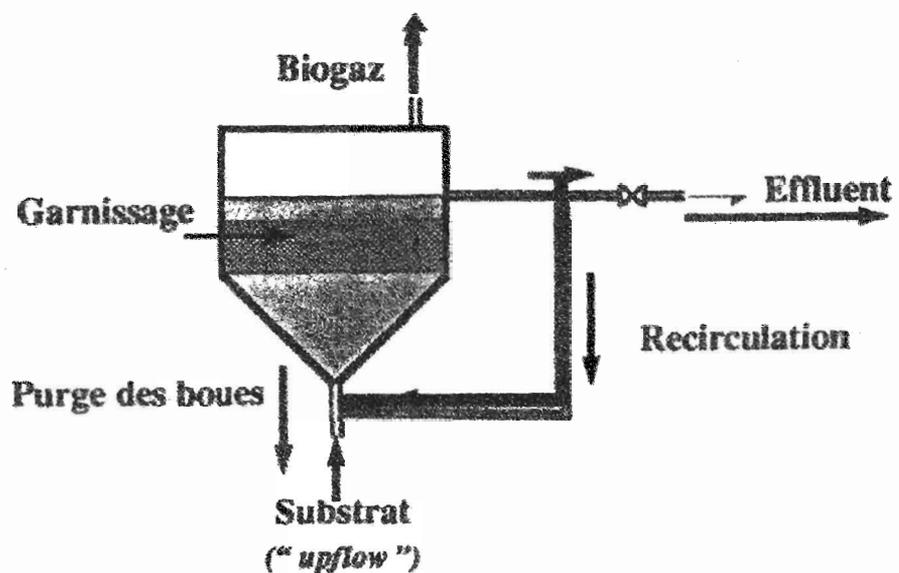


Schéma n°11 : Principe d'un réacteur à cellules fixées (47).

cube/jour. Le rendement de DCO est de 50%. Ce système peut fonctionner en continu ou semi-continu (47). Schéma n°10 (47)

e.2.2. Les réacteurs à lits de boues.

Ces réacteurs contiennent des matières minérales en suspension dans le milieu liquide. Des granules se développent à partir des matières minérales, qui captent les micro-organismes. Ce système permet de garder ces micro-organismes dans le réacteur.

Il y a des réacteurs à lit de boues proprement dits et des réacteurs avec décantation interne des micro-organismes. Cette décantation augmente le temps de séjour des particules par rapport à celui des liquides. Le système hollandais UASB (upflow anaerobic sludge blanket) peut être classé dans ce type de réacteur (47).

e.2.3. Les réacteurs à cellules fixes.

Les bactéries sont retenues dans la cuve sous la forme d'un film (glée) sur un support ou un garnissage.

Les supports sont ou ne sont pas disposés dans le sens du flux. Le flux peut être ascendant ou descendant. Les supports peuvent être composés de matériaux aussi divers que des coquilles de moules, du corail, des morceaux d'argile cuite, des anneaux de plastiques, etc. .

Le temps de rétention hydraulique est de 0,5 à 4 jours suivant le substrat. La production de biogaz est de 2,5 à 4 mètres cubes/mètre cube/jour. Le rendement de DCO est de plus ou moins 60% (47). Schéma n°11(47)

f. Cas particuliers.

Pour les substrats à très haute teneur en matière sèche, comme, par exemple, les ordures ménagères, il existe une technique, qui utilise la méthanisation, c'est l'enfouissement souterrain. Ce sont des décharges d'ordures ménagères recouvertes afin de récupérer le méthane dégagé (47).

Les technologies, permettant de réaliser la digestion anaérobie, sont très diverses. Cette diversité s'explique aussi par la variété des effluents traités. Donc, après avoir récapitulé les différentes technologies existantes, nous nous pencherons sur les différents effluents qui sont traités dans les digesteurs.

IV. Les différents déchets pouvant être traités par le principe de la méthanisation.

La méthanisation dégrade la matière organique en produisant du gaz combustible, le procédé peut donc traiter tous les déchets, qui sont organiques ou la partie organique de certains déchets.

1. Le traitement des effluents d'élevage.

Les élevages produisent énormément de déchets. En France, rien que les bovins, porcins et volailles, produisent 300 millions de tonnes de déchets (47).

a. La forme et la composition des déchets à traiter.

a.1. La forme des déchets.

Les déjections animales se présentent sous différentes formes suivant l'espèce, la concentration animale dans l'élevage et la méthode d'élevage des animaux.

Les effluents provenant des élevages peuvent être classés suivant leur structure.

Nous avons, tout d'abord, les fumiers qui sont des composts formés par l'adjonction d'éléments de la litière aux excréments urinaires et fécaux. Le taux de matière sèche des fumiers est de l'ordre de 20 à 25% (2).

Les lisiers, eux, sont des effluents liquides. Leur taux de matière sèche est compris entre 5 et 15%. Ils sont constitués par les excréments fécaux et urinaires, associés à différentes eaux provenant de l'élevage (eaux de

ruissellement, eaux de lavage, eaux d'abreuvement, etc. .), à des résidus alimentaires et à d'autres déchets. Pour pouvoir les récolter et les stocker dans des fosses, des caillebotis sont installés sous les animaux.

Les purins sont des exsudats liquides provenant du stockage du fumier.

Les fientes de volailles ont un taux de matière sèche plus important allant de 40 à 70% (2).

A part les fientes, qui sont spécifiques à l'aviculture, les autres types d'effluent peuvent se retrouver dans les différents élevages.

Dans l'élevage porcin, l'effluent principal est le lisier hors mis dans des exploitations traditionnelles et le retour à l'élevage sur paille en litière accumulée pour les truies notamment où le fumier est encore présent,. La densité animale étant, souvent, très forte, ce lisier est facilement stockable et manutentionnable car récupéré dans des fosses.

Dans l'élevage bovin, moins intensif en densité, les déjections animales se retrouvent le plus souvent sous forme de fumier. Ce fumier peut se trouver soit dans les prairies, espace vaste et peu propice à la récupération des effluents, soit dans les abris où les animaux sont en concentration plus forte, ce qui facilite leur récolte. Mais l'élevage bovin produit aussi du lisier, par exemple dans l'élevage de veaux en batterie.

L'élevage ovin est lui aussi de forme plus extensive. La récupération des déjections est plus difficile à gérer. Cette difficulté est accentuée par la forme des excréments.

En aviculture, les fientes sont facilement récoltables et en quantité très importante, vu la forte concentration animale et le taux de matière sèche élevé de cet effluent.

Souvent le terme de lisier est employé pour tous les effluents liquides d'élevage.

a.2. La comparaison des quantités de déjections produites selon les espèces.

La quantité des déjections produites par jour est proportionnelle au poids de l'animal. Mais cette quantité varie, aussi, avec l'âge et le niveau de

productivité des animaux (2). En effet, par exemple, une vache laitière peut produire jusqu'à 12 tonnes de fumier par an, avec 40 à 50 litres de fumier par jour. Le cheval, lui, produit moins d'effluent que les bovins avec 25 kg de fumier par jour (47).

Voir le tableau n°4 (47).

a.3. La composition des différents déchets d'élevage.

a.3.1. Le lisier de porc.

Le lisier de porc va changer de composition selon le stade physiologique des animaux. En effet, une truie gestante, un porcelet en post-sevrage et un porc à l'engrais n'ont pas la même composition de lisier. Par exemple, la truie gestante a un lisier dont le taux de matière sèche est plus important que les deux autres catégories de porc. Par contre, le lisier de porc à l'engrais est plus riche en azote que celui des truies gestantes et des porcelets en post-sevrage (47) (voir tableau n°5).

Le lisier de porc varie également dans sa composition suivant l'alimentation donnée aux animaux. Par exemple, le lisier d'animaux nourris avec un aliment farine a un taux de matière sèche et une DCO beaucoup plus haut que le lisier d'un porc nourri avec un aliment lactosérum (voir tableau n°6).

De même, la composition du lisier de porc varie suivant les traitements mécaniques employés sur ces effluents. Le lisier tamisé a un taux de matière sèche, un taux de matière organique et donc une DCO plus faible qu'un lisier brut (voir tableau n°7).

Il n'y a donc pas un lisier de porc unique, mais des lisiers de porc, dont la composition varie suivant divers facteurs. (47)

a.3.2. Le lisier en élevages bovins.

Le lisier de bovins a, en général, des taux de matière sèche plus élevés et plus homogènes que celui des porcs (2). Là aussi, la composition varie suivant le stade physiologique et l'alimentation donnée aux animaux.

Voir le tableau n°8 (47)

ANIMAUX	Quantité (l/jour)	dont Urine	Fèces
Vache laitière [1] (550 à 600 kg)	40-50	1/3	2/3
Bovin à l'engrais (400 kg)	25-30	1/4	3/4
Cheval [2]	20-25	1/4	3/4
Porc (70 kg)			
nourri de concentrés	4-8	60-70 %	30-40 %
nourri de lactosérum	12-20		
Truie gestante	8-12		
Mouton (45 kg)	5	20 %	80 %
Poule pondeuse	150-200 g		

Tableau n°4 : Quantité des déjections produites selon les espèces animales (47).

LISIER	TRUIE GESTANTE	POSTSEVRAGE	PORC À L'ENGRAIS
MS % (<i>brut</i>)	10,45 (3,6)	8,80 (2,7)	8,20 (3,4)
MM %MS	33,60 (11,2)	24,60 (3,1)	31,00 (4,9)
N _{TK} g/l	5,50 (2,6)	6,30 (3,1)	8,10 (2,7)
P ₂ O ₅ g/l	6,50 (2,8)	5,60 (0,9)	7,10 (3,1)
K ₂ O g/l	2,40 (0,9)	2,00 (0,8)	2,80 (0,8)
Ca %(<i>sec</i>)			4,80
Mg %(<i>sec</i>)			1,50
Na% (<i>sec</i>)			1,10
Mn mg/l			576,00
Cu mg/l			838,00
Fe mg/l			2 620,00
Zn mg/l			1 120,00

Tableau n° 5 : Composition du lisier de porc selon le stade physiologique des animaux (47).

Unité	Aliment farine	Aliment lactosérum
MS g/kg	80,0	26,7
MO % de la MS	64,5	62,0
MES g/kg	78,6	22,9
DCO g/kg	60,0	20,0
DBO ₅ g/kg	20,0	10,0

Tableau n° 6 : Composition du lisier de porc suivant l'alimentation donnée aux animaux (47).

Lisier	MS	MO	DCO
Lisier brut (25 échantillons)	50,0	36,3	47,3
Lisier tamisé (630 µ)	40,0	22,5	40,3
Diminution (%)	22	38	15

Tableau n°7 : Influence d'un tamisage sur les caractéristiques du lisier de porc par rapport à celles du lisier brut (47).

a.3.3 La composition des déjections de l'espèce ovine.

Le taux de matière sèche des déjections ovines est nettement plus élevé que ceux des deux autres espèces vues précédemment et donc, les déjections de l'espèce ovine sont beaucoup plus sèches.

Voir le tableau n°9 (47)

a.3.4. La composition du lisier de volaille.

Cet effluent se distingue fortement des autres espèces. Le taux de matière sèche voisinant les 25%. C'est un cas à part. Cet effluent est plutôt à rapprocher des produits solides que des lisiers liquides (2). Sa composition va aussi varier suivant le type d'élevage.

Voir le tableau n°10 (47)

Les effluents d'élevages sont donc très variés que ce soit en quantité ou en qualité. Cette variété est aussi bien présente d'une espèce productrice à une autre qu'au sein de la même espèce. Ces variations de composition et de la matière sèche des effluents vont, donc, induire des caractéristiques différentes pour les digesteurs. En effet, un digesteur doit être adapté aux caractéristiques du substrat, qu'il traite.

b. Exemples d'installations existantes dans le domaine de l'élevage.

b.1. Exemples d'installations à la ferme.

Sur le terrain, à l'échelle de la ferme, deux digesteurs sont principalement employés dans les installations de méthanisation (schéma n°12). (46) Ces installations utilisent les effluents des étables, qui sont soumis à une digestion anaérobie dans le digesteur, pour produire de l'énergie à partir des gaz combustibles émis. Ces deux réacteurs sont le digesteur complètement mélangé et le digesteur piston.

Paramètres et auteurs		(50)	(34)	(10)
MS	(%)	13,00	13,30	8,30
MO	(%)	10,40	5,90	6,50
NKj	(%)	4,50	5,70	3,70
P ₂ O ₅	(‰)	1,60	2,30	2,30
K ₂ O	(‰)	5,80	4,90	5,80
MgO	(‰)	-	0,60	1,60
CaO	(‰)	-	2,60	3,80
DCO	(g/l)	112,00		

Tableau n°8 : Composition moyenne du lisier de bovin (47).

MS	250-350	(g/l)
DBO ₅	125-175	(g/l)
N _{Kt}	1,5-4	(g/l)
P ₂ O ₅	0,5-2	(g/l)
K ₂ O	1,5-3	(g/l)
MgO	0,16	(g/l)
CaO	0,54	(g/l)

Tableau n°9 : Composition des déjections de l'espèce ovine (47).

Paramètres		(50)	(34)	(10)
MS	(%)	25,0	25,8	7,5
MO	(%)	13,7	18,1	5,0
N _{Kt}	(‰)	15,0	10,5	8,5
P ₂ O ₅	(‰)	16,2	10,4	3,8
K ₂ O	(‰)	7,5	7,2	5,0
MgO	(‰)	7,5	2,9	1,6
CaO	(‰)	30,0	40,0	8,0

Tableau n° 10 : Composition moyenne du lisier de volaille (47).

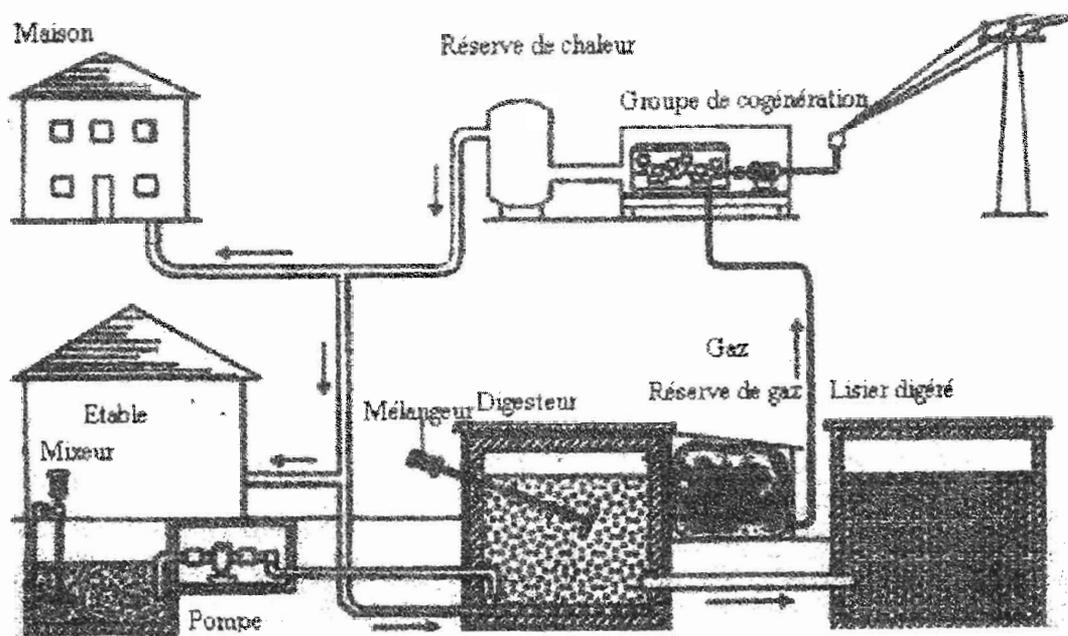


Schéma n°12 : Modèle d'une installation de méthanisation à la ferme (46).

De ces deux réacteurs découlent deux types principaux d'installations, le système accumulation-flux continu (ACF : accumulation continuous flow) avec le digesteur complètement mélangé et le système à flux continu avec le digesteur piston. Voir le tableau n°11 (46).

Digesteur complètement mélangé	Digesteur piston
Circulaire, cuve simple, vertical	Allongé, cuve horizontale
Complètement mélangé	Mélange vertical
Convient pour les substrats simples (déjections liquides)	Convient pour des substrats complexes (déjections solides)
Une partie du substrat non digéré peut atteindre la sortie	Normalement pas de court circuit entre l'entrée et la sortie, bonne hygiénisation
Température de digestion 20-37°C	Température de digestion 35 - 55°C
Temps de rétention 30 - 70 jours	Temps de rétention 15 - 30 jours

Tableau n°11 : Les caractéristiques des digesteurs complètement mélangés et à piston (46).

Le système ACF utilise une fosse de stockage comme cuve de digesteur. Cette fosse de stockage consiste en une fosse à lisier recouverte d'une couverture étanche aux gaz. Si le digesteur est plein, l'effluent se déverse dans une fosse de stockage ou un deuxième digesteur (schéma n°13) (46). Par ce système, les effluents sont complètement mélangés. Ce digesteur convient à des substrats simples, comme les déjections liquides. Mais une partie des substrats peut atteindre la sortie sans être digérée, ce qui veut dire que les court circuits sont possibles. En effet, si tout l'effluent n'est pas soumis aux conditions de digestion, on n'obtient pas l'effet maximum de la digestion anaérobie. Les pathogènes contenus dans l'effluent ne subiront pas totalement l'effet de la digestion.

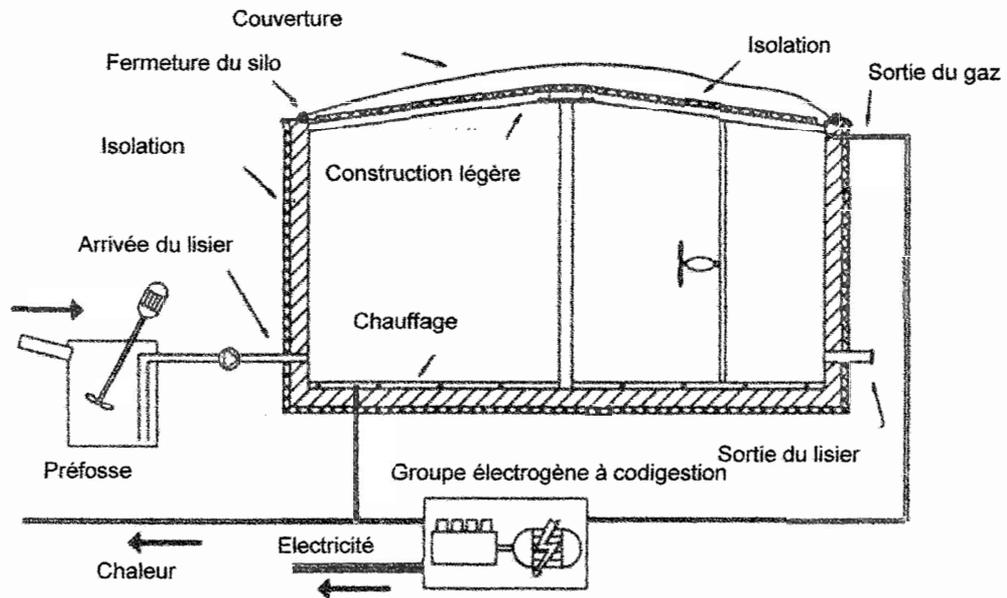


Schéma n° 13 : Schéma décrivant le fonctionnement du système ACF (46).

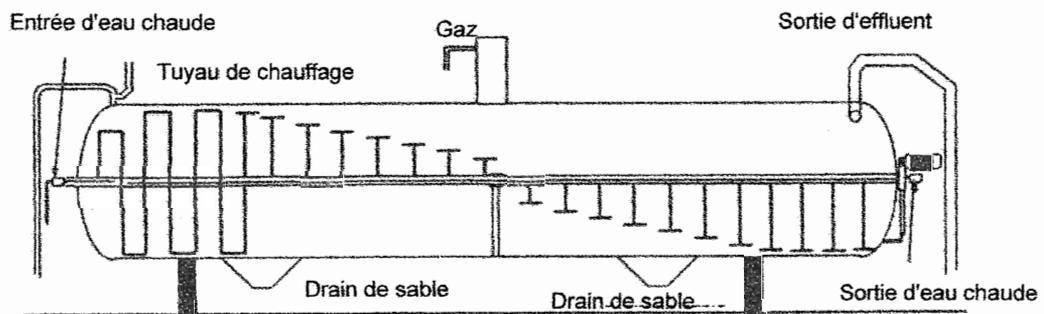


Schéma n° 14 : Schéma décrivant le fonctionnement du système continu (46).

Ce déficit d'exposition à la digestion anaérobie est un bon argument pour installer un deuxième digesteur à la suite du principal.

Le système continu consiste en un réservoir horizontal. Le temps de rétention moyen est de 15 à 30 jours. Le niveau est maintenu grâce à un siphon placé au niveau de la sortie. Ce système convient surtout à des substrats difficiles comme des déjections de volailles, de l'herbe, du maïs ensilage, du fumier contenant beaucoup de paille. (Voir schéma n°14) (46). Ce système présente une certaine sécurité face aux courts circuits, ce qui permet d'obtenir que l'effluent subisse au maximum l'effet de la digestion anaérobie.

Ces systèmes ne sont pas les seuls, qui traitent des effluents issus d'élevage. Mais ceux-ci sont des systèmes adaptés à l'échelle d'une ferme. Nous allons voir maintenant des systèmes qui traitent des effluents d'élevage à une échelle industrielle : les installations de biogaz centralisées.

b.2. Les installations de biogaz centralisées.

Les installations de biogaz centralisées correspondent à des installations de méthanisation à l'échelle industrielle (47). Elles ont été développées au Danemark depuis 1987 et sont fondées sur le principe de la codigestion de déchets organiques. Le substrat traité est un mélange composé en majorité de lisier animal (80% environ) et d'autres déchets organiques (4). (Schéma n°15) (47). Tous les déchets arrivent par différents moyens de transport à l'installation, ce qui permet de regrouper les effluents et de traiter de grosses quantités dans un seul et même endroit. Dans ce lieu, s'applique le principe de la marche en avant. Les effluents, une fois entrés dans le système, ne repassent pas là où ils sont déjà passés. Les effluents subissent, tout d'abord, une étape de préparation et de pré-désinfection où s'effectuent un tri et une séparation des effluents. Puis les effluents entrent dans le secteur des digesteurs. En ce lieu, se trouvent différents réacteurs. Suivant leurs caractéristiques, les effluents sont orientés vers un certain type de réacteur. A partir de cette étape de digestion deux chemins s'ouvrent : le chemin des gaz produits et celui des effluents fermentés. En effet, tout un secteur de l'installation est réservé au traitement du gaz et à son exploitation. Les effluents fermentés, eux, sont aussi traités en vue de leur valorisation.

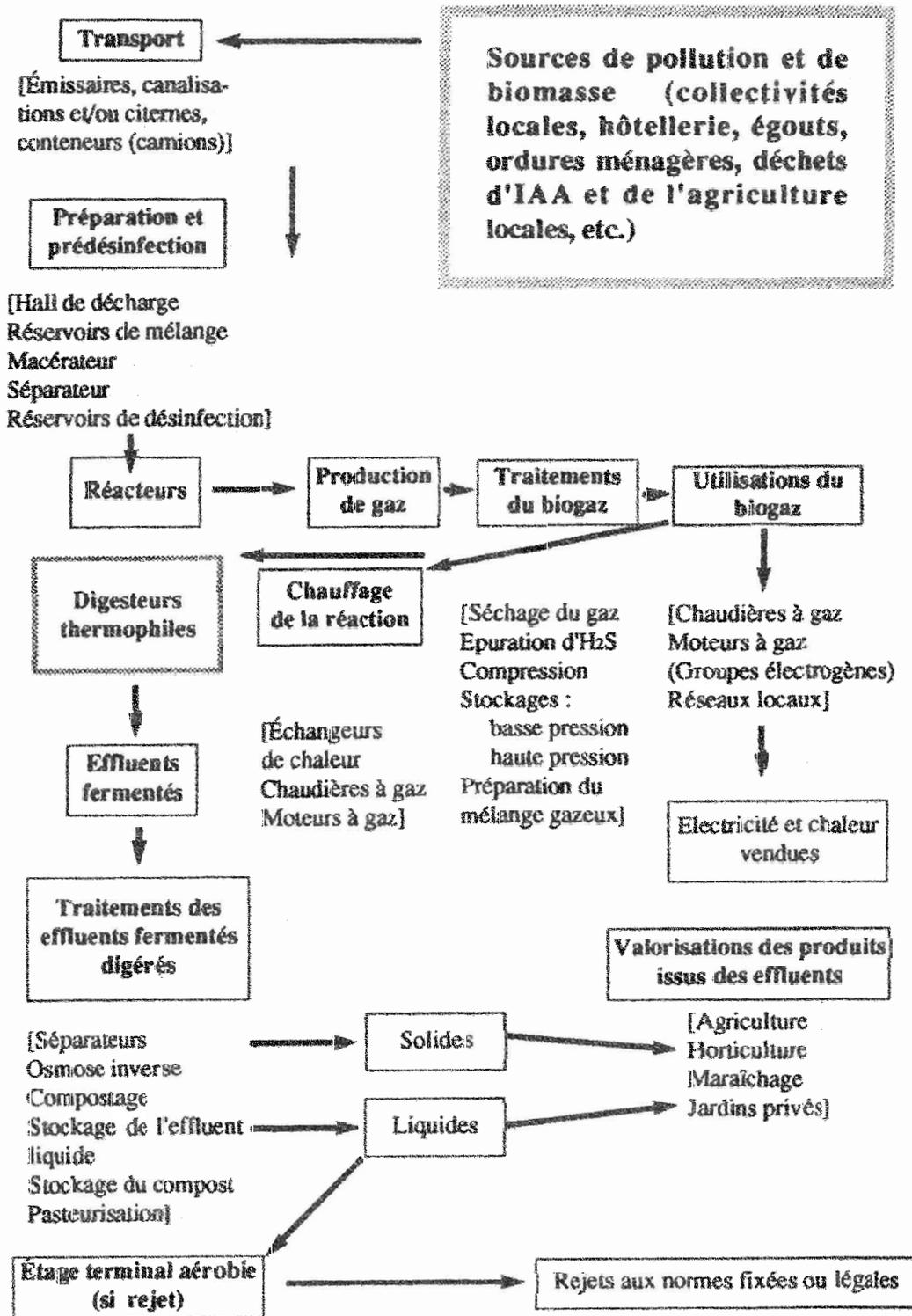


Schéma n° 15 : Principe de fonctionnement d'une unité de digestion anaérobie centralisée (47).

Ces installations permettent de traiter un mélange d'effluents,
Mais d'autres installations traitent seulement des effluents d'un seul type.

2. Le traitement des déchets organiques des industries.

a. Les différents déchets.

Différentes industries, de par leur fonctionnement, créent des eaux résiduaires, qu'il faut dépolluer pour pouvoir les rejeter dans la nature.

Ces industries sont, par exemple, l'industrie laitière, les conserveries, les abattoirs, les brasseries, ainsi que les usines de l'industrie de la pâte à papier.

Les caractéristiques de ces effluents sont récapitulées dans le tableau n°12, ainsi que les potentialités de production de biogaz à partir des différents déchets dans le tableau n° 13 (47). En effet, ces effluents sont hautement chargés en matières organiques et ont des taux de DBO5 et de DCO élevés. Ces différents effluents permettent de produire entre 0,35 mètres cubes de biogaz par kilogramme de matières organiques pour l'industrie papetière et 0,65 mètres cubes de biogaz par kilogramme de matières organiques dans l'industrie sucrière.

b. Exemples d'installations de biogaz existant en industries.

Nous pouvons prendre comme exemple la méthanisation des vinasses de distillerie chez REVICO (revalorisation des vinasses cognacaises), qui se fait grâce à un système de fermentation anaérobie avec un digesteur à cellules fixées sur des supports en matières plastiques (47). Le volume du digesteur est de 5600 m³. Ce système permet de traiter 70 tonnes de DCO par jour et le pourcentage de réduction de DCO est de 90%. Cette unité est l'une des plus importantes d'Europe (47).

Un autre exemple est le procédé UASB (upflow anaerobic sludge blanket), utilisé dans le digesteur de la sucrerie Naveau pour le traitement des eaux de lavage et les eaux résiduaires de la sucrerie (Hollone sur Geer, Belgique) (47). Le digesteur a une contenance de 750 m³. L'installation traite 39

TYPE D'INDUSTRIE	DBO ₅ (par quantité de produit)	DCO	MES
INDUSTRIE LAITIERE			
Poudre de lait	100 à 300g/100 l de lait		
Beurre	100 à 300g/100 l "		
Fromage	650 à 1 050g/100 l "		
Lait	350 à 750g/100 l "	60 000	
CONSERVERIES			
Haricots verts	3 à 5g/kg conserve		
Haricots blancs	5 à 7,5g/kg conserve		
Carottes	18-20g/kg conserve		
Petits pois	15-18g/kg conserve		
Épinards	25-35g/kg conserve		
Purée de tomates	6g/kg conserve		
Céleris	2-9g/kg conserve		
Champignons	20g/kg conserve		
Fruits au sirop	7-12g/kg conserve		
Jus de fruits	3-6g/kg conserve		
Vin	25-30 000 80-2000	25-30 000	80 à 200 000
Betterave	12-40 000 centaines		12-40 000
ABATTOIR	3-20g/kg carcasse 4 843 (75) 1 735 (75)	4 835	1 735
BRASSERIE	800g/100l bière 200-16 000 mg DBO ₅ /l		
PECTINERIE	7-23 000 centaines		
PATE À PAPIER	33-100 kg/t bois	200 à 2 700	100 à 3 000

Tableau n°12 : Taux de DBO₅, DCO et MES des différents déchets industriels (47).

**POTENTIALITÉS DE PRODUCTION DE BIOGAZ À PARTIR
DES DIFFÉRENTS TYPES DE DÉCHETS AGRO-INDUSTRIELS**
(m³ biogaz/kg matières organiques)

Industrie laitière	0,60
Production et transformation de légumes	0,60
Abattoirs	0,45
Transformation de la viande	0,50
Préparation de potages	0,40
Industrie sucrière	0,65
Moulins à céréales	0,40
Élaboration du café et du thé	0,60
Industrie vinicole	0,40
Production et transformation de fruits	0,55
Brasseries	0,50
Industrie papetière	0,35
Production de champignons	0,60
Aliments divers (levures...)	0,40

Tableau n°13 : Les potentialités de production de biogaz à partir des différents types de déchets agro-industriels (47).

tonnes par jour de DCO. Il permet une réduction des DCO de 91% et une production de gaz de 2,9 m³/ m³ de volume utile de réacteur. Cette technologie est fiable dans sa capacité de dépollution et de production de biogaz. Elle est donc adaptée à ce type d'effluent (47).

Mais certaines installations sont aussi conçues pour traiter les eaux usées urbaines.

3. Les eaux usées urbaines.

a. La forme de ces déchets.

Les eaux usées sont traitées dans des lieux spécialisés : les stations d'épuration ou STEP. Les eaux usées urbaines sont constituées des eaux usées ménagères (eaux d'évier, de lavage, de nettoyage, de bain) et d'eaux de vannes contenant les urines (2). Leur composition est donc complexe, mais leur composition moyenne est relativement stable pour celles des agglomérations au moins. Leur pH est compris entre 7 et 9. Les matières en suspension sont nombreuses (600 mg/kg). Elles contiennent des substances organiques : des composés de carbone, d'oxygène et d'hydrogène (résidus cellulosiques de papier, amidon, sucres, alcools, acides organiques, graisses) et des composés de carbone, d'oxygène, d'hydrogène et d'azote (fibrine, albumine, urée, etc.). Ces eaux contiennent aussi des pathogènes, comme des virus, des bactéries et des parasites. Les coliformes totaux varient de 50 à 50000 germes par ml suivant la qualité de l'eau envisagée. La DCO de ces eaux varient de 150 à 400 mg/l et la DCO de 450 à 750 mg/l.

Les eaux usées urbaines sont généralement traitées, en premier lieu, par des procédés aérobies. Ces principaux traitements donnent naissance à des boues activées à la sortie des décanteurs ou des clarificateurs.

La digestion anaérobie qui parfois traite ces boues activées a pour but majeur la désodorisation et une meilleure stabilisation de celles-ci (47).

b. Exemple d'installation de traitement anaérobie dans une station d'épuration.

Nous pouvons voir, dans le tableau n°14, les caractéristiques de l'installation à biogaz dans la station d'épuration de Bayeux (47). Cette installation traite les boues issues d'un traitement aérobie. Le digesteur en béton fonctionne suivant un procédé infiniment mélangé et son volume est de 1100 m³. Le volume de boues traitées est de 30 à 50 m³/j. Le temps de séjour est de 20 à 30 jours. Cette digestion produit 0,32 mètres cubes de gaz / mètre cube de digesteur. Cette digestion anaérobie des boues stabilisées permet une réduction de 45 à 50% de la teneur en matière organique contenue dans celle-ci. Le biogaz produit est valorisé. Il sert au chauffage d'une piscine municipale.

Il y a aussi des installations qui traitent les ordures ménagères.

4. Les ordures ménagères traitables par méthanisation.

a. La composition des ordures ménagères.

Les deux tiers des ordures ménagères sont biodégradables (les papiers cartonnés, matières putrescibles). Il faut donc pour que celles-ci soient exploitables réaliser un tri des ordures pour éliminer le verre, les métaux, les plastiques et les textiles (tableau n°15) (47).

b. Exemples d'installations existantes.

Plusieurs systèmes fondés sur la méthanisation sont employés. Il y a tout d'abord les décharges contrôlées (ou landfills) qui correspondent à de grands digesteurs à partir desquels on récupère le biogaz. Dans ces décharges d'ordures ménagères recouvertes, il faut 20 ans pour produire 100 à 300 mètres cubes de gaz à partir d'une tonne de résidus domestiques. (47)

Mais il y a des procédés plus performants comme le procédé Valorga. C'est un procédé de digestion anaérobie continu et piston, qui traite la fraction organique des ordures ménagères. Après un tri mécanique, les ordures sont...

Maitre d'Ouvrage	Commune de Bayeux.
Type d'effluent traité	boues biologiques résultant du traitement aérobie
Volume de boues traité	30 à 50 m ³ /jour
Procédé du digesteur	infiniment mélangé
Volume du digesteur	1 100 m ³
Matériau du digesteur	béton
Type d'agitation	recirculation des boues
Type de stockage du gaz	gazomètre à cloche
Utilisation du gaz	chauffage du digesteur et de la piscine municipale.
Coût des travaux de récupération du biogaz	670 kF pour l'isolation du digesteur et le transport du gaz sur 500 mètres
Fonctionnement du digesteur	
Temps de séjour	22 à 30 jours
Teneur en matière sèche des boues	40 g/l
Teneur en matière organique des boues	28 g/l (70 %)
Production de gaz/m ³ de digesteur	0,32 m ³
Production de gaz/m ³ de boues	9 m ³
Pourcentage de méthane	65 à 70 %
Productivité par kg de matière sèche	0,27 m ³
Productivité par kg de matière organique	0,41 m ³
Autoconsommation d'énergie	50 %

Tableau n°14: Caractéristiques de l'exploitation de la station d'épuration de Bayeux (47).

Moyenne française 1990 (% du poids frais)

Papiers-cartons	30
Matières putrescibles	25
Verres	12
Métaux	6
Plastiques	10
Textiles	2
Éléments fins (< 20mm)	15

Tableau n° 15 : Composition moyenne des ordures ménagères (47).

mêlées à un reliquat liquide provenant de la sortie du réacteur. L'homogénéisation du produit se fait par circulation sous pression d'une partie du biogaz produit. Il existe une installation de ce type à Amiens. Ce site produit 100 mètres cubes de biogaz/tonnes d'ordures ménagères. La température dans le digesteur varie de 34 à 40°C. Le temps de rétention est compris entre 17 à 25 jours (47).

Le procédé DRANCO (Dry anaerobic compost), lui, est composé d'un réacteur piston thermophile à flux descendant vertical. Il traite des ordures ménagères triées. Il est utilisé à Brech en Belgique. Le digesteur a un volume utile de 800m³. Le temps de rétention est de 17 jours. 40 à 50 tonnes de déchets sont traités par jour. Il permet une production de 100 mètres cubes de gaz/tonne de déchets introduits (47).

La digestion anaérobie de ces ordures ménagères permet une très bonne valorisation de ces déchets et sous forme de biogaz et sous forme d'amendement organique. Cette technologie semble être une solution d'avenir.

Les installations produisant du biogaz présentent une grande variété de technologies, suivant la catégorie des déchets qu'elles traitent, mais aussi lorsqu'elles traitent la même sorte de déchets. Les installations ne fonctionnent pas toutes sous les mêmes conditions et le même principe. Il est très difficile de comparer et encore plus de faire la synthèse de leurs résultats. Cela pose un problème, nous le verrons plus loin, pour déterminer l'effet de la méthanisation sur les pathogènes. Mais il n'en reste pas moins que la méthanisation apparaît être une bonne technologie pour traiter les différents effluents organiques. C'est pour cela qu'il est intéressant maintenant de voir quelle est la répartition et l'importance de la méthanisation en France et dans d'autres pays.

III. La répartition des installations de biogaz.

Nous avons vu que les installations de biogaz peuvent présenter des avantages certains pour le traitement des déchets. Mais nous avons vu aussi que ce procédé venait juste de connaître une renaissance. Il peut donc être

intéressant de voir quel est le développement de ce procédé dans différents pays.

1. La méthanisation en France.

En France, en ce qui concerne la méthanisation, nous nous trouvons encore à un stade expérimental d'installation à la ferme. En effet, 95 unités tests à la ferme ont été installées de 1979 à 1983 (47). Sinon nous retrouvons aussi quelques installations dans l'agro-industrie, les stations d'épuration et quelques installations de traitements des déchets ménagers. Mais la France ne s'est pas encore lancée dans les grandes installations à échelle industrielle que sont les installations centralisées de biogaz, telles qu'il en existe au Danemark, en Italie, aux Pays bas et en Espagne (47).

2. Quelques exemples de niveau d'équipement dans d'autres pays.

a. Le Royaume Uni.

Au Royaume Uni, 25 digesteurs agricoles sont en fonction aujourd'hui (sur 45 en 1975). 7 installations centralisées sont en projet (39). Dans ce pays, la méthanisation après quelques balbutiements semble prendre de l'essor.

b. La Suisse.

La Suisse est, elle aussi, équipée d'installations de méthanisation. 85 installations étaient exploitées dans le milieu agricole en 1995. 18 installations étaient en fonctionnement en 1997 à des fins industrielles (tableau n°16) (82).

Type d'industrie	Nombre d'installation
Brasserie	1
Entreprise de l'industrie de la pomme de terre	3
Distillerie	4
Sucrierie	2
Usine produisant de la farine animale	1
Papeterie/cartonnerie	2
Fabricant de produits surgelés	1
Industrie laitière	1
Industrie de levures	1
Fabricant de condiments	1
Codigestion sur une station d'épuration	1
Total	18

Tableau n°16 : Les installations industrielles produisant du biogaz en Suisse (82)

c. La Norvège.

La Norvège possède des réacteurs anaérobies dans l'agriculture et l'industrie (voir le tableau n°17). Mais aussi, 17 réacteurs dans des stations d'épurations. Ces réacteurs sont tous mésophiliques. Leur utilisation est précédée par un prétraitement thermophile. Les volumes de ces réacteurs varient de 400 à 24000 mètres cubes. Leurs temps de rétention varient de 10 à 150 jours (11).

Localisation	Nombre de digesteurs	Volume	Température	Temps de Rétention
		m ³	°C	jours
Orland	1	50	56	21
Etnedal	1	11		
Gjovik	1	1440	35,5	
Skreia	2	652	35	~2,5
Halden	1	1750		
Sarpsborg	2	26380		

Tableau n°17 : installations norvégiennes dans l'agriculture et l'industrie (11).

d. Le Danemark.

Dans ce pays, 126 installations sont dénombrées en 1998 (voir le tableau n°18).

Type d'installations de biogaz	Nombre d'installation
Installations de traitement des eaux usées	64
Installations de décharge (landfills)	17
Installations de traitement des déchets industriels	5
Installations centralisées de biogaz, codigestion	20
installations à la ferme	20
Total	126

Tableau n°18 : Aperçu des installations existantes au Danemark (3).

La particularité du Danemark, est la présence d'installations centralisées de biogaz qui permettent de traiter les effluents d'élevage en grande quantité et en codigestion avec d'autres déchets d'origines divers (3).

f. L'Autriche.

191 installations sont en fonctionnement (tableau n°19) (13).

Type d'installations de biogaz	Nombre d'installation
Digesteurs de boues de stations d'épuration	88
Installations de biogaz de décharge	31
Stations d'épuration d'effluents industriels	20
Installations de méthanisation agricole	50
Installations de méthanisation de déchets ménagers	2
Total	191

Tableau n°19 : Aperçu des installations existant en Autriche (13).

Nous voyons donc que la méthanisation prend de l'essor dans les pays européens. La France semble être en retard par rapport à certains autres pays tel que le Danemark qui lui est à la pointe de cette technologie. Mais cette répartition est en évolution continue et cette technologie est pleine d'avenir.

La méthanisation, qui a pour base un phénomène naturel, a été maîtrisée par l'homme grâce à diverses technologies, certaines plus

performantes que d'autres. La maîtrise de ce phénomène demande une surveillance attentive et des conditions assez strictes, car la digestion anaérobie repose sur un équilibre fragile de bactéries spécifiques. La méthanisation apparaît être un procédé de traitement des matières organiques très intéressant pour le respect de l'environnement, aussi bien par son effet désodorisant que dépolluant. Mais la méthanisation a, de plus, l'avantage de permettre l'obtention à partir d'effluents organiques divers d'un engrais de qualité et d'un gaz combustible, source d'énergie. De multiples techniques ont été mises au point, chacune adaptée à une catégorie d'effluent. La méthanisation commence à dépasser son aspect expérimental, avec des installations pratiquant la codigestion à l'échelle industrielle, telles que les installations centralisées de biogaz danoises. Bref, la méthanisation est une technologie qui prend son envol et qui devrait prendre de plus en plus d'importance. Bien que cette technologie apparaisse miraculeuse, on a déjà vu qu'au point de vue de la dépollution, elle avait ses limites. Or, elle traite des matières organiques qui sont riches en éléments pathogènes tel que les bactéries, les virus et les parasites. Une question se pose alors : la méthanisation est-elle capable de résoudre le problème des pathogènes en les éliminant ou en réduisant leur nombre ? Pour essayer de répondre à cette question, il faut tout d'abord savoir sur quels agents pathogènes la méthanisation devrait avoir un effet.

Deuxième partie : les agents pathogènes.

A. Généralités et définitions.

Nous venons de nous intéresser à une technologie de traitement des déchets organiques, la méthanisation. Or, les déchets ne sont pas des produits sans danger. En effet, ils contiennent divers agents, qui peuvent se révéler dangereux pour la santé animale et humaine. Parmi ces agents, se trouvent des produits chimiques, mais aussi, ces agents biologiques que sont les organismes pathogènes, dont les plus importants sont les bactéries, les virus et les parasites (14).

Un organisme est dit pathogène, s'il possède un pouvoir pathogène. C'est à dire la possibilité de provoquer une maladie chez un organisme hôte (38). Cette capacité d'induire une maladie est le résultat du mélange complexe des moyens pathogéniques de l'agent et de la réceptivité de l'hôte.

En effet, le pouvoir pathogène de ces agents va dépendre en partie de la spécificité du pathogène, donc de l'adaptation de cet organisme à l'espèce hôte. On peut, ainsi, séparer les pathogènes en deux groupes, les pathogènes stricts et les pathogènes opportunistes.

Les pathogènes stricts sont spécifiques d'un type d'hôte et provoquent chez celui-ci des symptômes plus ou moins marqués.

Mais dans certaines occasions, les symptômes peuvent même être inapparents. L'hôte héberge ces agents pathogènes, sans que ce manifeste le moindre trouble, mais il peut excréter des organismes pathogènes pendant plusieurs mois voire plusieurs années et les disséminer dans le milieu extérieur. Dans cette situation, l'hôte est appelé « porteur sain » (38). L'hôte peut, aussi, ne pas exprimer encore de signes cliniques apparents lors de la phase d'induction de la maladie et excréter, en même temps, des agents pathogènes dans le milieu extérieur pendant plusieurs jours à plusieurs semaines. Il peut

arriver, aussi, que des agents pathogènes persistent à l'intérieur de l'hôte après sa guérison clinique, c'est à dire la disparition des signes cliniques de la maladie. Ils peuvent rester présents dans l'hôte durant toute sa vie et peuvent être éliminés dans le milieu extérieur. L'hôte, dans ce cas, est qualifié de «porteur chronique ».

Les pathogènes opportunistes, eux, ne sont pas spécifiques à un hôte précis. Ils profitent d'une baisse des défenses de l'organisme hôte, de conditions particulières ou d'un usage inhabituel du milieu pour induire une maladie. Dans des conditions normales, ces organismes sont des commensaux ou des saprophytes (1). Ils sont d'origine tellurique ou appartiennent à la flore commensale de l'hôte. Le commensalisme définit une relation, entre deux organismes, bénéfique à l'un sans affecter l'autre. Il existe plusieurs flores commensales chez les animaux, comme la flore de la bouche, du tube digestif, de la peau, des voies respiratoires etc... . Les micro-organismes saprophytes, eux, se développent indépendamment de la matière vivante.

Les pathogènes stricts ou spécifiques possèdent, donc, un pouvoir pathogène bien connu et provoquent des troubles bien connus. Les pathogènes opportunistes provoquent des troubles non spécifiques chez les sujets immuno-déprimés aux défenses amoindries ou dans des conditions particulières (38).

B. Les différents organismes pathogènes présents dans les déchets organiques.

Trois types d'organismes pathogènes présents dans les déchets organiques sont préoccupants : les bactéries, les virus, les parasites.

I. Les bactéries.

1. Généralités.

Les bactéries sont des êtres unicellulaires procaryotes, c'est à dire que leur «noyau » n'est pas limité par une membrane nucléaire et qu'il n'est composé que d'un seul chromosome (76).

Toutes les bactéries ne sont pas pathogènes. Parmi les bactéries pathogènes, toutes n'emploient pas les mêmes mécanismes pour provoquer une maladie.

Certaines synthétisent des toxines. La bactérie produit une protéine, appelée toxine, qui va provoquer des troubles chez l'organisme hôte. On parle de toxi-infection. Par exemple, la toxine de *Clostridium botulinum* va provoquer une paralysie musculaire, qui peut aller jusqu'à l'arrêt respiratoire, en inhibant la libération d'acétylcholine au niveau des synapses.

D'autres bactéries produisent d'autres molécules, comme des enzymes, qui leur permettent d'augmenter leur capacité de pénétration dans l'hôte et dans les cellules de l'hôte. C'est le cas des Staphylocoques à coagulase positive, qui produisent de l'hyaluronidase, qui attaque l'acide hyaluronique servant de ciment intercellulaire, permettant ainsi leur diffusion tissulaire.

Un autre système pathogénique existant chez les bactéries est lié à la destruction des cellules de l'hôte, comme par exemple *Salmonella typhi* qui envahit les cellules de la muqueuse de intestin grêle. Ces bactéries possèdent, donc, un pouvoir de contamination, de multiplication et de pénétration.

D'autres bactéries peuvent provoquer un choc endotoxinique. Ce choc est dû à la libération d'endotoxines, qui sont des composants lipidiques du polysaccharide (LPS) de la paroi des bactéries Gram négatif (76).

2. Exemples de bactéries pathogènes.

Dans l'annexe n°1, se trouve la liste des bactéries pathogènes majeures, qui sont citées dans la littérature, comme pouvant être retrouvées dans les déchets organiques. Cette liste n'est pas exhaustive, aussi bien dans le nombre de bactéries pathogènes, que dans les espèces cibles et les déchets où on les retrouve. Mais nous allons aborder plus précisément quelques exemples de bactéries pathogènes.

a. Les salmonelles.

Les salmonelles sont des agents pathogènes très fréquemment recensés dans les effluents organiques et qui posent des problèmes de santé publique.

Elles font partie de la famille des *Enterobacteriaceae*. Ce sont des bacilles à gram négatif, non sporulés, anaérobies facultatifs (35).

Certaines salmonelles sont strictement adaptées à l'homme. Ce sont les *Salmonella typhi* et *paratyphi*, et elles sont responsables des fièvres typhoïdes et paratyphoïdiques. Le réservoir de ces germes est constitué par les hommes malades et les porteurs sains.

Ces salmonelles traversent la paroi muqueuse de l'intestin et se multiplient dans les ganglions mésentériques. Elles arrivent dans le sang *via* le canal thoracique puis passent dans les voies biliaires où elles se multiplient, puis repassent alors dans l'intestin grêle et le colon. C'est à partir de cette étape que les selles acquièrent leur caractère infectant. A la suite de la phagocytose des germes, la libération des substances pyrogènes est responsable de la fièvre et de la leucopénie. Des endotoxines sont responsables, elles, de l'ulcération des plaques de Peyer et de l'état de typhos. Les salmonelles peuvent persister dans les phagocytes, ce qui retarde leur destruction.

Après une phase d'incubation souvent silencieuse de deux à quatre semaines, l'invasion se traduit par de la fièvre, des céphalées et des vertiges, des signes digestifs (vomissement, constipation puis diarrhée), d'une splénomégalie et d'une hépatomégalie.

D'autres salmonelles sont ubiquistes (*Salmonella dublin* et *typhimurium*) et ont pour principal réservoir le tube digestif (intestin grêle) des animaux. Tous les animaux domestiques ou d'élevage peuvent être porteurs et de façon asymptomatiques. Ce sont des bactéries entéropathogènes invasives. Tout d'abord, il y a prolifération des germes au contact de la muqueuse intestinale avec destruction de la bordure en brosse, puis il peut survenir une diffusion sanguine. Les infections à *Salmonella* surviennent plus facilement chez les sujets fragilisés. L'endotoxine joue un rôle décisif dans la pénétration et l'invasion des cellules. La quantité de Salmonelles ingérées influe sur la durée de l'incubation et sur l'intensité des signes cliniques. Les signes cliniques sont des vomissements et des diarrhées avec des douleurs abdominales, de la fièvre et des algies diverses. Cette symptomatologie arrive douze à quatorze heures après l'ingestion. Des salmonelloses septicémiques ou focales peuvent se déclarer chez des patients débilisés (35).

b. Les shigelles.

Ces bactéries (*Shigella dysenteriae*, *Shigella boydii*, *Shigella sonnei*, *Shigella flexneri*.) appartiennent aussi à la famille des *Enterobacteriaceae*. Ce sont des bacilles gram négatif, aéro-anaérobies facultatifs.

La shigellose est une maladie, qui atteint l'homme lors de l'ingestion, le plus souvent, d'eau contaminée par des shigelles.

Ce sont des bactéries strictement pathogènes pour l'homme. Elles sont douées d'un pouvoir invasif et destructeur de la muqueuse colique, déclenchant des entérocolites inflammatoires fébriles qui peuvent évoluer jusqu'à un syndrome dysentérique.

L'invasion et la multiplication restent localisées à la couche superficielle de l'épithélium colique et les bactériémies sont exceptionnelles, sauf chez les personnes débilisées.

La nécrose inflammatoire réactionnelle colique entraîne la formation d'ulcérations et de micro-abcès avec élimination dans les selles de mucus, de granulocytes, d'érythrocytes, et de débris cellulaires.

De nombreux facteurs sont impliqués dans le pouvoir pathogène des *Shigella*, tels que le lipopolysaccharide, la présence de plasmides nécessaires à l'invasion et une toxine dysentérique à propriété neurocytotoxique.

Après une incubation de un à trois jours, il y a apparition brutale de fièvre, d'épreintes, puis apparition de diarrhée avec émission de nombreuses selles par jour, fécales, glaireuses et parfois sanglantes et de déshydratation. Après deux à trois jours de diarrhée, une constipation sévère s'installe avec un syndrome hémolytique et urémique, exceptionnellement il peut y avoir une thrombose de l'artère mésentérique. Les atteintes neurologiques sont fréquentes. Dans les cas rares de bactériémies, les signes cliniques augmentent d'intensité (35).

c. *Escherichia coli*.

Cette bactérie appartient aussi à la famille des *Enterobacteriaceae*. Ce sont des bacilles gram négatif.

E. coli est impliquée dans un grand nombre d'infection chez l'homme et chez les animaux par des sérovars, capables de coloniser les muqueuses avec ou sans invasion tissulaire, capables de produire des toxines ou capables de donner lieu à des suppurations massives ou à des disséminations systémiques.

Les *E. coli* sont responsables, tout d'abord, d'infections intestinales. Mais tous les *E. coli* n'ont pas le même pouvoir pathogène.

Il y a des *E. coli* entéropathogènes (EPEC) responsables de diarrhées infantiles aiguës ou chroniques. Cette virulence est due à une adhésion étroite aux entérocytes codée par un plasmide, qui entraîne secondairement une destruction des microvillosités intestinales.

Les *E. coli* entérotoxigènes (ETEC), elles, sont responsables d'épidémies chez les enfants dans les pays en voie de développement et des diarrhées du voyageur ou «turista». Il y a colonisation du tube digestif et élaboration de toxines, qui provoquent des diarrhées, des crampes abdominales, des nausées et des fièvres légères. Cette virulence est due à leur capacité d'adhérer aux entérocytes par l'intermédiaire de *fimbriae* et de synthétiser deux types d'entérotoxines, une stable et l'autre instable à l'action de la chaleur.

Les *E. coli* entéroinvasives (EIEC) sont responsables de syndromes dysentériques et de diarrhées chez l'adulte. Les EIEC sont capables d'envahir les cellules intestinales et de synthétiser une toxine dysentérique.

Les *E. coli* entérohémorragiques (EHEC) sont responsables de colites hémorragiques avec des syndromes hémorragiques et urémiques et parfois un purpura thrombolytique, qui peut aboutir à la mort du patient. Les sérogroupes incriminés est O157, O26, O111. Ces souches n'envahissent pas les cellules intestinales, mais agissent par la synthèse d'une toxine. Un autre facteur de virulence serait la synthèse d'une *fimbriae*, qui permettrait l'attachement de la bactérie aux cellules épithéliales.

Les *E. coli* entéroadhérentes (EAEC) ne produisent pas de facteur d'adhérence, comme les EPEC. Elles sont identifiées uniquement par leur adhérence aux cellules Hep2. Un plasmide serait impliqué dans leur virulence.

Les *E. coli* sont aussi responsables d'infections urinaires. La pathogénie de ces infections urinaires résulte d'un équilibre entre la virulence de la souche et la résistance de l'hôte à l'infection. Le pouvoir pathogène des souches incriminées est dû à la production d'hémolysines, de sidérophores et à la résistance à l'activité bactéricide du sérum. Ces souches sont, de plus, capables d'adhérer aux cellules uroépithéliales avec des adhésines.

Les *E. coli* peuvent être liés à des infections abdominales paraintestinales, comme des appendicites, des cholécystites, péritonites, des septicémies et des méningites néonatales, et des suppurations diverses (35).

d. *Clostridium botulinum* et *perfringens*.

Les *Clostridium* sont des bacilles gram positif, qui forment des spores à l'origine de leur thermotolérance.

Clostridium botulinum est tellurique et ne pénètre qu'accidentellement dans l'organisme, où il sécrète une endotoxine. *Clostridium perfringens* sécrète aussi des toxines et survit dans l'environnement sous forme sporulé, mais il a, aussi, la capacité de se multiplier dans le tube digestif des vertébrés. Les *Clostridium* sont largement répandues dans les sols où ils survivent grâce à leur spore.

Clostridium botulique est à l'origine du botulisme, qui est une neuroparalyse liée à une toxine. L'intoxication est la conséquence de l'ingestion de cette toxine préformée souvent dans l'aliment. Le botulisme atteint l'homme et de nombreux animaux.

Clostridium perfringens peut, lui, provoquer des myonécroses, des cholécystites gangreneuses, des septicémies puerpérales, des pneumonies nécrosantes et des entérocolites nécrosantes. *Clostridium perfringens* peut être, aussi, l'agent d'une intoxication alimentaire s'accompagnant de diarrhée six à dix huit heures après l'ingestion de l'aliment souillé. L'affection la plus fréquente est la myonécrose, c'est à dire, la gangrène gazeuse. Elle se manifeste par une nécrose du tissu musculaire, avec formation de gaz, associée à des signes cliniques toxémiques. Les *Clostridium perfringens* produisent cinq toxines différentes (alpha, bêta, delta, epsilon, iota). Toutes les

souches de *Clostridium perfringens* produisent la toxine alpha (phospholipase C) ,qui hydrolyse la lécithine en diglycéride et phosphorylcholine. (34).

e. *Bacillus anthracis*.

Bacillus anthracis est un bacille gram positif, sporogène, aéro-anaérobie facultatif. Il possède une très grande résistance au milieu extérieur grâce à sa spore. Sa niche écologique est le sol, mais on le retrouve dans les organismes malades, les cadavres et les produits d'origine animale.

Bacillus anthracis est responsable du charbon. Les ovins et les bovins sont très sensibles, mais l'homme est, aussi, une espèce sensible. Les spores pénètrent dans les tissus et y germent, donnent naissance à des bacilles qui s'encapsulent, se multiplient et pénètrent dans les ganglions lymphatiques afférents. Après une période de gangliopéxie et de splénopéxie, une septicémie tardive se déclenche provoquant une atteinte bactérienne de tous les tissus. Cela provoque un oedème hémorragique des muqueuses et un exsudat d'un sang noir et poisseux par les orifices naturels du malade. La mort survient rapidement et elle est due, chez l'homme, à la toxine charbonneuse.

Différentes formes cliniques existent suivant le point de pénétration de *B. anthracis*. Le charbon cutané consiste en une simple pustule charbonneuse au point de pénétration. Le charbon pulmonaire provient de l'inhalation des spores. Le charbon gastro-intestinal est dû à l'ingestion de viande contaminée. Il existe aussi une méningite charbonneuse. Mais quelle que soit la forme initiale de la maladie, une atteinte septicémique peut survenir.

La virulence du bacille provient de sa capsule, qui le rend résistant à la phagocytose, mais aussi de sa toxine. Cette toxine est formée de trois facteurs (facteur I : oedématogène, facteur II : immunogène, facteur III : létal), qui pris séparément sont inactifs (35).

Nous allons, maintenant, nous pencher sur les virus pathogènes.

II. Les virus.

1. Généralités.

Les virus sont des agents infectieux (35) à la limite du monde du vivant et du monde moléculaire, capable de pénétrer, de diffuser et de se multiplier dans un organisme hôte (1).

Ils sont composés d'un génome, qui constitue son information génétique, fait d'ADN ou d'ARN et d'une capsid, structure protéique, qui entoure le génome. Certains virus sont enveloppés, c'est à dire que la nucléocapsid est entouré par une bicouche lipidique (21).

Les virus possèdent une spécificité d'hôte, leur structure ne leur permettant de pénétrer, que dans des cellules bien déterminées. Quand le virus reconnaît la cellule grâce à ces récepteurs, il est absorbé par la cellule et libère son acide nucléique et le cycle de multiplication virale peut débuter.

Si la multiplication est immédiate, active et rapide, celle-ci entraîne la destruction de la cellule hôte.

Si un équilibre se crée, des virions peuvent être produits en continu et provoquer une maladie chronique ou bien il se peut qu'il n'y ait pas expression du virus pendant un certain temps avant la destruction de la cellule.

Si le génome viral s'intègre dans le génome cellulaire, cela peut provoquer l'apparition d'un cancer (21).

2. Exemples de virus pathogènes.

Dans l'annexe n°2, se trouve la liste des virus majeurs cités dans la littérature, qui peuvent être présents dans les déchets organiques. Nous allons, aussi, aborder quelques exemples de virus pathogènes.

a. Virus de l'hépatite A.

Il s'agit d'un virus non enveloppé de 27 à 32 nm de diamètre. Le virus de l'hépatite A (HAV) est un membre de la famille des *Picornaviridae* et du genre *Hepatovirus*.

L'infection, qui touche l'homme, démarre par l'ingestion de matériel contaminé par des fèces contenant des HAV. La période entre la présence du virus dans le tube digestif et le déclenchement de l'hépatite n'est pas encore bien connu. Le premier site de réplication de l'HAV est l'hépatocyte et provoque une hépatite. Durant l'incubation, une virémie est observée, ainsi que le passage fécal par l'intermédiaire de la bile. Les HAV peuvent circuler dans le sang enfermé dans des fragments de membrane. La maladie se décompose en quatre phases cliniques. L'incubation dure dix à soixante jours. Puis, elle est suivie de l'étape préictérique, qui dure de quelques jours à une semaine. L'étape préictérique est accompagnée d'anorexie, de fièvre, de fatigue, de malaise, de myalgie, de nausée et de vomissement. Puis ensuite, l'étape préictérique est suivie d'une phase ictérique, marquée par une urine brune foncée (bilirubinurie) et une coloration jaune des muqueuses, des conjonctives, de la sclère et de la peau. Après la période ictérique, s'ensuit la période de convalescence (32).

b. Le virus de l'hépatite E.

Le virus de l'hépatite E (HEV) a une classification incertaine, mais il est souvent rapproché des *Calicivirus*. C'est un virus sphérique de 27 à 30 nm de diamètre. Il est non enveloppé.

La voie d'entrée du virus est la voie orale. Le site de première réplication est présumée être le tractus intestinal. Le virus rejoint ensuite le foie par la veine porte, où il se réplique dans le cytoplasme des hépatocytes et est relargué dans la bile et le sang.

La maladie provoquée par l'HEV n'est pas bien différente des autres hépatites sur le plan clinique. L'HEV provoque une jaunisse accompagnée d'anorexie, d'hépatomégalie, de fièvre, de nausée, de vomissement et d'un abdomen douloureux et dur (33).

c. Les *Enterovirus* : Les *Poliovirus*, les *Coxsackievirus* et les *Echovirus*.

Les *Enterovirus* sont des virus icosaédriques, non enveloppés de la famille des *Picornaviridae*. Les *Enterovirus* sont thermolabiles et sont rapidement inactivés par les U.V..

La porte d'entrée des virus dans l'organisme est le tractus alimentaire. Après une multiplication dans les tissus lymphoïdes du pharynx, une virémie peut avoir lieu. Il s'en suit une prolifération dans les cellules du système réticuloendothélial et les virus se développent dans les organes cibles (moelle épinière, encéphale, méninges, myocarde, peau).

Souvent les infections dues aux *Enterovirus* passent inaperçues, car elles donnent des manifestations subcliniques. Mais les *Enterovirus* peuvent aussi donner différentes affections, comme des poliomyélites, des méningites et parésies moyennes, des pleurodynies, des herpangina, des maladies des mains, des pieds et de la bouche (exanthème suivi d'ulcérations intrabuccales et de vésicules sur les mains et les pieds), des maladies des voies supérieures respiratoires, des conjonctivites, des maladies cardiaques et des maladies gastro-intestinales (32).

d. Les *Rotavirus*.

Les *Rotavirus* font partie de la famille des *Reoviridae*. Les *Rotavirus* sont des virus à ARN de 70nm de diamètre.

Ces virus, chez l'homme, provoquent des lésions au niveau de la muqueuse du jéjunum. Ces lésions entraînent des diarrhées et des vomissements sévères chez les jeunes (33).

III. Les parasites.

Un parasite est un être vivant, qui se nourrit aux dépens d'un autre organisme appelé hôte. Mais cette relation n'est bénéfique que pour l'un des

partenaires, celui qui est hébergé par l'autre. Certains micro-organismes sont des parasites facultatifs et d'autres des parasites obligatoires. Le parasitisme est généralement nuisible et souvent nocif pour l'hôte. L'action pathogène des parasites peut s'exercer de façon assez diverse. Le parasite peut réaliser une action spoliatrice en prélevant du sang à l'hôte, en se nourrissant de chyme intestinal ou encore en se nourrissant des tissus de l'hôte. Ces divers tissus spoliés à l'hôte peuvent être, par exemple, des fragments de muqueuse intestinale (ex : grands strongles du cheval), des parenchymes (ex : formes immatures de *Fasciola hepatica* dans le parenchyme hépatique), ou bien de la peau (ex : les larves d'acariens, qui par digestion externe, liquéfient et absorbent la peau de l'hôte). Le parasite peut réaliser aussi une action pathogène mécanique par des obstructions, par des compressions (kystes hydatiques), par des traumatismes (perforations des parois, trajets des migrations) et par des irritations provoquées par les mouvements parasitaires (*Fasciola hepatica* par les épines de sa cuticule). Les parasites peuvent avoir aussi une action toxique par les substances, qu'ils éliminent (la salive des arthropodes piqueurs, les neurotoxines produites dans les coccidioses bovines aiguës dues à *Eimeria zuerni*). Enfin, les parasites peuvent exercer une action antigénique à partir d'antigènes somatiques ou d'antigènes métaboliques (16).

Les parasites sont majoritairement des protozoaires et des helminthes, dont font partie les nématodes, les cestodes et les trématodes.

1. Les helminthes.

Les helminthes ou vers, pathogènes se répartissent dans trois classes principales, les cestodes, les trématodes et les nématodes.

Les helminthes parasites évoluent pendant toute ou une partie de leur cycle dans l'organisme hôte, où ils se trouvent à l'état adulte ou à l'état de larve.

Ces parasites entraînent divers troubles suivant leur mode de nutrition et leur cycle : les vers intestinaux, par exemple, se nourrissent aux dépens de l'hôte, la larve de ténia échinocoque détruit le foie de son hôte et les trichines peuvent par toxi-infection entraîner la mort de son hôte (73).

Ces parasites sont adaptés pour survivre. A chacun des stades de leur vie, les parasites possèdent des mécanismes de résistance adaptés au milieu

de vie, souvent hostile, auquel ils ont à faire face. Par exemple, des téguments externes protègent les parasites intestinaux des sucs gastriques lors de leurs séjours dans le tractus digestif.

Dans l'annexe n°3 sont récapitulés les différents helminthes parasites cités dans la littérature pouvant se retrouver dans les déchets organiques. Attardons nous un peu sur le cas de certains helminthes pathogènes : *Fasciola hepatica*, *Taenia saginata*, *Ascaris lumbricoïdes*.

a. Un exemple de trématode pathogène : *Fasciola hepatica*.

Fasciola hepatica (grande douve) provoque une affection parasitaire, la fasciolose, par sa présence dans les canaux biliaires des animaux domestiques et sauvages et accidentellement de l'homme.

Les œufs pondus par la douve adulte dans les voies biliaires sont évacués dans les matières fécales. L'œuf éclôt et libère un miracidium qui pénètre dans une limnée (mollusque dulçaquicole). Une fois à l'intérieur du gastéropode, le miracidium devient un sporocyte, qui donne à son tour des rédies, qui donnent ensuite des rédies filles, qui donnent enfin des cercaires. Ces cercaires vont sortir du mollusque et vont s'enkyster sur un végétal aquatique en donnant un métacercaire. Les mammifères vont consommer les végétaux avec les métacercaires, qui se désenkystent à leur arrivée au niveau du duodénum. Les jeunes douves, ainsi libérées, vont traverser la paroi intestinale, gagner le foie et traverser le parenchyme hépatique pour atteindre les voies biliaires.

La grande douve est pathogène pour son hôte à cause de la migration des jeunes douves, qui provoquent des lésions traumatiques et nécrotiques et à cause de la présence des douves adultes dans les canaux biliaires dilatés. Cette présence entraîne une réaction oedémateuse et inflammatoire de l'épithélium biliaire, qui se fibrose.

Chez l'homme, la fasciolose durant la phase d'invasion se manifeste par un tableau d'hépatite toxi-infectieuse, qui se compose de fièvre, de douleur au niveau de l'hypochondre droit et d'une hépatomégalie. Dans la phase d'état, deux tableaux cliniques peuvent exister : celui d'une cholangite aiguë et celui d'un syndrome de pseudolithiase. Chez l'homme des complications à la

fasciolose sont possibles, comme des hémorragies hépatiques et des cirrhoses biliaires (73).

b. Un exemple de cestode pathogène : *Taenia saginata*.

Taenia saginata est un ver plat, rubané, mesurant de huit à dix mètres de long. Son scolex est de forme de pyramide quadrangulaire de 2 mm de large et porte quatre ventouses.

La forme adulte habite l'intestin de l'homme. Le scolex est fixé dans la partie antérieure de l'intestin grêle.

Les anneaux, qui se détachent du *Taenia saginata*, se désagrègent une fois arrivés dans le milieu extérieur libérant des œufs. Les œufs sont ingérés par des bovins (hôte intermédiaire). L'œuf libère dans le tube digestif des embryons hexacanthés, qui traversent la paroi intestinale et qui sont entraînés dans la circulation porte ou lymphatique. Ces larves se disséminent partout et s'enkystent dans les muscles et s'appellent à partir de ce moment *Cysticercus bovis*. L'homme se recontamine en consommant de la viande de bœuf insuffisamment cuite.

Le ténia peut entraîner chez l'homme des douleurs gastro-intestinales, des nausées, des vomissements, de l'anorexie, des troubles neurovégétatifs et psychiques chez les sujets prédisposés. Mais, très souvent, le porteur ignore la présence du parasite en lui (73).

c. Un exemple de nématode pathogène : *Ascaris lumbricoïdes*.

Ascaris lumbricoïdes est le plus grand nématode parasite intestinal de l'homme (ver cylindrique d'environ 20 cm de long). *Ascaris lumbricoïdes* provoque chez l'homme, l'ascaridiose. Cette maladie atteint surtout les enfants.

Les *Ascaris lumbricoïdes* adultes vivent à l'intérieur de l'intestin grêle de l'homme où ils se nourrissent du contenu intestinal. Ils émettent des œufs dans le milieu extérieur avec les matières fécales. Les œufs donnent naissance à une larve infestante, qui reste à l'abri de la paroi de l'œuf. L'infestation d'un nouvel hôte se fait par ingestion d'un œuf complètement embryonné. Au niveau

de l'intestin grêle, la larve sort de l'œuf et traverse la muqueuse intestinale. La larve atteint le foie par le système porte, puis le cœur et le poumon. La larve finit par pénétrer dans les alvéoles pulmonaires, remontent par les bronches et la trachée jusqu'au niveau du pharynx. A ce moment là, les larves sont ravalées. Elles finissent par arriver au niveau de l'intestin grêle, où elles deviennent adultes.

Ascaris lumbricoïdes exprime son pouvoir pathogène pendant la période d'invasion par un syndrome de toxi-infection associé à des manifestations allergiques et pulmonaires. Pendant la période d'état où les *Ascaris lumbricoïdes* se trouvent dans l'intestin grêle, la maladie s'exprime par des douleurs abdominales, de l'anorexie, des diarrhées, des nausées, des vomissements et du météorisme abdominal.

Il peut y avoir des complications de l'ascaridiose : l'obstruction du cholédoque ou des voies biliaires intrahépatiques, des appendicites ascaridiennes, des volvulus du grêle sur paquet d'ascaris et des perforations de la région iléo-caecale.

De plus les *Ascaris lumbricoïdes* libèrent des produits de leur métabolisme qui suscitent la formation d'anticorps. Ces antigènes très allergisants provoquent l'apparition d'éruptions cutanées de type urticaire, de démangeaisons nasales et d'asthme et de troubles gastro-intestinaux (73).

2. Les protozoaires.

a. Généralités.

Les protozoaires sont des êtres vivants unicellulaires (72) eucaryotes, c'est à dire que la cellule comprend un noyau entouré d'une membrane nucléaire.

Comme les helminthes, les protozoaires parasites survivent en suivant un cycle parasitaire comprenant un ou plusieurs hôte. Ils peuvent parasiter par exemple les cavités ouvertes de l'organisme ou bien le système sanguin de l'hôte.

L'annexe n°4 présente les différents protozoaires parasites les plus communs contenus dans les déchets organiques rencontrés dans la littérature.

Développons maintenant plus précisément quelques exemples de protozoaires parasites.

b. Exemples de protozoaire pathogènes.

b.1 *Giardia sp.*

Giardia intestinalis et *Giardia lamblia* provoquent chez l'homme, par leur présence dans le duodénum, une protozoose intestinale (72).

Les *Giardia intestinalis* sont fixés aux entérocytes par une ventouse. Les lésions au niveau des muqueuses sont dues à la détérioration de la bordure en brosse des entérocytes (72).

Le parasitisme dû à *Giardia intestinalis* peut être asymptomatique ou provoquer une diarrhée aiguë ou chronique, avec ou sans malabsorption. On n'observe des troubles que si les *Giardia intestinalis* sont en grand nombre, tels que des douleurs épigastriques, des flatulences, des diarrhées chroniques, des troubles neurovégétatifs et une perte de poids et d'appétit (72).

La transmission de la giardiose se fait par ingestion *per os* de kystes provenant de selles de porteurs. L'infection survient par contact direct par l'intermédiaire de mains sales ou souillées de terre, mais aussi par l'eau (72).

La transmission est peu spécifique. Il existe des cas de transmission de l'homme à l'animal et des animaux à l'homme, mais des fois, cette transmission est impossible (17).

b.2 *Cryptosporidium sp.*

Cryptosporidium sp. sont des coccidies qui provoquent chez les mammifères des maladies appelées cryptosporidioses. Ces coccidies, localisées dans le tube digestif, provoquent des diarrhées chez les individus jeunes, âgés et immunodéprimés. Les cryptosporidioses animales sont transmissibles à l'homme (17).

Cryptosporidium parvum provoque surtout des diarrhées graves chez les jeunes mammifères, alors que *Cryptosporidium muris* est moins pathogène et peut atteindre tous les âges (17).

La source de parasites est, par exemple chez les bovins, les animaux atteints comme les veaux infectés, qui éliminent des ookystes dans leurs selles, mais aussi les adultes. L'infection se fait par ingestion d'ookystes. Les ookystes rejetés dans le milieu extérieur sont sporulés et immédiatement infectants. Ces ookystes ont une bonne résistance au milieu extérieur (17).

Les cryptosporidioses entraînent des symptômes tels que de la dépression et de l'anorexie, de la diarrhée intermittente et une perte de poids (17).

Les lésions en ce qui concerne *Cryptosporidium parvum* se situent au niveau de l'intestin grêle, du gros intestin, mais surtout au niveau de la partie terminale de l'iléon. Ces lésions consistent en une inflammation des muqueuses et une hypertrophie des ganglions mésentériques. Dans les formes graves, on peut avoir des lésions biliaires et de l'appareil respiratoire (17).

La transmission à l'homme est possible et très grave chez les sujets immunodéprimés. Elle peut se faire par contact direct avec les animaux, par contact indirect avec des aliments et des eaux de boisson souillées, mais aussi par une transmission interhumaine (17).

b.3 *Toxoplasma gondii*.

Toxoplasma gondii est à l'origine d'une protozoose infectieuse, inoculable, commune à de nombreux animaux et à l'homme, la toxoplasmose.

Toxoplasma gondii est un protozoaire de la famille des toxoplasmidés. Son cycle a pour hôte définitif le chat et hôtes intermédiaires des mammifères ou des oiseaux.

Les sources de parasites sont le chat, qui est susceptible de rejeter des ookystes de *Toxoplasma gondii* dans leurs selles et les tissus animaux contenant des kystes. Donc, les modes d'infection se font par la voie buccale, par l'ingestion d'aliments ou d'eau de boisson souillés par des ookystes sporulés ou par la consommation de viandes ou de viscères contenant des kystes.

Une contamination transplacentaire peut aussi avoir lieu, lors de primo-infestation d'une femelle gestante. Les ookystes survivent plusieurs mois dans

le milieu extérieur. Les kystes survivent de nombreuses années chez l'hôte intermédiaire vivant.

Toxoplasma gondii a une action pathogène par sa prolifération et sa multiplication active dans les cellules de l'hôte, ce qui va entraîner la destruction de celles-ci et par des actions pathogènes mécaniques, toxiques et antigéniques.

Les symptômes de la toxoplasmose sont souvent inapparents, mais il peut y avoir des toxoplasmoses avec différents tableaux cliniques.

La toxoplasmose congénitale consiste en l'infection du fœtus à l'occasion de la primo-infection de la mère pendant la gestation. Il peut en résulter des avortements, des rétentions placentaires et des momifications, de la mortinatalité, ainsi que des lésions graves des nouveau-nés.

La toxoplasmose acquise, c'est à dire, due à l'ingestion de kystes ou d'ookystes, peut prendre une forme aiguë ou chronique. La forme aiguë est une maladie polymorphe qui peut être composée de fièvre, de broncho-pneumonie, de meningo-encéphalite et de troubles digestifs. Cette forme aiguë aboutit généralement à la mort. La forme chronique peut faire apparaître des troubles nerveux (chez les enfants et les animaux) et des troubles oculaires (chez les enfants et le chat).

La toxoplasmose produit des lésions d'hypertrophie viscérale (foie, rate, ganglions). Dans un état aigu, on peut retrouver de multiples foyers inflammatoires souvent hémorragiques ou nécrotiques dans les centres nerveux, les poumons, le foie, les ganglions, le cœur, les muscles. Dans un état subaigu, on retrouve surtout des nodules grisâtres au niveau des poumons(17).

A travers cet aperçu des différents agents pathogènes pouvant être présents dans les déchets organiques, se dégage tout d'abord leur importante diversité.

Les eaux usées, les déchets organiques industriels et urbains ou encore les déjections animales peuvent donc être contaminées par une grande variété de micro-organismes. Ces effluents représentent alors un danger pour la santé humaine et animale. Il est donc intéressant de connaître l'effet que produit la

méthanisation sur ces pathogènes. Si cet effet existe et est de plus hygiénisant, il serait bon de déterminer si la méthanisation serait capable d'éliminer une quantité suffisante de ces micro-organismes pathogènes de façon à ce que ces effluents deviennent inoffensifs pour la santé humaine et animale.

Mais avant de pouvoir déterminer l'efficacité de la méthanisation, il faut connaître tout d'abord les voies de contamination empruntées par ces agents pathogènes et les niveaux de risques représentés par ceux-ci pour établir les valeurs seuils en pathogène pouvant être considérées sans effet sur la santé. C'est dans ce but que nous allons voir maintenant les risques sanitaires de ces effluents organiques et les voies de contamination des hommes et des animaux par ces pathogènes.

Troisième partie : Les risques sanitaires dûs aux micro-organismes pathogènes contenus dans les déchets organiques et les voies de contaminations.

Comme nous venons de le remarquer, les déchets organiques, substrat de la méthanisation, peuvent contenir une quantité non négligeable d'agents pathogènes. Mais la question qui se pose maintenant est de savoir, si tous ces pathogènes représentent réellement un risque pour la santé humaine et animale et dans quelles conditions.

A. Principe de l'évaluation d'un risque de contamination.

L'évaluation d'un risque se fait suivant plusieurs étapes, qui permettent d'aborder les différentes données du problème. En effet, un risque dépend à la fois de l'agent pathogène, de l'organisme cible et du milieu de vie de ces deux protagonistes.

Il faut, tout d'abord, étudier et identifier les agents pathogènes, pour déterminer le danger, qu'ils représentent. Afin d'y arriver, il faut se pencher sur leur nature, sur la gravité de leur manifestation et sur leur potentialité d'exercer un effet négatif sur le milieu et les espèces vivant dans ce milieu.

Puis, il faut évaluer la probabilité d'expression des dangers liés aux pathogènes et établir une estimation de l'exposition à ces dangers des populations d'organismes cibles considérées.

Et enfin, il sera possible de caractériser le risque en synthétisant ces données (60) (1).

Donc, Il faut, en premier lieu, connaître quelles voies empruntent les agents pathogènes pour atteindre les hommes et les animaux, afin de pouvoir évaluer un risque de contamination.

B. Les différentes voies de contamination des hommes et des animaux.

Les animaux et les hommes sont contaminés par des agents pathogènes suivant plusieurs possibilités, que représentent les voies de contamination.

Les animaux et l'homme peuvent s'infecter au contact d'autres animaux, du milieu extérieur ou de produits d'origine animale contaminés (2). Les pathogènes contenus dans la biomasse suivent des voies de dissémination, qui relient le secteur de l'élevage (secteur I), le secteur de l'industrie alimentaire (secteur II), le secteur des zones urbaines et des zones industrielles (secteur III) et le secteur des installations de traitement de dépôts des déchets (secteur IV). Sauf quelques cas particuliers (schéma n°17)(6), comme des déchets du secteur II et III directement éliminés dans le secteur I, les agents pathogènes connaissent une dissémination, qui va du secteur I au secteur II, puis du secteur II au secteur III, ensuite du secteur III au secteur IV et enfin pour boucler le cycle, du secteur IV au secteur I (schéma n°16) (6). Ces voies de dissémination peuvent permettre la transmission de maladies aux animaux d'élevage, aux animaux sauvages et aux hommes.

Dans le cycle suivi par la biomasse et les pathogènes, que nous venons d'aborder, il existe des points charnières, comme celui du retour dans l'environnement de déchets organiques contenant des pathogènes (comme les déchets de l'élevage et de l'agriculture, les déchets industriels, les eaux usées de station d'épuration ou la partie organique des déchets municipaux). Ce retour se produit au moment où ils sont répandus sur les sols sous forme de boues. En effet, tous ces déchets peuvent être éliminés sous forme de produits d'épandage après, normalement, une étape de stabilisation. Donc, si ces déchets contiennent des pathogènes, ceux-ci aussi, sont remis en circulation dans la nature et sont de nouveau libres de circuler. Pis encore, l'épandage de ces effluents provoque la concentration de ces pathogènes. Une fois ces boues épandues, les organismes se déposent à la surface du sol et des végétaux (1). Dans ce milieu, les populations d'organismes pathogènes décroissent plus ou moins vite suivant l'espèce en question et le climat (1).

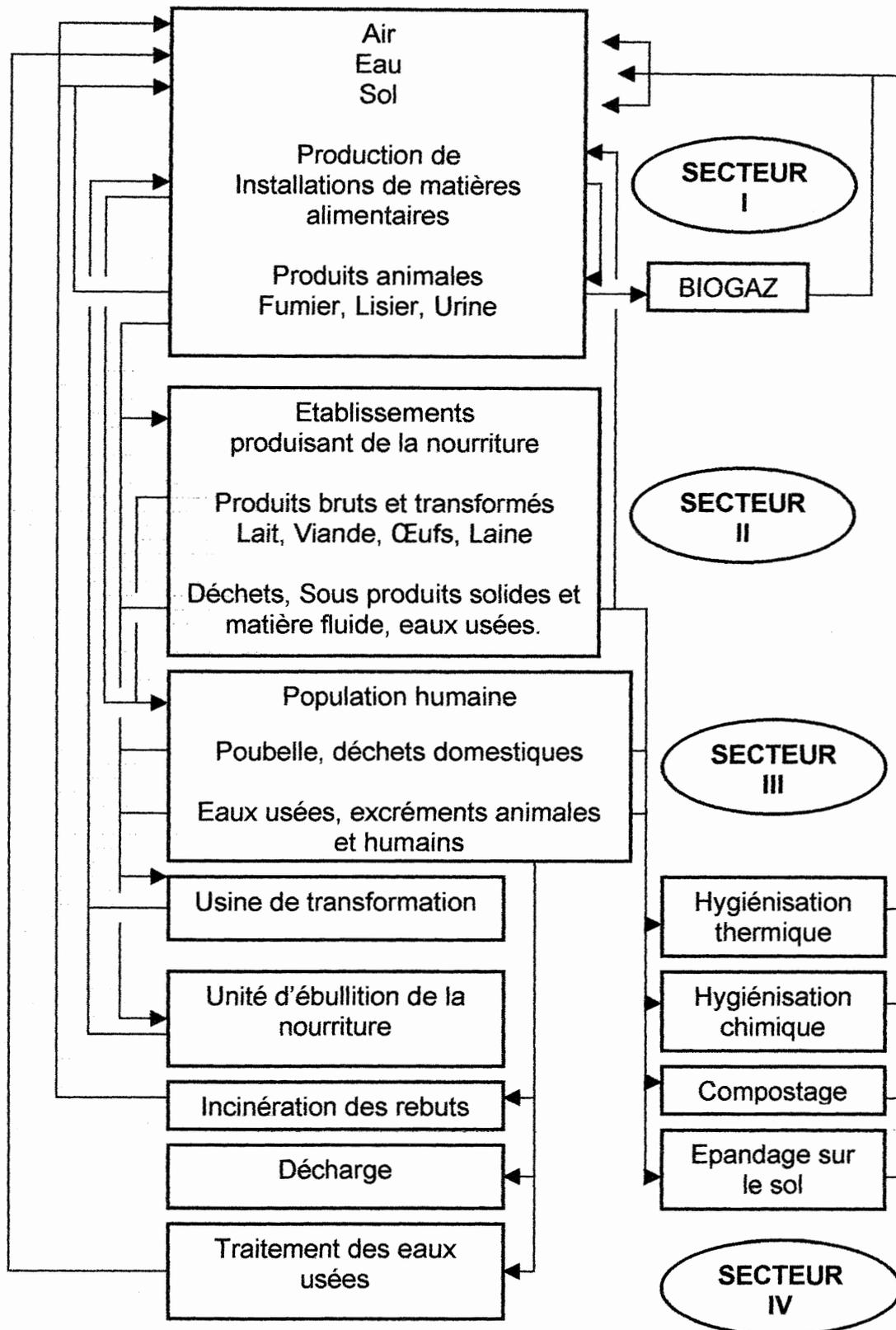


Schéma n°16 : Aperçu général du cycle de la biomasse entre les différents secteurs d'activité (6).

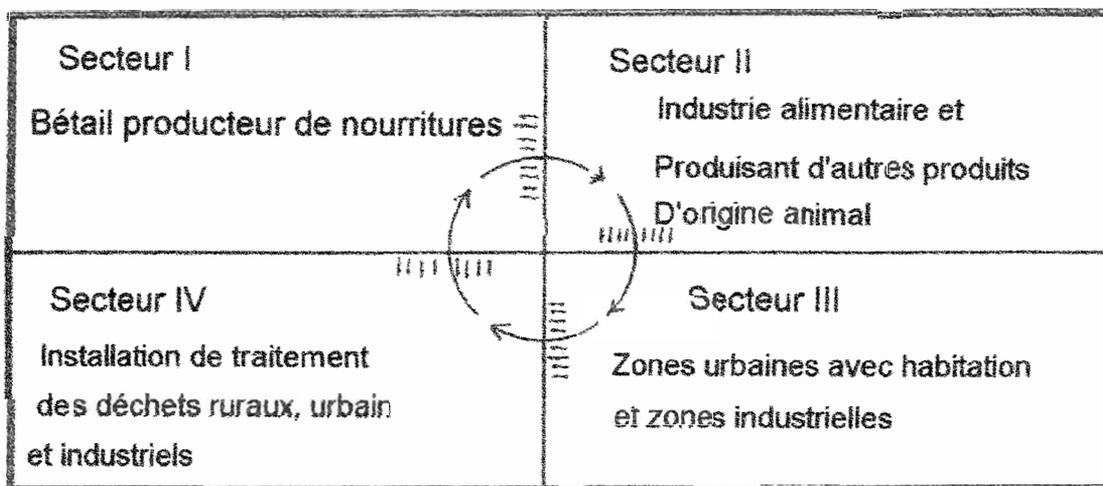


Schéma n°17 : Détail des différentes voies de cheminement de la biomasse entre les différents secteurs d'activité (6).

Une fois dans cette situation, différentes possibilités de voies de dissémination peuvent permettre la transmission de maladies aux animaux et aux hommes. Deux types de voies d'exposition sont possibles : des voies directes et indirectes.

Les voies d'exposition directes se composent de différentes possibilités de contamination des populations cibles par le produit, sans mise en jeu d'une étape intermédiaire de transfert environnemental des micro-organismes potentiellement présents dans les effluents.

Les voies d'exposition indirectes, elles, mettent en jeu une étape de transfert ou de retard entre le produit et les populations exposées. Cette étape supplémentaire conduira, en général, à la disparition d'un certain nombre de micro-organismes pathogènes initialement présents dans le produit, sous les actions conjuguées de la dilution et de l'inactivation biologique et physico-chimique des micro-organismes.

En ce qui concerne les animaux, il existe des voies directes. Elles consistent en l'absorption alimentaire, directement sur le lieu d'épandage, d'aliments souillés par des boues ou bien par inhalation de pathogènes présents dans l'air ou sur des poussières. Ces pathogènes aéroportés sont initialement présents sur le sol (1).

La contamination des animaux peut aussi se faire par voie indirecte. Elle peut se réaliser à nouveau par le biais de l'alimentation. L'animal peut manger des plantes souillées par les boues, dans un lieu autre que celui de l'épandage, par exemple sous forme de foin à l'étable, ou bien l'animal peut ingérer la faune contaminée présente sur le sol. Mais l'animal peut aussi être atteint par l'intermédiaire de l'eau de surface ou de l'eau souterraine souillée par les boues déposées sur le sol. En effet, la contamination des eaux de surface peut se réaliser par ruissellement à partir du sol, lors de pluies, qui entraînent des pathogènes. Ce phénomène dépend de la pluviométrie, de la pente du terrain, du couvert végétal et de l'état hydrique des sols. La contamination des eaux souterraines n'est possible que dans des circonstances très particulières telles que des pluviométries très importantes, des sols à structure très lâche (macroporosité en cas de sécheresse prolongée), un sous-sol perméable, une proximité de la nappe phréatique.

L'homme, lui aussi, est contaminé suivant des circuits directs et des circuits indirects.

Les circuits directs peuvent consister en l'ingestion sur le lieu d'épandage de plantes souillées, en l'inhalation des poussières transportant des pathogènes, mais aussi, en la simple prise de contact avec un sol contaminé.

Les circuits indirects consistent en l'ingestion de plantes souillées dans un lieu autre que celui de l'épandage ou en l'ingestion d'animaux contaminés, vivants sur un sol souillé par des boues. Mais en ce qui concerne l'homme, le circuit indirect le plus important réside en l'ingestion d'eaux contaminées par des pathogènes présents initialement dans les boues épandues (60).

Nous voyons que les agents pathogènes contenus dans les boues des déchets organiques peuvent se retrouver sur le sol et les végétaux et qu'ils peuvent survivre plus ou moins bien suivant les conditions géographiques et climatiques. Ces pathogènes peuvent ne pas rester sur le sol, mais être disséminés, entraînés par le vent, par l'eau avec des phénomènes de filtration et de mouvements d'eau. Il faut aussi souligner le rôle de vecteur que peuvent jouer de petits animaux. Ces vecteurs peuvent être passifs, comme les vers de terre, qui transportent dans leur tube digestif, les œufs de certains parasites. Ils peuvent aussi être actifs, comme les mammifères sauvages infectés qui excrètent des œufs de parasites dans le milieu extérieur. Ces vecteurs peuvent être également des passages obligés de la survie des pathogènes, si l'animal fait parti du cycle parasitaire (1).

Nous voyons que les pathogènes peuvent suivre de nombreux circuits, qui peuvent être complexes, leur permettant d'atteindre les animaux et l'homme. Mais certaines conditions doivent être remplies pour que les agents pathogènes puissent affecter les animaux et l'homme et représenter un risque.

C. Les conditions et l'évaluation des risques réels.

Les pathogènes ont la possibilité d'être disséminés et de pouvoir transmettre une maladie. Cette possibilité de dissémination va dépendre de plusieurs paramètres:

En effet, celle-ci n'est possible que si l'agent pathogène survit dans le milieu extérieur, c'est à dire qu'il résiste aux paramètres physiques, chimiques et biologiques des milieux qu'il traverse (60). Par exemple, nous avons plusieurs facteurs de survie des bactéries dans le sol récapitulés dans le tableau n° 19 (53).

Facteurs	Remarques
Humidité	Meilleure survie dans les sols humides et en période de fortes pluies.
Capacité de rétention	Temps de survie plus faible sur sols sableux (faible capacité de rétention).
Température	Temps de survie plus long aux basses températures (hiver). Résistance au gel mais pas aux alternances gel/dégel.
pH	Temps de survie plus faible à pH bas (3 à 5).
Lumière du soleil	Temps de survie plus faible dans les zones ensoleillées par rapport aux zones d'ombre.
Matière organique	Survie augmentée et possibilité de redéveloppement si la matière organique du sol est présente en quantité suffisante.
Antagonisme de la microflore du sol	Sur sol stérilisé, la survie est plus longue.

Tableau n° 19 : Facteur de survie des bactéries sur le sol (53).

Puis les pathogènes doivent, pour représenter un risque effectif pour la santé, répondre à certaines exigences. Tout d'abord, il faut qu'une dose infectieuse, c'est à dire un nombre suffisant de pathogènes pour infecter un être, atteigne un hôte. Pour cela, l'agent pathogène doit être en quantité suffisante dans le milieu ou bien être capable de s'y multiplier pour atteindre cette quantité. Puis enfin, il faut que l'hôte soit sensible et soit infecté par les agents pathogènes. Si toutes ces conditions sont réunies, l'hôte peut déclarer une maladie (66).

On détermine cette dose infectieuse et l'évalue suivant plusieurs critères : la dose infectante 50 (DI50) et la dose létale 50 (DL50) et la dose minimale infectieuse (DMI). La DI50 est la dose entraînant la contamination de 50% des individus exposés et la DL50 entraînant la mort de 50% des individus exposés. La DMI est une évaluation de l'effectif d'un pathogène, qui doit être absorbé pour que les symptômes de la maladie se manifestent chez quelques sujets au moins (1). La DMI est une valeur très fluctuante, mais elle donne un aperçu de l'effectif en pathogène pouvant être infectieux, par exemple, les DMI, par ingestion, sont de l'ordre de l'unité pour les œufs de vers parasites intestinaux, de la centaine pour les virus et les protozoaires parasites intestinaux et dépasse le million pour les bactéries (1).

Ensuite, certaines caractéristiques des pathogènes augmentent les risques d'incidence sur la santé. Ces caractéristiques sont une capacité du pathogène à la persistance prolongée dans le milieu, une période de latence ou une phase de développement du pathogène prolongée, une dose infectieuse faible.

Donc un pathogène représente un risque pour la santé d'un hôte suivant sa résistance à son milieu de vie, sa dose minimale infectieuse et sa spécificité d'espèces cibles (1).

Nous avons envisagé les conditions et les différentes voies de contamination possibles permettant à des agents pathogènes de provoquer une maladie chez les animaux et l'homme. Pour éviter ces contaminations ou du moins limiter leur risque, une solution serait de réduire les occasions de transmission par voie hydrique, par voie aérosol et la transmission de maladie à l'homme et aux animaux par les végétaux (1).

Mais il serait aussi intéressant de déterminer, si des moyens de décontamination des déchets ne peuvent pas diminuer ces risques sanitaires en réduisant à un certain niveau le nombre des pathogènes présents dans ces effluents organiques. La méthanisation étant déjà un bon moyen de traitement des effluents organiques et de la pollution qu'ils entraînent. Nous allons nous pencher, maintenant, sur l'effet que la méthanisation exerce sur les pathogènes et voir si elle ne pourrait pas être un bon moyen technique de réduction des pathogènes contenus dans les effluents organiques.

Partie IV : L'action de la méthanisation sur les pathogènes selon le type d'effluent traité :

Comme nous l'avons vu, les installations de méthanisation sont très différentes les unes des autres. En effet, dans la littérature, on rencontre à la fois des digesteurs de quelques litres de contenance, mais aussi des installations de biogaz centralisées élaborées pour traiter d'énormes quantités d'effluents, comme celles qui existent au Danemark. Les réacteurs de ces installations diffèrent les uns des autres par d'autres paramètres que la contenance. Ils varient de par leur température de fonctionnement, mésophile ou thermophile, leur temps de rétention des déchets, leur mode d'alimentation et le système d'agitation de leur contenu.

De plus, les effluents mis dans les réacteurs ne sont jamais tout à fait identiques. On retrouve des effluents issus de l'élevage comme des lisiers d'espèces différentes, mais aussi, des boues de stations d'épuration, des effluents industriels et des déchets organiques municipaux.

Toutes ces variations posent un problème pour la réalisation de la comparaison et de la détermination de l'effet de la méthanisation sur les pathogènes présents dans ces effluents. Mais ce n'est pas le seul problème faisant obstacle à l'étude de l'effet sur les pathogènes de la digestion anaérobie. Ce sont justement ces autres difficultés, que nous allons aborder maintenant

A. Les difficultés rencontrées lors de l'étude de l'effet sur les pathogènes de la digestion anaérobie.

I. Les difficultés d'analyse et d'extrapolation des résultats des études.

L'analyse des données bibliographiques de l'action de la méthanisation sur les pathogènes est difficile. Une importante difficulté d'appréciation provient

de l'absence de références claires dans le cas de certains travaux en ce qui concerne le type de substrat, le type d'expérimentation (laboratoire ou site industriel), le type de digesteur (infiniment mélangé, piston, à lit fixe ou lit de boues...), la température de fonctionnement, le temps de séjour et surtout le temps minimum de séjour, le mode d'alimentation (en bain, séquentiel, continu), le type d'agent pathogène étudié (indigène, de culture...), l'expression des résultats (élimination totale, inactivation, temps de réduction décimal, taux de réduction d'une certaine valeur de logarithme décimal).

II. Difficultés rencontrées lors des études expérimentales.

1. Difficultés d'isolement et de numération des pathogènes.

Il existe, tout d'abord, des difficultés pour détecter les pathogènes existant dans les effluents avant, durant et après la méthanisation. Par exemple, les études menées sur la survie des bactéries lors de la digestion anaérobie sont entravées par les difficultés d'isolement de ces micro-organismes (36). Il faut, pour chaque espèce bactérienne, trouver et sélectionner des méthodes d'isolement efficaces pour détecter ces pathogènes dans des substrats, tels que les lisiers. En effet, ces effluents sont riches naturellement en matières organiques et en micro-organismes, ce qui rend plus ardu le travail de détection. Devant ce problème, par exemple, différentes méthodes d'isolement des salmonelles dans le lisier ont été comparées. La technique par enrichissement sélectif en milieu de culture Rappaport Vassiliadis permet un bon isolement des salmonelles et semble plus sensible que la technique utilisant le milieu au sélénite réalisée avec ou sans pré-enrichissement. L'utilisation du milieu au tétrathionate donne au contraire de très mauvais résultats (75). La non-connaissance du nombre de bactéries pathogènes dans les boues de vidange représente un des obstacles majeurs pour déterminer l'impact de la méthanisation sur les pathogènes (26). Les bactéries ne sont pas les seuls germes pathogènes difficiles à détecter et à dénombrer, les virus, eux aussi, sont difficiles à recenser, car ils adhèrent aux particules solides, ce qui gêne leur détection (80).

2. Difficultés d'analyse et d'extrapolation des résultats.

Un autre inconvénient majeur résulte de la difficulté de l'extrapolation des résultats de laboratoire aux réalisations industrielles (62). En effet, plusieurs auteurs rapportent que les germes « ajoutés » dans les réacteurs de laboratoire sont moins résistants que les germes « natifs ». Ainsi, des virus incrustés sont mieux protégés que les cultures de virus ajoutés en une suspension libre (51). Le temps de réduction décimal (T90) de la population indigène est plus important que celui des souches de laboratoire (42). L'association aux particules solides conférerait une protection aux virus (58).

Mais malgré tout les travaux de laboratoire peuvent dans certains cas s'avérer représentatifs du fonctionnement industriel. Ainsi le T90 de *Salmonella typhimurium* et *E. coli* en digestion industrielle est comparable à celui des expériences à petit échelle (64).

Malgré les difficultés de trouver des méthodes de détection adéquates et assez sensibles pour dénombrer de façon fiable les pathogènes dans les déchets et les difficultés d'extrapoler les résultats de laboratoire aux conditions de terrain (62) (19), des recherches ont été menées pour déterminer l'effet de la méthanisation sur les pathogènes, dont nous allons exposer les différents résultats.

B. L'effet de la méthanisation sur les pathogènes présents dans les effluents organiques.

I. Données générales sur l'action de la méthanisation sur les pathogènes.

Beaucoup d'études traitant de la méthanisation donnent des informations générales sur son action contre les pathogènes. C'est à dire que le type de substrat traité n'est pas précisé.

1. L'action sur les pathogènes en général.

Les organismes présents dans les effluents traités par méthanisation, qui représentent un risque pour la santé, sont les virus, les bactéries et les parasites (14). Beaucoup de textes traitant de l'effet de la méthanisation sur les pathogènes le font sans qu'il soit précisé le type de pathogène étudié.

Les avis sont très partagés sur l'efficacité de la méthanisation contre ces pathogènes. Un manque de connaissances sur la suppression effective des pathogènes sous conditions anaérobies thermophiliques et mésophiliques est, parfois, mis en avant (14). D'autres fois, il est affirmé que les grandes installations de méthanisation peuvent répondre aux critères officiels d'assainissement des déchets. Il apparaît que les installations de production de méthane (à large échelle et modernes) sont capables de satisfaire aux exigences de récupération, traitement et d'épandage des lisiers et des déchets, à condition tout de même que certaines précautions dans leur construction et leur fonctionnement soient respectés (5). En plus, le milieu créé lors de la méthanisation est, souvent, accrédité de la capacité de faciliter l'inactivation des bactéries et des virus. Cette affirmation est prouvée par le fait que l'inactivation des pathogènes dans une solution saline est considérablement plus faible que dans les réacteurs à biogaz remplis de fumier(50).

Mais il est, tout de même, fait des distinctions entre les différents types de méthanisation réalisés en ce qui concerne l'efficacité contre les pathogènes. Par exemple, il est fréquemment rapporté une différence entre la digestion anaérobie mésophile et thermophile (50). En effet, il faut, pour obtenir une réduction de 4 log₁₀ du nombre des streptocoques fécaux par gramme de produit des couples temps/température d'au moins 1 à 2h à 55°C et de 300h à 35°C, ce qui est très différent. L'effet réducteur de pathogènes durant la digestion mésophile semble faible (50). De même, dans les installations centralisées danoises, la digestion thermophile permet une réduction de 4 log₁₀ des streptocoques fécaux par gramme de produit alors que la digestion mésophile permet seulement une réduction de 1 à 2 log₁₀ par gramme de produit, ce qui renforce cette constatation (5). Cette faible efficacité de la digestion anaérobie à des températures mésophiles n'est pas étonnante, car

les streptocoques fécaux sont des bactéries adaptées à vivre dans le tube digestif de mammifères à des températures avoisinant les 37°C. Les virus semblent subir, eux aussi, un taux d'inactivation plus haut en condition thermophilique qu'en condition mésophilique(50).

L'efficacité de la méthanisation sur les agents pathogènes ne varie pas seulement suivant la température. La nature du pathogène entre en jeu. En effet, la méthanisation n'exerce que peu d'effet sur les *Parvovirus* et les spores bactériennes. Ils ne sont pas éliminés, mais subissent au mieux une faible réduction de leur effectif. L'effet exercé par la méthanisation dépend à la fois de la température de digestion et de l'agent pathogène étudié.

2. L'action de la méthanisation sur les bactéries.

Nous allons aborder maintenant, les études traitant de l'action de la digestion anaérobie sur les bactéries en général, c'est à dire sans précision du substrat contenant les bactéries pathogènes.

Une première affirmation peut être faite : la digestion anaérobie ne procure pas les mêmes résultats suivant qu'elle se déroule en condition mésophilique ou en condition thermophilique.

Des expériences de laboratoire ont prouvé à des températures mésophiliques, l'existence de la réduction du nombre des streptocoques fécaux (de 90%), des coliformes fécaux (de 98%), des coliformes totaux (de 99%) (9), des entérocoques fécaux (de 4 log10 par gramme d'effluent) lors d'une digestion anaérobie avec un temps de rétention hydraulique de 15 jours et un couple temps/température de 300h à 35°C (51). De même, il est observé une réduction en nombre de *Salmonella duesseldorf* dans un digesteur nourri quotidiennement avec un taux de décès décimal de 1.6/j (Le taux spécifique d'élimination suivant une cinétique d'ordre 1) (19). On a donc, quand même, à 35°C une réduction de certains pathogènes durant la digestion anaérobie mésophilique.

Des expériences ont aussi été menées dans des installations à grande échelle, surtout au Danemark, où à 35°C le temps nécessaire pour éliminer 90% de certaines bactéries pathogènes (T90) a été calculé (tableau n°20) (7). On remarque que le T90 n'est pas le même suivant les espèces bactériennes et

que certaines espèces ne subissent pas de réduction, comme c'est le cas de *Clostridium perfringens* type C et de *Bacillus cereus*. Dans ces conditions de traitement, les T90, quand ils existent, sont de l'ordre du jour.

La digestion thermophile, elle aussi a été étudiée. Des expériences de laboratoire révèlent que les coliformes fécaux sont réduits de 99.9999% en 20j à 49°C (9) et que les entérocoques fécaux connaissent, eux, une réduction de 4 log10 par gramme de produit en 1 à 2 heures à 55°C (51).

Dans des expériences menées dans des installations danoises fonctionnant à 53°C, les T90 trouvés pour différentes bactéries sont donnés dans le tableau suivant (tableau n°21) (7). Là aussi, les T90 sont différents suivant les différentes espèces. *Clostridium perfringens* type C et *Bacillus cereus* dans ces conditions ne sont pas réduits, non plus, en nombre. Mais les T90, quand ils existent, sont beaucoup plus courts à 53°C qu'à 35°C et sont de l'ordre de l'heure.

Donc, suivant que la digestion se déroule dans des conditions de température mésophile ou thermophile, l'effet de la méthanisation n'est pas le même sur les pathogènes bactériens. Si une réduction a lieu, celle-ci est plus rapide en milieu thermophile que mésophile. De plus, ces différentes données nous révèlent que certaines bactéries ne semblent pas sensibles à la méthanisation.

Nous allons étudier maintenant l'action de la digestion anaérobie sur les virus.

3. L'action de la méthanisation sur les virus.

L'effet de la méthanisation sur les virus en général est aussi abordé dans la littérature. Dans ces données, là aussi, aucune précision n'est faite de l'effluent traité.

La dichotomie entre la digestion anaérobie mésophile et thermophile est encore présente en ce qui concerne l'effet sur les virus. Des expériences de laboratoire à température mésophile notent que le nombre de *Coxsackievirus* B3 est réduit de 2 log10 par gramme d'effluent en 24h. Mais les virus entériques sont encore présents dans les boues après

Bactéries	T90
<i>Bacillus cereus</i>	Pas de réduction
<i>Clostridium perfringens</i> type c	Pas de réduction
Coliformes	3,1j
<i>D Streptococci</i>	7,1j
<i>E. coli</i>	1,8j
<i>Erysipelothrix rhusiopathiae</i>	1,8j
<i>Mycobacterium paratuberculosis</i>	6j
<i>Salmonella dublin</i>	2,1j
<i>Salmonella typhimurium</i>	2,4j
<i>Staphylococcus aureus</i>	0,9j
<i>Streptococcus faecalis</i>	2,0j

Tableau n° 20 : Valeurs de T90 de certaines bactéries à 35°C dans des installations grandeurs natures (7).

Bactéries	T90
<i>Bacillus cereus</i>	Pas de réduction
<i>Clostridium perfringens</i> type c	Pas de réduction
<i>E. coli</i>	0,4h
<i>Erysipelothrix rhusiopathiae</i>	1,2h
<i>Mycobacterium paratuberculosis</i>	0,7h
<i>Salmonella dublin</i>	0,6h
<i>Salmonella typhimurium</i>	0,7h
<i>Staphylococcus aureus</i>	0,5h
<i>Streptococcus faecalis</i>	1,0h

Tableau n°21 : Valeurs de T90 de bactéries à 53°C dans des installations grandeurs natures (7).

digestion à 30°C pendant 21j (27). D'autres résultats annoncent que le nombre d'*Enterovirus* bovins sont réduits de 4 log10 par gramme de produit en 23h à 35°C et que le *poliovirus* perd son infectiosité, avec le temps, en perdant 1 log10 de sa population par gramme par jour à 28°C (80). La digestion anaérobie mésophile a donc un effet, bien que faible, sur certains virus.

Des expériences menées dans des installations danoises à grandes échelles nous fournissent les valeurs de temps d'inactivation à 35°C de divers virus (Tableau n°22) (7). Les temps d'inactivation sont différents suivant les espèces de virus. Certains virus, comme les *Parvovirus* porcins, sont très résistants à la méthanisation, alors que d'autres, même à température mésophile, ont un temps d'inactivation, qui est atteint dans un temps de l'ordre de plusieurs heures.

Des expériences menées sur des installations grandes échelles en condition thermophile révèlent que le nombre d'*Enterovirus* est réduit de 4 log10 par gramme d'effluent à 55°C en 0.5h (50). Les résultats obtenus dans les installations centralisées danoises, nous donnent le temps d'inactivation à 53°C de certains virus (tableau n°23) (7). Les virus sont donc plus vite réduits à des températures thermophiles que mésophiles. A part les *Parvovirus* porcins, tous les autres virus étudiés ont un temps d'inactivation inférieur à environ une heure.

La sensibilité des virus a, aussi, été expérimentalement comparée à celle des bactéries. Les coliformes fécaux sont 7 à 8 fois plus sensibles que les virus à la digestion mésophile. De même, le rapport coliformes totaux sur virus est divisé par 9 durant la digestion (9).

Des résultats d'expérience de laboratoire comparent les effets de la méthanisation sur les bactéries et les virus en condition thermophile. Le rapport coliformes sur virus est divisé par 300 au cours de la digestion et le rapport coliformes totaux sur virus est divisé par 200. Mais le rapport streptocoques sur virus, lui, n'est divisé que par 2.7 durant la digestion anaérobie thermophile (9). Les coliformes sont, donc, plus sensibles que les virus à la méthanisation, mais les streptocoques et les virus semblent vis à vis

Virus	Temps d'inactivation
Parvovirus porcin	21 sem
Virus de la fièvre porcine classique	4h
Virus de la grippe porcine	Plus de 24h
Virus de la maladie d'Aujeszky	5h
Virus de la rhinotrachéite bovine	24h
Virus de la TGE du porc	24h
Virus du BVD	3h

Tableau n°22 : Valeurs de temps d'inactivation de virus lors du traitement de lisiers à 35°C dans des installations grandeurs natures (7).

de leur sensibilité à la digestion anaérobie, être plus ou moins sur un pied d'égalité.

L'efficacité de la digestion anaérobie contre des bactéries et des virus est aussi comparée dans des conditions de fonctionnement grande échelle. Le taux d'inactivation des entérocoques fécaux est plus haut que le taux des *Parvovirus* (5-6 fois) et plus bas que celui des *Enterovirus* bovins (13 fois)(50). A travers ces résultats, nous voyons que l'effet de réduction en nombre obtenu grâce à la méthanisation sur les virus est spécifique à chaque virus et que nous ne pouvons pas conclure à une efficacité supérieure de la méthanisation sur les virus ou sur les bactéries. Mais il semble évident que la digestion thermophile permet une réduction plus rapide que la mésophile.

La méthanisation semble, donc, bien responsable d'une réduction en nombre de virus. De plus, l'effet réducteur semble accentué par l'augmentation de la température de digestion. Mais cette réduction est variable en intensité suivant l'espèce virale étudiée. Les *Parvovirus* porcins sont, par exemple, très résistants à la digestion anaérobie.

Nous allons analyser maintenant l'action de la digestion anaérobie sur les parasites.

4. L'action de la méthanisation sur les parasites.

Nous abordons ici l'effet de la digestion anaérobie sur les parasites en général, c'est à dire qu'encore une fois les données ne font pas mention du substrat traité. La séparation entre l'efficacité de la digestion anaérobie mésophile et thermophile se retrouve encore lors les expériences menées sur les parasites.

Des expériences de laboratoire en condition mésophile nous apprennent que la digestion anaérobie ne permet pas tout le temps une réduction des parasites. Une partie des œufs non embryonnés d'*Ascaris suum* survivent à 35°C pendant 25j (55).

Virus	Temps d'inactivation
Parvovirus porcin	8j
Virus de la fièvre porcine classique	Quelques sec.
Virus de la grippe porcine	Plus d'une heure
Virus de la maladie d'Aujeszky	10 min
Virus de la rhinotrachéite bovine	10 min
Virus de la TGE du porc	30 min
Virus du BVD	5 min

Tableau n°23 : Valeurs de temps d'inactivation de virus lors du traitement de lisiers à 53°C dans des installations grandeur nature (7).

Des expériences effectuées dans les installations danoises nous donnent la durée nécessaire pour obtenir l'inactivation de certains parasites à 35°C (tableau n°24) (7). Les temps d'inactivation des parasites étudiés sont de l'ordre de quelques jours (œufs de vers gastro-intestinaux des bovins) à quelques semaines (œufs des *Ascaris* du porc).

La digestion anaérobie thermophilique est abordée dans des expériences de laboratoire. Il y est conclu que les œufs non embryonnés d'*Ascaris suum* sont tués à 100% en 110 min à 50°C, en 50 min à 52°C, en 20 min à 54°C et 10 min à 56°C (10).

Dans des expériences menées dans des installations à grande échelle à des températures thermophiliques, les œufs de vers ronds nodulaires sont inactivés en 1 à 4h à 53°C (7).

Durant la digestion anaérobie, l'effet sur les parasites paraît spécifique à chacun d'eux et la digestion anaérobie mésophile à un effet, quand il existe, beaucoup moins efficace que la digestion thermophilique.

A travers toutes ces expériences, on remarque que la digestion anaérobie, en général, a un effet sur les pathogènes, que ce soit des bactéries, des virus ou des parasites. Cet effet est plus rapide sous des conditions thermophiliques que mésophiliques. Le niveau de réduction des agents pathogènes est dépendant de la nature du pathogène, de la température et de la durée d'exposition à la méthanisation. Mais il faut, tout de même, noter que certains pathogènes ne sont pas affectés par la digestion anaérobie.

Parasites	Temps d'inactivation
Œufs de vers gastrointestinaux du bovin	2j
Œufs de vers plats du chat	2j
Œufs de vers ronds nodulaires du porc	6-8j
Oeufs d'ascaris du porc	21j
Larves de vers du poumon des bovins	7j

Tableau n° 24 : Temps d'inactivation de certains parasites durant la digestion anaérobie à 35°C dans les installations centralisées danoises (7).

II. Données sur l'efficacité de la digestion anaérobie contre les pathogènes suivant les différents effluents utilisés.

D'autres expériences donnent des informations sur l'effet de la méthanisation sur les pathogènes en précisant, cette fois-ci, le type d'effluent traité.

1. Les lisiers.

a. L'action de la méthanisation sur les pathogènes en général.

Ici, nous abordons les données, présentes dans la littérature, traitant de l'action de la méthanisation sur les pathogènes des lisiers, sans précision de l'identité précise de ces pathogènes.

L'efficacité de la digestion anaérobie pour l'élimination des pathogènes lors du traitement des lisiers est souvent relatée. Il est trouvé que la teneur en pathogènes peut être réduite par ce traitement à un niveau acceptable (59). Par exemple, lors du traitement du lisier de volaille dans des installations à grande échelle, les pathogènes sont réduits en nombre (44).

Cette efficacité est souvent confirmée lors de la digestion anaérobie thermophilique. En effet, durant une digestion mélangée à 55°C pendant 15 à 20 jours dans un digesteur Dranco, l'élimination des pathogènes est obtenue (4).

Par contre, l'efficacité de la digestion mésophile est plus nuancée. Par exemple, la digestion du fumier liquide à des températures de 30 à 35°C ne permet pas d'obtenir la désinfection des effluents (40). En dépit du fait que la digestion du lisier de vache à des températures inférieures à 40°C pendant 80 jours permet d'obtenir un produit libre en pathogènes (71).

La méthanisation semble connaître une faiblesse dans sa capacité à lutter contre les pathogènes des lisiers à des températures mésophiliques.

Nous allons maintenant nous intéresser à l'action de la méthanisation sur les bactéries lors des traitements des lisiers.

b. L'action de la méthanisation sur les bactéries.

Quand on s'intéresse aux bactéries plus en particulier, on remarque que malgré quelques affirmations, comme quoi la méthanisation du lisier permet l'élimination des bactéries (24), il existe encore une séparation entre les résultats obtenus lors la digestion mésophile et thermophile.

La digestion mésophile a été étudiée en laboratoire. Beaucoup de résultats se montrent négatifs vis à vis de son efficacité face aux bactéries pathogènes. Par exemple, la digestion anaérobie mésophile inactive les bactéries végétatives en un temps de l'ordre du jour. Donc, il reste un risque de persistance trop important de bactéries pathogènes durant la digestion semi-continue, car celle-ci ne dure que 1 à 2 jours (62). Il est encore affirmé ou soupçonné que la méthanisation mésophile, en système continu, n'élimine pas les bactéries pathogènes et surtout pas les bactéries sporulées (63). De plus, il est dit que, durant le traitement du lisier de bovin, aucune conclusion évidente ne peut être posée sur l'élimination des bactéries intestinales pathogènes et que les *Klebsiella*, les *Shigella*, les *Salmonella*, les *Mycobactéria*, les *Staphilococci* et les *Pseudomonas*, survivraient à la digestion anaérobie (36). Un lisier digéré durant la méthanisation mésophile resterait une source de risque à cause des pathogènes survivants.

Mais, la digestion mésophile a, quand même, un effet sur les pathogènes. La réduction en nombre des pathogènes de la digestion mésophile dépasse celle obtenue lors d'un simple stockage (62). De même, la méthanisation à ces températures permet, tout de même, la réduction en nombre d'*E. coli*, des *Salmonella typhimurium*, des *Yersinia enterocolitica*, des *Listeria monocytogenes*.

Des résultats d'expériences de laboratoire concernant des taux de réduction des bactéries végétatives de type bacille lors de digestion anaérobie de lisiers à des températures mésophiles sont rassemblés dans le tableau

n°25(1) et 25(2). Tous les résultats montrent que ces bactéries subissent des T90 ou des réductions plus importantes d'une durée qui va de l'ordre du jour à celui du mois. *Campylobacter jejuni* se détache de ce groupe, d'après ces résultats, il ne subit aucune réduction.

Des valeurs de réduction en nombre de bactéries végétatives de type *cocci* lors de digestions anaérobies mésophiliques de lisiers sont rassemblés dans le tableau n°26. Là aussi, les valeurs de T90 ou de réductions plus intenses sont atteintes avec des durées allant de l'ordre du jour à celui du mois.

Des valeurs de réduction de bactéries sporogènes lors de la digestion mésophile de lisiers sont réunis dans le tableau n°27. Ces résultats montrent que les *Bacillus* et les *Clostridium* ne sont pas réduits, mais qu'ils peuvent connaître, même, une augmentation de leur population durant la digestion anaérobie mésophile.

Des études dans des installations à grande échelle, pratiquant la digestion anaérobie mésophile des lisiers, nous fournissent des valeurs de réduction des bactéries pathogènes. Lors du traitement du lisier de bovin et de volaille à 28°C, dans un digesteur nourri quotidiennement et avec un temps de rétention hydraulique de 24 jours, nous apprenons que le nombre des bactéries pathogènes (*E. coli*, *Yersinia enterocolitica*, *Salmonella typhimurium*, *Listeria monocytogenes*) à l'exception de *Campylobacter jejuni* baisse de 4 log₁₀ par gramme d'effluent en 10 jours (42). Lors d'expériences dans des installations à grande échelle, la réduction des bactéries, à des températures mésophiliques, apparaît lente et dépend de l'espèce bactérienne.

D'autres expériences nous permettent d'obtenir des informations comparatives entre les différentes méthodes de traitement. En effet, à 35°C en semi-continu avec un temps de rétention hydraulique de 25 jours, la réduction est plus lente que dans un réacteur à fournée (43).

Les résultats de la digestion anaérobie pratiquée à des températures mésophiliques restent, donc, mitigés en ce qui concerne l'efficacité de la méthanisation en tant que réducteur de pathogènes. En effet, la digestion anaérobie mésophile réduit le nombre de pathogènes, mais cette réduction, souvent faible, dépend du nombre de pathogènes et de l'espèce bactérienne en

Pathogènes	Réduction	Durée	Température	Type de digesteur	Substrat traité	Références
Bactéries végétatives	T90	1-3j	Mésophile		Lisier de bovin	63
<i>Campylobacter jejuni</i>	T90	0	35°c	Réacteur à fourmée et semi-continu	Lisier de bovin	43
Coliformes fécaux	de 1,2log10 par gramme	20j	35°c	Digesteur de petite taille	Lisier de bovin	77
Coliformes fécaux	de 2log10 par gramme	50j	35°c	Digesteur de petite taille	Lisier de bovin	77
Coliformes fécaux	T90	3,2j	35°c	Réacteur de petite taille à fourmée et agitation automatique	Lisier de bovin et porc	64
Coliformes fécaux	passage de 108/g à 104/g		22-37°c	Réacteurs indien et chinois	Lisier de volaille	28
Coliformes totaux	passage de 108/g à 102/g		22-37°c	Réacteurs indien et chinois	Lisier de volaille	28
<i>E. coli</i>	Complète et T90	4j;0,7-0,9j	35°c	Réacteur à fourmée	Lisier de bovin	43
<i>E. coli</i>	Complète et T90	4j;1,1-2,5j	35°c	Réacteur semi-continu	Lisier de bovin	43
<i>E. coli</i>	T90	1,8j	35°c	Réacteur de petite taille à fourmée et agitation automatique	Lisier de bovin et porc	64

Tableau n°25(1) : Taux de réduction des bactéries végétatives de type bacille lors de digestions anaérobie mésophiliques de lisiers en laboratoire.

Pathogènes	Réduction	Durée	Température	Type de digesteur	Substrat traité	Références
<i>Ensiopelothrix rhusiopathiae</i>	T90	1,8j	35°C	Réacteur de petite taille à fournée et agitation automatique	Lisier de bovin et porc	64
<i>Listeria monocytogenes</i>	T90	12,3j	35°C	Réacteur à fournée	Lisier de bovin	43
<i>Listeria monocytogenes</i>	T90	37,5j	35°C	Réacteur semi-continu	Lisier de bovin	43
<i>Mycobacterium paratuberculosis</i>	T90	6-7j	Mésophile		Lisier de bovin	63
<i>Mycobacterium paratuberculosis</i>	Complète	21-28j	35°C	Digesteur à fournée	Lisier de bovin	62
<i>Salmonella dublin</i>	T90	2,0j	35°C	Réacteur de petite taille à fournée et agitation automatique	Lisier de bovin et porc	64
<i>Salmonella typhimurium</i>	Complète	10j	37°C	Digesteur de petite taille	Lisier de bovin	36
<i>Salmonella typhimurium</i>	T90	0,7-0,9j	35°C	Réacteur à fournée	Lisier de bovin	43
<i>Salmonella typhimurium</i>	T90	1,1-2,5j	35°C	Réacteur semi-continu	Lisier de bovin	43
<i>Salmonella typhimurium</i>	T90	2,4j	35°C	Réacteur de petite taille à fournée et agitation automatique	Lisier de bovin et porc	64
<i>Yersinia enterocolitica</i>	T90	0,7-0,9j	35°C	Réacteur à fournée	Lisier de bovin	43
<i>Yersinia enterocolitica</i>	T90	1,1-2,5j	35°C	Réacteur semi-continu	Lisier de bovin	43

Tableau n°25(2) : Taux de réduction des bactéries végétatives de type bacille lors de digestions anaérobie mésophiliques de lisiers en laboratoire.

Pathogènes	Réduction	Durée	Température	Type de digesteur	Substrat traité	Références
Bactéries végétatives	T90	1-3j	Mésophile		Lisier de bovin	63
<i>D Streptococci</i>	T90	7, 1j	35°c	Réacteur de petite taille à fournee et agitation automatique	Lisier de bovin et porc	64
Entérocoques fécaux	de 4log10 par gramme	300h	35°c		Lisier de bovin	51
<i>Staphilococcus aureus</i>	T90	0,9j	35°c	Réacteur de petite taille à fournee et agitation automatique	Lisier de bovin et porc	64
Streptocoques fécaux	T90	6-7j	Mésophile		Lisier de bovin	63
Streptocoques fécaux	de 2log10 par gramme	50j	35°c	Digesteur de petite taille	Lisier de bovin	77
Streptocoques fécaux	T90	2,0j	35°c	Réacteur de petite taille à fournee et agitation automatique	Lisier de bovin et porc	64
Streptocoques fécaux	passage de 108/g à 102/g		22-37°c	Réacteurs indien et chinois	Lisier de volaille	28

Tableau n°26 : Valeurs de réduction de bactéries végétatives type coques lors de digestions anaérobie mésophile de lisiers lors d'expériences de laboratoire.

Pathogènes	Réduction	Durée	Température	Type de digesteur	Substrat traité	Références
<i>Bacillus cereus</i>	T90	0	35°C	Réacteur de petite taille à fourmée et agitation automatique	Lisier de bovin et porc	64
<i>Clostridium perfringens</i> type T90		0	35°C	Réacteur de petite taille à fourmée et agitation automatique	Lisier de bovin et porc	64
C						
<i>Clostridium sulforéducteurs</i>	Augmentation	20j	35°C	Digesteur de petite taille	Lisier de bovin	77
<i>Clostridium sulforéducteurs</i>	Augmentation	50j	35°C	Digesteur de petite taille	Lisier de bovin	77

Tableau n°27: Valeurs de réduction de bactéries sporogènes lors de digestion anaérobie mésophile de lisiers lors d'expériences de laboratoire.

présence et de la technique de digestion anaérobie employée.

L'effet de la digestion anaérobie thermophile sur les bactéries pathogènes, elle aussi, est étudié dans différentes expériences de laboratoire.

Certains résultats sont en faveur d'une efficacité de la digestion thermophile. En effet, par exemple, lors d'un traitement anaérobie thermophile (système lipp) les entérobactéries, les *Streptococcus fecalis*, les *E. coli* sont détruits (24). De plus, à 50°C, durant le traitement des déchets de volaille, la destruction totale des bactéries entériques, des salmonelles et des coliformes totaux a lieu (62). De même, les bactéries pathogènes végétatives sous des conditions thermophiles sont au bout de 12 à 24 heures totalement éliminées (63).

Mais certains résultats sont plus mitigés. En effet, durant la digestion du lisier de bovin à l'échelle de la ferme et du laboratoire à 65°C pendant 18 jours, l'élimination des coliformes fécaux est obtenue, mais le nombre des *Clostridium* augmentent (77). Des résultats de réduction du nombre des bactéries durant la méthanisation thermophile du lisier sont rapportés dans les tableaux qui suivent (tableau n° 28: les valeurs de réduction en nombre des bactéries végétatives de type bacille, obtenues pendant des expériences de laboratoire, lors de digestions anaérobies thermophiles de lisiers ; tableau n°29 : les valeurs de réduction en nombre des bactéries végétatives de type *cocci*, obtenues pendant des expériences de laboratoire, lors de digestions anaérobies thermophiles de lisiers ; tableau n°30 : les valeurs de réduction en nombre des bactéries végétatives de type cocco-bacille, obtenues pendant des expériences de laboratoire, lors de digestions anaérobies thermophiles de lisiers ; tableau n°31 : les valeurs de réduction en nombre des bactéries sporogènes, obtenues pendant des expériences de laboratoire, lors de digestions anaérobies thermophiles de lisiers). Ces données montrent que les T90 ou les réductions plus fortes en nombre des bactéries végétatives sont atteints le plus souvent en quelques heures voir une journée. Les bactéries sporogènes, elles, ne subissent aucune réduction à des températures thermophiles. La digestion anaérobie thermophile provoque une réduction du nombre des bactéries pathogènes plus intense que la digestion

mésophile. En effet, le pourcentage d'inactivation bactérienne est supérieur sous des conditions thermophiles que sous des conditions mésophiles pour les entérocoques fécaux (51). De même, lors de la digestion d'effluents de porc dans un réacteur à agitation continue à 54°C, la réduction des coliformes fécaux, des coliformes totaux, des streptocoques fécaux et totaux et des salmonelles est plus intense que lors de la digestion mésophile (25).

Dans les installations à grande échelle, la digestion anaérobie thermophile semble garder son efficacité face aux bactéries pathogènes. En effet, durant la digestion à grande échelle de fumier, de lisier et d'urine, les bactéries pathogènes seraient éliminées en quelques heures (7). Cette tendance est confirmée par les résultats rassemblés dans le tableau qui suit (tableau n°32).

La digestion anaérobie semble, donc, avoir une action sur certaines bactéries pathogènes contenues dans les lisiers. Or, quand cette action existe, celle-ci semble plus efficace lors de la méthanisation thermophile que lors de la mésophile. Mais il faut remarquer que les bactéries sporogènes ne sont pas influencées par la digestion anaérobie quelle que soit la température de digestion et les caractéristiques des réacteurs.

Nous analyserons, maintenant, l'action de la méthanisation sur les virus contenus dans les lisiers.

c. L'action de la méthanisation sur les virus.

Les expériences traitant de l'action sur les virus de la méthanisation sont essentiellement des expériences de laboratoire et là aussi une différence de résultats est notable entre la méthanisation mésophile et thermophile.

A des températures mésophiles, les résultats montrent que la réduction, si elle existe, varie suivant le type de virus auquel on a affaire. Par exemple, les *Adenovirus* sont plus facilement inactivés que les *Enterovirus* dans le lisier de bovin et de porc (52). La digestion anaérobie mésophile est

Bactéries	Réduction	Durée	Substrat	Température	Type de digesteur	Références
Bactéries végétatives	T90	0,4-1h		53°C	Digestion continue	63
<i>Coliformes</i>	Passage de 106 à 102 u/g	12h	Lisier de porc et de bovin	53 à 57°C	Digesteur de 5L	45
<i>Coliformes fécaux</i>	de 99,14% à 99,99%	15j	Lisier de porc et de bovin	54,9°C	Digesteur rennué	15
<i>Coliformes totaux</i>	de 99,14% à 99,99%	15j	Lisier de porc et de bovin	54,9°C	Digesteur rennué	15
<i>E. coli</i>	Inactivation	quelques heures	Lisier de bovin	53 à 55°C	Réacteur à fournée	62
<i>E. coli</i>	T90	0,4h	Lisier de porc et de bovin	53°C	Réacteur à fournée de 2 à 3L, réacteur continue de 7L nourrit avec 500ml/j et avec agitation automatique	64
<i>Erysipelothrix rhusiopathiae</i>	T90	1,2h	Lisier de porc et de bovin	53°C	Réacteur à fournée de 2 à 3L, réacteur continue de 7L nourrit avec 500ml/j et avec agitation automatique	64
<i>Mycobacterium non pathogènes</i>	de 100%	3j	Lisier de porc et de bovin	53 à 57°C	Digesteur de 5L	45
<i>Mycobacterium paratuberculosis</i>	Passage de 13 104 à 2,7 104 u/g	24h	Lisier de bovin	53 à 55°C	Réacteur à fournée	62
<i>Salmonella dublin</i>	de 100%	12h	Lisier de porc et de bovin	53 à 57°C	Digesteur de 5L	45
<i>Salmonella dublin</i>	T90	0,6h	Lisier de porc et de bovin	53°C	Réacteur à fournée de 2 à 3L, réacteur continue de 7L nourrit avec 500ml/j et avec agitation automatique	64
<i>Salmonella typhimurium</i>	de 100%	12h	Lisier de porc et de bovin	53 à 57°C	Digesteur de 5L	45

Tableau n°28: Valeurs de réduction de bactéries végétatives type bacille lors de digestion anaérobie thermophile de lisiers lors d'expériences de laboratoire.

Bactéries	Réduction	Durée	Substrat	Température	Type de digesteur	Références
Bactéries végétatives	T90	0,4-1h		53°c	Digestion continue	63
<i>Staphylococcus aureus</i>	de 100%	3j	Lisier de porc et de bovin	53 à 57°c	Digesteur de 5L	45
<i>Staphylococcus aureus</i>	T90	0,5h	Lisier de porc et de bovin	53°c	Réacteur à fournée de 2 à 3L, réacteur continue de 7L nourri avec 500ml/j et avec agitation automatique	64
<i>Streptococcus fécaux</i>	T90	1h	Lisier de porc et de bovin	53°c	Réacteur à fournée de 2 à 3L, réacteur continue de 7L nourri avec 500ml/j et avec agitation automatique	64
<i>Streptocoques</i>	de 99,14% à 99,99%	15j	Lisier de porc et de bovin	54,9°c	Digesteur remué	15
<i>Streptocoques</i>	Inactivation	quelques heures	Lisier de bovin	53 à 55°c	Réacteur à fournée	62

Tableau n° 29 : Valeurs de réductions de bactéries végétatives de type cocci par la digestion anaérobie thermophile de lisiers en laboratoire.

Bactéries	Réduction	Durée	Substrat	Température	Type de digesteur	Références
Bactéries végétatives	T90	0,4-1h		53°c	Digestion continue	63
<i>Brucella bovis</i>	de 100%	24h	Lisier de porc et de bovin	53 à 57°c	Digesteur de 5L	45

Tableau n° 30: Valeurs de réductions de bactéries végétatives de type cocci-bacilles par la digestion anaérobie thermophile de lisiers en laboratoire.

Bactéries	Réduction	Durée	Substrat	Température	Type de digesteur	Références
<i>Bacillus cereus</i>	Pas de réduction		Lisier de porc et de bovin	53°C	Réacteur à fourmée de 2 à 3L, réacteur continue de 7L nourrit avec 500ml/j et avec agitation automatique	64
<i>Clostridium perfringens</i> type C	Pas de réduction		Lisier de porc et de bovin	53°C	Réacteur à fourmée de 2 à 3L, réacteur continue de 7L nourrit avec 500ml/j et avec agitation automatique	64

Tableau n° 31 : Valeurs de réductions de bactéries sporogènes par la digestion anaérobie thermophile de lisiers en laboratoire.

Bactéries	Réduction	Durée	technique d'étude	Température	Type de déchets	Références
Enterococcus fécaux	de 4 Log 10 par gramme	1 à 2 h		55°c	Lisier de bovin	52
Salmonella dublin	de 100%	24h	Sac à filtre	55°c	Lisier de bovin	69
Salmonella typhimurium	de 100%	24h	Sac à filtre	55°c	Lisier de bovin	69

Tableau n° 32 : Valeurs de réduction de bactéries lors de digestions anaérobie thermophile de lisiers grandeur nature.

parfois considérée comme efficace contre les virus. La digestion anaérobie du fumier liquide de porc permet la réduction des virus et de leur infectiosité (23).

Différents résultats de taux de réduction des virus par la méthanisation mésophile sont rassemblés dans le tableau suivant (tableau n°33). Les résultats sont très variables suivant les espèces virales et le type de méthanisation réalisé. Une résistance plus marquée est à noter pour les *Parvovirus*. Une réduction du nombre de *Parvovirus* de 4 log₁₀ par gramme d'effluent ne serait pas envisageable à cause de sa capacité à résister à la chaleur (51).

Il est parfois admis que la digestion anaérobie mésophile est, en général, plus efficace pour éliminer les particules virales que les bactéries (56). Pourtant, il se trouve que le taux d'élimination des entérobactéries fécales est supérieur à celui du *Parvovirus* porcin (6 à 50 fois), mais que le taux d'élimination des entérobactéries est inférieur à celui des *Enterovirus* bovins (13 fois) (51). Aucune conclusion de supériorité d'efficacité sur les virus ou sur les bactéries, de par la méthanisation, ne peut être établie.

La digestion thermophile est plus efficace que la mésophile (58) pour l'élimination des virus, ce qui peut s'expliquer par le fait que le processus d'inactivation agirait principalement par la chaleur. Des résultats d'expériences en conditions thermophiles, confirmant ces constatations, sont donnés dans le tableau suivant (tableau n°34).

Nous allons maintenant aborder l'action de la digestion anaérobie sur les parasites contenus dans le lisier.

d. L'action de la méthanisation sur les parasites.

Dans les résultats des expériences qui traitent de l'efficacité de la méthanisation sur les parasites contenus dans le lisier émergent une inégalité entre les procédés de digestion anaérobie mésophile et thermophile.

Virus	Réduction	Durée	Type de digesteur	Température	Type de déchets	Références
Enterovirus bovin	de 100%	8 j	Digesteur semi-continu de 25L	35°c	Lisier de bovin	61
Enterovirus bovin	de 4 log 10 par gramme	23h	Réacteur de 3L avec un TRH de 15j nourrit 4 fois par jour avec un MGRT de 6 jours.	35°c	Lisier de porc et de bovin	51
Enterovirus porcin	Passage de log ₅ ,02 à log ₂	6h	Digesteur à flux continu	35°c	Lisier de porc	58
Parvovirus	de 100%	13j	Digesteur semi-continu de 25L nourrit 1 fois par jour avec un TRH de 10 à 40 jours.	35°c	Lisier de bovin	61
Parvovirus porcin	Inactivation	13j		20°c	Lisier porc et bovin	52

Tableau n°33 : Valeurs de réduction de virus lors d'expériences de traitement de lisiers à température mésophile.

La digestion anaérobie thermophile est plus efficace contre les parasites que la digestion anaérobie mésophile. En effet, à des températures de 50 à 60°C, les réacteurs semi-continus assurent la dévitalisation des nématodes de bovin et des coccidies, ce qui n'est pas vrai à des températures de 30 à 31°C (65). Les tableaux suivants récapitulent les résultats de réduction des parasites durant la digestion anaérobie des lisiers (tableaux n°35 et n°36). Les réductions du nombre des parasites sont très différentes suivant l'espèce parasitaire et la température de digestion. Certains parasites sont très résistants à la digestion anaérobie, comme les *Eimeria spp.* et les *Schistosoma spp.* .

Nous analyserons maintenant, si la méthanisation réduit les pathogènes de la même façon lors du traitement des eaux usées des stations d'épuration.

2. Les eaux usées des STEP.

Peu de références traitent de l'effet de la digestion anaérobie sur les eaux usées de STEP ou sur les boues de STEP en général. Pratiquement toutes traitent soit des bactéries, soit des virus, soit des parasites, mais ne parlent pas de l'effet en général.

a. L'action de la méthanisation sur les bactéries.

Les résultats ne sont pas en faveur de la digestion anaérobie mésophile. En effet, ce traitement ne semble pas capable d'éliminer complètement les bactéries des eaux usées (30) (84). Même si à 34°C avec un temps de rétention de 26 jours, on observe une réduction de 90% des bactéries (84). De plus, il est dit que la digestion mésophile n'est ni conçue, ni destinée à la désinfection de ces boues (20).

Les informations sur l'effet de la digestion anaérobie thermophile sur les bactéries des eaux usées semblent meilleures. L'action de la digestion thermophile sur les bactéries fécales est très importante (68). De même, lors d'une digestion thermophile à agitation continue en laboratoire de boues

Virus	Réduction	Durée	Température	Type de déchets	Type de digesteur	Références
Enterovirus bovin	Inactivation	30 min	55°C	Fumier de bovin	Digesteur semi-continu de 25L, nourrit une fois par jour, TRH 10-40j.	61
Enterovirus bovin	de 4 log 10 par gramme	0,5h	55°C	Lisier de porc et de bovin	Digesteur continu	51
Enterovirus porcin	Passage de 10 ⁶ à 100 par gramme	6h	60°C	Lisier de porc	Digesteur à flux continu	58
Parvovirus bovin	Inactivation	30 min	55°C	Fumier de bovin	Digesteur semi-continu de 25L, nourrit une fois par jour, TRH 10-40j.	61
Parvovirus porcin	de 4 log 10 par gramme	11-12h	55°C	Lisier de porc et de bovin	Digesteur continu	51

Tableau n°34: valeurs de réduction de virus durant la digestion anaérobie thermophile de lisiers.

Parasites	Réduction	Durée	Température	Type de déchets	Type de réacteur	Références
Ankylostomes	de 99%			Déchets de ferme et humain		57
Ascarides (œufs)	de 93,6%			Déchets de ferme et humain		57
<i>Ascaris suum</i>	de 100%	35j	35°C			74
<i>Ascaris suum</i>	de 100%	35j	35°C		Réacteur continu	63
<i>Ascaris suum</i>	Infectiosité perdu	30j	33°C			15
<i>Ascaris suum</i>	de 100%	40j	33°C			15
<i>Ascaris suum</i>	de 40%	57j	22 à 27°C	lisier de bovin	grande échelle	69
<i>Ascaris suum</i>	de 17 à 18%		35 à 37°C	Lisier de porc	Réacteur de 800-1000L à TRH de 20j grande échelle	41
<i>Ascaris suum</i>	de 100%	24h	55°C	fumier de bovin		69
<i>Cooperia</i>	de 100%	35j	35°C			74
<i>Cooperia</i>	de 100%	4j	35°C		Réacteur continu	63
<i>Cooperia</i>	de 100%	1h	53°C		Réacteur continu	65
<i>Cooperia</i> (œufs)	Perte de la vitalité	2 à 5j	35°C	Lisier de bovin	Digesteur à fourmée avec agitation	65
<i>Cooperia</i> (œufs)	Perte de la vitalité	15 min	53°C	Lisier de bovin	Digesteur à fourmée de 5L avec agitation	65
<i>Cooperia</i> (œufs)	de 100%	24h	53°C	Lisier de bovin	Digesteur à fourmée de 5L avec agitation	65
<i>Cooperia oncophora</i>	de 100%	14j	35°C		Réacteur continu	63
<i>Cooperia oncophora</i>	de 100%	1h	53°C			63
<i>Cooperia oncophora</i>	de 100%	35j	35°C		Digesteur à fourmée avec agitation	74
<i>Cooperia oncophora</i> (œuf)	Perte de la vitalité	2 à 5j	35°C	Lisier de bovin	Digesteur à fourmée de 5L avec agitation	65
<i>Cooperia oncophora</i> (œuf)	Perte de la vitalité	15 min	53°C	Lisier de bovin		65
<i>Dyctiocaulus viviparus</i>	de 100%	7j	35°C	Lisier de bovin	Digesteur à fourmée avec agitation	65
<i>Oesophagostomum</i> spp.	de 100%	35j	35°C		Réacteur continu	74
<i>Oesophagostomum</i> spp.	de 100%	35j	35°C		Réacteur continu	63
<i>Oesophagostomum</i> spp.	de 100%	1h	53°C		Réacteur continu	63

Tableau n° 35: valeurs de réduction de nématodes parasites lors de digestions anaérobies de lisiers.

Parasites	Réduction	Durée	Température	Type de déchets	Type de réacteur	Références
Protozoaires						
<i>Cryptosporidium</i>	de 100%		Thermophilique	Système Lipp		24
<i>Eimeria</i>	Pas de réduction		35°c	Lisier de bovin	Digesteur à fourmée avec agitation	65
<i>Eimeria</i>	Pas de réduction		53°c	Lisier de bovin	Digesteur à fourmée avec agitation	65
<i>Eimeria tenella</i> (oocystes non sporulé)	de 90 à 99%	10j	35°c			48
<i>Eimeria tenella</i> (oocystes sporulés ou non)	de 100%	5 à 10j	50°c	Lisier de volaille		48
Trématodes						
Schistosomes	Pas de réduction			Déchets de ferme et humain		57
Cestodes						
<i>Taenia saginata</i>	de 100%	20j	35°c			74

Tableau n° 36 : Valeurs de réduction de cestodes, trématodes et protozoaires lors de digestions anaérobies de lisiers.

d'eaux usées, on observe un déclin considérable des *Salmonella dusseldorf* et ce taux d'inactivation n'est pas grandement influencé par la période de rétention (68). De plus, le taux d'inactivation est 3 à 4 fois plus grand à 48°C qu'à 35°C (68). Dans le tableau suivant sont récapitulés certains résultats liés à l'effet de la méthanisation sur les bactéries des eaux usées (tableau n°37). Ces résultats montrent que la digestion thermophile est plus efficace contre les bactéries que la digestion mésophile. Les taux de réduction de leur nombre dépendent de l'espèce bactérienne étudiée et des caractéristiques du réacteur employé.

Etudions maintenant l'action de la méthanisation sur les virus contenus dans les eaux usées de STEP.

b. L'action de la méthanisation sur les virus.

Il existe peu de données sur l'effet de la digestion anaérobie sur les virus pathogènes. Les résultats les plus fréquents concernent des digesteurs fonctionnant en mésophilie. Ces résultats montrent une digestion mésophile peu efficace pour éliminer les virus présents dans les eaux usées des STEP. En effet, durant la digestion à des températures de 28 à 34°C, la digestion n'élimine pas complètement les pathogènes viraux (30). Dans le tableau qui suit, sont récapitulés ces quelques résultats (tableau n°38).

Penchons nous, maintenant, sur l'action de la digestion anaérobie sur les parasites.

c. L'action de la méthanisation sur les parasites.

Une fois encore l'efficacité de la méthanisation dépend de la température de digestion. Les résultats de réduction des pathogènes sont beaucoup plus encourageant en condition thermophile que mésophile. Le tableau suivant récapitule les résultats trouvés (tableau n°39). La digestion anaérobie mésophile apparaît un peu impuissante face aux parasites, mais les résultats s'améliorent franchement à des températures thermophiles.

Bactéries	Réduction	Durée	Type de déchets	Température	Type de digesteur	Références
Bactéries	de 90%		Boues de STEP	34 °c	Digesteur avec un TRH de 26j	20
Coliformes	Passage de 2,7 10 ⁵ à 5,5 10 ⁴			35 °c	Digesteur semi-continue avec un th de 15j	37
Coliformes	Passage de 2,7 10 ⁶ à 2,3 10 ³	10 min	Boues de STEP et ordures ménagères	60 °c	Réacteur de 20L semi-continu avec un th de 18j	37
Coliformes fécaux	Passage de 105/g à 103/g			35 °c	Réacteur semi-continu avec un TRH de 10,20,30j nourri une fois par jour	81
Coliformes fécaux	à 0/g		Boues de STEP	55 °c	Réacteur de 10L mélangé par circulation de gaz, semi continu nourri une fois par jour et le TRH est de 20 jours.	81
<i>E. coli</i>	de 0,6 à 0,9log10 par gramme			28 °c		30
Enterocoques	Passage de 1,6 10 ⁵ à 3 10 ³			35 °c	Digesteur semi-continue avec un th de 15j	37
Enterocoques	Passage de 1,6 10 ⁵ à 1,7 10 ²	10 min	Boues de STEP et ordures ménagères	60 °c	Réacteur de 20L semi-continu avec un th de 18j	37
Enterocoques	à 0/g		Boues de STEP	55 °c	Réacteur de 10L mélangé par circulation de gaz, semi continu nourri une fois par jour et le TRH est de 20 jours.	81
<i>Salmonella faecalis</i>	de 0,6 à 0,9log10 par gramme			28 °c		30
<i>Salmonella typhimurium</i>	de 0,6 à 0,9log10 par gramme			28 °c		30
Salmonelles	de 100%	48h		35 °c	Digesteur semi-continue avec un th de 15j	37
Salmonelles	Passage de 40/4g à 1,8 30/4g			35 °c	Réacteur semi-continu avec un TRH de 10,20,30j nourri une fois par jour	81
Salmonelles	de 100%	10 min	Boues de STEP et ordures ménagères	60 °c	Réacteur de 20L semi-continu avec un th de 18j	37
Salmonelles	à 0-1,8/4g		Boues de STEP	55 °c	Réacteur de 10L mélangé par circulation de gaz, semi continu nourri une fois par jour et le TRH est de 20 jours.	81

Tableau n° 37 : Valeurs de réduction des bactéries lors de la digestion anaérobie des boues de STEP.

Virus	Réduction	Durée	Température	Type de digesteur	Type de déchets	Références
Coxsackievirus A9	de 1,5 log10 par gramme	24h	37°C	Digesteur de 5,6L à pH 7,5	Eaux usées	27
Coxsackievirus B3	de 2 log 10 par gramme	Par 24h	35°C	Digesteur à agitation à pH 7	Eaux usées	27
Coxsackievirus B3	de 1 log 10 par gramme	24h	37°C	Digesteur de 5,6L à pH 7,5	Eaux usées	27
Echovirus 11	de 0,5 log10 par gramme	24h	37°C	Digesteur de 5,6L à pH 7,5	Eaux usées	27
Enterovirus	de 99%		34°C	Tth de 26j	Eaux usées	20
Poliovirus	de 1 log 10 par gramme	Par 24h	28°C			80
Poliovirus type1	de 2 log 10 par gramme	24h	37°C	Digesteur de 5,6L à pH 7,5	Eaux usées	27

Tableau n°38 : Valeurs de réduction des virus lors de la digestion anaérobie des eaux usées de STEP.

Parasites	Réduction	Durée	Température	Type de digesteur	Type de déchets	Références
<i>Ascaris</i>	de 100%	30j	38° c	Digesteur de 20L semi-continu	Boues de STEP et ordures ménagères	37
<i>Ascaris lumbricoïdes</i>	de 100%	20 min	55-60° c	Digesteur de 20L semi-continu avec un tth de 18j	Boues de STEP et ordures ménagères	37
<i>Ascaris suum</i>	Pas de réduction		34° c	Digestion avec un 26j	eaux usées	20
<i>Ascaris suum</i>	Vitalité peu changé		35° c	Digesteur de 5L avec agitation	eaux usées	20
<i>Ascaris suum</i>	Destruction de la vitalité	15 min	55° c	Digesteur de 5L avec agitation et continu	Boues d'eaux usées	68
Cestodes	Quelques survie	41j	30° c	Digesteur de 20L semi-continu	Boues de STEP et ordures ménagères	37
<i>Cryptosporidium parvum</i>	17% de la vitalité restante	3j	35° c	Digesteur de 5L semi-continu mélangé avec un tth de 20j	eaux usées	83
<i>Cryptosporidium parvum</i>	0-15% de la vitalité restante	18j	35° c	Digesteur de 5L semi-continu mélangé avec un tth de 20j	eaux usées	83
<i>Eimeria tenella</i>	Reste infectieux	6j	35° c	Digesteur de 5L semi-continu mélangé avec un tth de 20j	eaux usées	83
<i>Eimeria tenella</i>	de 92%	5 min	55° c		STEP	83
<i>Eimeria tenella</i> (oocystes)	Perte de 100% de la vitalité	30 min	65° c		STEP	83

Tableau n° 39: Valeurs de réduction de parasites lors de la digestion anaérobie des eaux usées de STEP.

Analysons maintenant l'effet de la méthanisation sur les parasites contenus dans la fraction organique des déchets municipaux.

3. L'action de la méthanisation sur la fraction organique des déchets municipaux.

Cette action est rarement étudiée et lors des quelques études, il est fréquent que le substrat de méthanisation ne soit pas composé de déchets municipaux purs. Le tableau qui suit récapitule les quelques résultats trouvés sur la méthanisation des déchets municipaux (tableau n°40). Les résultats menés avec des ordures ménagères montrent des données rares et très hétérogènes suivant les procédés utilisés, ne permettant pas de tirer de conclusions sur l'efficacité de la méthanisation face aux différents pathogènes.

Intéressons nous, maintenant, à l'action de la méthanisation sur d'autres déchets non encore abordés.

4. L'action de la méthanisation sur les autres déchets.

Quelques références traitent de l'action de la méthanisation sur les déchets différents de ceux vus précédemment. Comme, par exemple, les produits d'abattoir avec lesquels la fermentation méthanogène thermophile dans une installation pilote semble efficace contre les pathogènes (54). Quelques autres résultats sont rassemblés dans le tableau suivant (tableau n°41).

A travers les différentes données trouvées dans la littérature, nous pouvons remarquer que la majeure partie des études est menée en laboratoire et avec un effluent d'élevage. Très peu de données sont disponibles sur les autres effluents et surtout dans des situations de fonctionnement réel. La méthanisation a un effet réducteur sur le nombre des pathogènes que ce soit les bactéries, les virus ou les parasites. Mais une grande différence est

Pathogènes	Réduction	Durée	Température	Type de digesteur	Type de déchets	Références
Coliformes	Passage de 2,7 10 ⁵ à 5,5 10 ⁴		35°c	Digesteur semi-continue avec un TRH de 15j		37
Enterocoques	Passage de 1,6 10 ⁵ à 3 10 ³		35°c	Digesteur semi-continue avec un TRH de 15j		37
Salmonelles	de 100%	48h	35°c	Digesteur semi-continue avec un TRH de 15j		37
Ascaris	de 100%	30j	38°c	Digesteur de 20L semi-continu	Boues de STEP et ordures ménagères	37
Cestodes	Quelques uns survivent	41j	30°c	Digesteur de 20L semi-continu	Boues de STEP et ordures ménagères	37
Ascaris lumbricoïdes	de 100%	20 min	55-60°c	Digesteur de 20L semi-continu avec un TRH de 18j	Boues de STEP et ordures ménagères	37

Tableau n°40: Valeurs de réduction de certains pathogènes lors de la digestion anaérobie d'ordures ménagères.

Pathogènes	Réduction	Durée	Température	Type de déchet	Références
Ankylostomes	de 99%			Déchets de ferme et déchets humains	57
Ascaridés (œuf)	Mortalité de 93,6-99%			Déchets de ferme et déchets humains	57
Coiliformes fécaux	de 10 ¹⁰ par gramme	10j	55°C	Night soil	49
Schistosomes	Pas de réduction			Déchets de ferme et déchets humains	57

Tableau n° 41 : Valeurs de réduction de pathogènes dans divers déchets lors de digestions anaérobies.

observable entre la méthanisation mésophile et thermophile. La digestion anaérobie thermophile permet une réduction des pathogènes beaucoup plus rapide et plus intense. La digestion mésophile est peu efficace, voire inefficace et non fiable. Au-delà de cette différence due à la température de fonctionnement, l'action de la méthanisation sur les pathogènes dépend du type de pathogène et de la technique de méthanisation. A chaque pathogène va correspondre une certaine réduction lors de la digestion ; de plus, cette réduction va varier suivant les paramètres de fonctionnement employés (température, TRH, système à fournée, système continu ou semi-continu). Il est très important de noter que certaines espèces de pathogènes sont résistantes à la digestion anaérobie comme, les bactéries sporogènes, *Campylobacter jejuni*, les *Parvovirus*, les schistosomes et les *Eimeria spp.* .

Maintenant que nous avons un aperçu de l'action de la digestion anaérobie sur les pathogènes, étudions quels sont les risques rencontrés lors de la digestion anaérobie qui peuvent gêner son déroulement et son effet sur les pathogènes.

C. Les risques d'un mauvais déroulement de la digestion anaérobie.

Il est en effet intéressant de connaître les risques pouvant gêner le déroulement de la méthanisation, afin de voir si cela peut influencer la réduction des pathogènes.

I. Les risques liés aux antibiotiques, aux additifs et aux désinfectants.

Une question se pose quand on parle de méthanisation, qui est un procédé de dégradation de la matière organique par un ensemble de bactéries : quelle est la conséquence de la présence d'antibiotiques, d'additifs et de désinfectants dans les effluents traités ? Plusieurs études abordant cette question ont été menées.

Tout d'abord 15 antibiotiques ont été testés sur des boues anaérobies provenant d'une fabrique de fécule d'amidon de blé dans un réacteur UASB. L'analyse des résultats est axée sur les bactéries acétogéniques, les bactéries archae méthanogéniques et sur la digestion dans sa globalité (quantité de méthane produit).

En ce qui concerne les inhibiteurs de la polymérase ARN et ADN dépendant, la rifampicine met 2 à 3 jours pour affecter la production de biogaz. Elle inhibe la digestion anaérobie à partir de concentrations hautes (200mg/l).

Pour les inhibiteurs de la paroi cellulaire, les bêta lactamines entraînent une réduction de la digestion de 30 à 40% à une concentration de 10 mg/l, mais la réduction n'augmente pas à 50mg/l. Cette réduction est due à l'inhibition des bactéries, qui consomment l'acide propionique et butyrique.

Pour les inhibiteurs de la synthèse des protéines, les aminoglycosides ont un léger effet sur la méthanisation. La streptomycine entraîne à 50 mg/l, une inhibition de 35 à 40% de la production de biogaz. La kanamycine, la gentamicine et la streptomycine n'ont pas d'effet sur la digestion. Par contre, la néomycine entraîne une inhibition de 17 à 40% à des concentrations de 10 à 50 mg/l.

La tétracycline, la chlortétracycline sont eux des inhibiteurs puissants de la digestion. Les bactéries méthanogéniques acetoclastiques ne sont pas affectées au-dessus de 25 mg/l. Pour la chlortétracycline à des concentrations supérieures à 100mg/L les bactéries acétogéniques meurent. Avec la doxycycline, qui est moins active, seules les bactéries dégradant les C4 sont affectés. On obtient une réduction de 25 à 45% pour des concentrations allant de 10 à 100mg/l.

Pour les macrolides, la tylosine inhibe la production de 35% pour une concentration de 25 mg/l et de 45% pour une concentration de 250 mg/l. Elle entraîne une inhibition spécifique des bactéries dégradant les C3 et C4, mais elle n'a pas d'effet sur les bactéries méthanogènes acétoblastiques. L'érythromycine n'a pas d'influence sur la production de méthane même à la concentration de 250 mg/l.

En ce qui concerne le chloramphénicol, il inhibe à 50% la digestion, à basse concentration c'est à dire de 15 à 20 mg/l et à 90% à une concentration de 25 mg/l. L'inhibition est complète pour une concentration de 50 mg/l (85).

De même, le Tego 51, le Dettol, le NaOCl, le Créolin, les antibiotiques (le chlortetracycline, la tylosine, l'erythromycine, le chloranphénicol, la bacitracine, la virginiamycine) n'entraînent pas d'inhibition de la méthanisation aux concentrations habituelles, mais, à des concentrations hautes, le Dettol, le Créolin, la bacitracine, la virginiamycine, inhibent la production de biogaz (86). Mais les montants résiduels de médicaments antimicrobiens ne semblent pas avoir d'activité sur la production de méthane. Les désinfectants de routine et de prophylaxie pour les sols, les murs et les équipements ne semblent pas entraîner de réduction de la production de biogaz. Par contre, la désinfection du lisier à l'hydroxyde de sodium à 8% et au formaldéhyde à des concentrations supérieures à 4% ne doit pas être utilisée (79).

De plus, l'effet des antibiotiques sur la digestion anaérobie et aérobie a été étudié. La digestion aérobie et la digestion anaérobie sont plus ou moins influencées par la présence d'antibiotique comme additifs alimentaires, mais le traitement aérobie thermophile est plus influencé que l'anaérobie(12).

Par contre, on peut noter que le traitement anaérobie ne semble pas augmenter le pourcentage de bactéries résistantes aux antibiotiques (84).

Certains agents antibiotiques et désinfectants peuvent gêner, souvent à des concentrations fortes, le déroulement de la méthanisation et donc empêcher celle-ci de produire son effet réducteur sur les pathogènes. Il est donc nécessaire de connaître un peu le passif des effluents employés.

II. Les autres risques d'une mauvaise digestion anaérobie.

Il existe plusieurs risques techniques, qui peuvent gêner le déroulement de la digestion anaérobie. La réduction pathogénique de la digestion anaérobie peut être freinée par des court-circuits à l'intérieur du digesteur ou bien par la simultanéité du retrait et de l'ajout de substrat dans le digesteur, surtout s'il s'agit d'un digesteur complètement mélangé. Ces problèmes peuvent permettre à des pathogènes de ne pas rester assez longtemps dans le digesteur et donc d'échapper aux effets de la digestion anaérobie (22).

Ces observations mettent en avant la nécessité de vérifier l'origine des boues et de surveiller le bon fonctionnement des réacteurs.

Penchons nous maintenant sur les facteurs permettant à la digestion anaérobie de réduire le nombre des pathogènes.

D. Les facteurs permettant la réduction des pathogènes.

La méthanisation réduit le nombre de certains pathogènes, mais quels sont les facteurs physiques ou chimiques obtenus lors de la méthanisation, qui permettent cette réduction ?

I. Les facteurs permettant l'élimination des bactéries durant la méthanisation.

La température est le facteur principal agissant sur la réduction des bactéries, mais ce n'est pas le seul facteur en jeu. En effet, durant la digestion d'un mélange de fumier de porc, de bovin et de déchets domestiques à une température de 55°C dans un réacteur de 3l nourrit 4 fois par jour avec un temps de rétention minimum (TRH) de 15 jours et un temps de rétention minimum garanti (MGRT) de 6 jours, l'inactivation des bactéries se fait par la chaleur et d'autres facteurs bactéricides (51). De même, durant la digestion anaérobie, la survie des bactéries est déterminée par la température, mais aussi la concentration en matières solides, le TRH, la concentration en acide gras volatil et le pH (43). De plus, lors de la digestion de lisier de bovin et de porc dans un réacteur à fournée de petite taille pendant 4 semaines à 35°C avec une agitation automatique, l'inactivation des bactéries végétatives est dépendante du temps, de l'espèce bactérienne et de la température. Mais il ne semble pas qu'il y ait une influence due au type de lisier, au procédé de fonctionnement du réacteur (à fournée ou continu), à la quantité de gaz émis, à la quantité de matière sèche, à la concentration en N-NH₃ et au pH (64). Mais encore, la réduction des *Streptococcus fecalis* et des *E. coli* dans un mélange

de boues de vidange et de hyacinthe d'eau semble influencé par le temps, la température, le stockage et le procédé (29). Mais, il semble qu'il n'y ait pas de relation directe entre le chargement du lisier dans le digesteur, la performance du digesteur et le déclin du nombre de pathogènes et qu'il n'y ait pas de relation directe entre le type de lisier, le TRH, la concentration en acides gras volatils totaux et le déclin des bactéries pathogènes viables dans un digesteur à grande échelle traitant du lisier de bovin, de porc et de volaille (42).

Une autre hypothèse sur le mécanisme d'action de l'effet réducteur de la méthanisation sur les bactéries est aussi présentée : pour survivre à l'environnement de la digestion anaérobie semi-continue, les bactéries doivent être capables de s'adapter rapidement aux changements de nutrition. Après une baisse rapide du nombre des bactéries pathogènes viables (*E. coli*, *Salmonella typhimurium*, *Yersinia enterocolitica*, *Listeria monocytogenes*), on arrive à un palier avec un déclin nul. Dans cette situation, on se trouve dans une position d'équilibre entre les populations viables. Tout ce processus explique pourquoi le temps de réduction est espèce dépendant, les bactéries n'ayant pas toutes les mêmes moyens de survie et d'adaptation. Les *E. coli*, *Salmonella typhimurium*, *Yersinia enterocolitica*, *Listeria monocytogenes* utilisant les hydrates de carbone, ces bactéries doivent entrer en compétition avec les bactéries non méthanogènes pour obtenir les nutriments essentiels à leur survie. Cela provoque une baisse des populations bactériennes due au manque de nutriments. Par contre, *Campylobacter jejuni* pouvant utiliser les acides aminés et les vitamines, qui sont relargués lors de la mort des autres bactéries subit moins la compétition pour ces nutriments donc cela explique un temps de réduction décimal pour cette bactérie plus long (42) (43).

II. Les facteurs permettant l'élimination des virus durant la méthanisation.

Les facteurs permettant la réduction du nombre de virus pathogènes semblent principalement être la température (58). De plus, l'agent d'élimination des coliphages F2 apparaît aussi être NH₃, la température et le pH, mais par

contre les acides gras volatils ne semble pas être un agent destructeur de virus (56).

III. Les facteurs permettant l'élimination des parasites durant la méthanisation.

Certains auteurs ont tenté de trouver les facteurs permettant la réduction en nombre des parasites. Comme l'inactivation des parasites est plus intense dans le lisier de volaille que dans de l'eau physiologique dans les mêmes conditions de temps, de température et d'anaérobiose, il y existe d'autres facteurs qui entrent en jeu (48). Or, la température semble être la cause initiale d'inactivation des parasites, comme, par exemple, pour les oocystes de *Cryptosporidium parvum* (83).

Les paramètres communs principaux d'inactivation des pathogènes semblent donc être la température et le temps, mais ils ne sont pas les seuls acteurs de cette réduction en nombre. En fait, malgré les nombreuses hypothèses formulées, beaucoup d'incertitudes restent présentes dans ce domaine.

E. Le contrôle de l'effet réducteur de la digestion anaérobie.

La méthanisation a un effet réducteur sur le nombre des pathogènes, qui est variable suivant l'espèce de pathogènes, mais aussi, suivant le type de méthanisation réalisé (de plus, la méthanisation est un procédé qui subit parfois des accidents dans son déroulement et les pathogènes peuvent ne pas subir le procédé d'assainissement dans sa totalité). Devant le problème de cette variabilité, il semble donc essentiel de disposer d'un moyen de contrôle de l'effet réducteur de la digestion anaérobie.

Différentes solutions sont proposées. Des recommandations en ce qui concerne les paramètres de fonctionnement des réacteurs sont données. Pour obtenir l'assainissement des effluents, des conditions thermophiliques de fonctionnement sont conseillées en Suisse alors qu'en Allemagne la technique

pathogènes). (87). Mais, en Grande Bretagne, on reconnaît que la digestion mésophile durant 12 jours à 35°C suivi de 14 jours de stockage constitue une bonne désinfection. (20). De même, la digestion mésophile accompagnée d'un prétraitement serait capable de réduire les bactéries pathogènes végétatives (88). De plus, une digestion à 55°C pendant 24h ou à 50°C pendant 4 à 8h ou à 70°C pendant 1 h permettrait un assainissement contrôlé, mais cela dépend des déchets traités. Ces chiffres sont obtenus en s'appuyant sur les bactéries potentiellement présentes dans les effluents (51).

Dans les installations de biogaz centralisées danoises, comme le niveau de désinfection, obtenu par la méthanisation, dépend du type d'effluent, de son niveau de contamination et du type d'agents pathogènes qui le contamine, un classement des déchets est établi. Les effluents sont plus ou moins contaminés suivant leur origine et leur nature. Ce classement permet d'adapter les traitements aux risques potentiels de chaque déchet. Les déchets sont donc classables en plusieurs catégories. Les installations danoises exploitent le classement suivant (tableau n°42) (7).

De plus, les installations danoises préconisent d'établir une surveillance du bon déroulement de la méthanisation grâce à des organismes indicateurs de la réduction en nombre des pathogènes. La méthode de suivi des streptocoques fécaux est utilisée pour confirmer un effet réducteur du nombre des pathogènes adéquat. Le but est d'obtenir au moins une réduction du nombre des streptocoques fécaux de 3 à 4 log₁₀ par gramme d'effluent. Le produit final ne doit pas contenir plus de 100 streptocoques fécaux par gramme et ne doit contenir aucune Salmonelle par 25 grammes (7) (5). Il faut, aussi, préciser que les installations de biogaz au Danemark ne doivent pas traiter d'animaux morts, de matières pathogènes venues d'animaux malades et ces matières doivent être séparées des autres déchets et être orientées vers des installations de transformation et d'incinération. Les déchets internationaux doivent aussi être incinérés, ainsi que les déchets à hauts risques des hôpitaux, des cliniques humaines et vétérinaires.

Les déchets de classe C et D doivent être traités dans des réservoirs d'assainissement séparés, un assainissement contrôlé étant nécessaire. Cette

Catégorie de déchet	Origine des déchets
A	Boues et eaux usées, provenant de résidus non contaminés de matériels végétaux brut et de laiterie.
B	Boues provenant de matériels animaux brutes.
C	Déchets composés à partir de décharge, d'institutions et compagnies privée et de déchets alimentaires, couches et déchets assimilés.
D	Boues de vidange d'installations municipales et privées.

Tableau n°42 : classification des différentes catégories de déchets dans les installations danoises (7).

étape supplémentaire consiste en un pré-traitement à 70°C d'une heure avant la digestion anaérobie. Un enregistrement permanent de la température et de la durée de séjour dans le réservoir d'assainissement est nécessaire. Différentes combinaisons du couple temps/température sont recommandées. Pour un système thermophile traitant du lisier ou du fumier associé à des déchets de classe A et B à faible charge pathogène, la température doit être de 55°C pendant un MGRT de 2 heures ou bien de 50°C pendant un MGRT de 4 heures avec un TRH de 48 à 72 heures. Pour un système mésophile, un pré- ou post-assainissement est nécessaire et le niveau de température doit être ajusté à la classe des déchets. S'il se produit une irrégularité dans le traitement, une restriction dans la distribution de la biomasse produite est nécessaire. Si on traite un déchet non catalogué dans les différentes classes, il faut des permissions spéciales données par les autorités compétentes. Ces permissions doivent préciser les exigences spécifiques pour l'assainissement et l'usage du produit. Par ailleurs, ce sont les services vétérinaires, qui sont responsables des mesures de contrôle en cas d'épidémie de maladie graves dans les élevages situés dans le secteur des installations de biogaz centralisée, afin d'éviter la présence de pathogènes en trop grand nombre dans les effluents (7).

A partir de ces recommandations, différentes questions se posent. Tout d'abord, on peut se demander si la pré- ou post-pasteurisation est un moyen d'assainissement contrôlé efficace. La post-pasteurisation a été introduite de façon imprudente, car elle n'empêche pas une croissance des pathogènes dans les boues libres en germes. La pré-pasteurisation est une méthode efficace, mais elle ne prévient pas, elle non plus, la recroissance bactérienne après la digestion ; en fait, elle diminue la charge en pathogènes avant l'entrée dans le réacteur et donc facilite l'effet réducteur de la méthanisation (87). Une pré-pasteurisation à 60°C pendant une heure augmente l'inactivation de *Coxsackievirus* B3 (27). La pasteurisation de la boue digérée provoque la destruction de *Coxsackie* B3 et des *Poliovirus* (30). Une pré-pasteurisation à 65-70°C pendant 30 min ou à 80°C pendant 10 min tue tous les œufs d'*Ascaris*

suum (10). Une pasteurisation à 70°C pendant 30 min des boues détruit les salmonelles (68).

Mais on peut aussi se demander quels sont les organismes indicateurs de la réduction des pathogènes les plus fiables et les plus adaptées. Les organismes indicateurs sont efficaces si, lors de la digestion anaérobie, ils subissent une baisse de leur population représentative de celle de la majeure partie des pathogènes.

Pour le suivi plus spécifique de la réduction des virus, certains indicateurs sont proposés. Les *Parvovirus* sont de bons indicateurs, car ils sont lentement inactivés en milieu anaérobie (52). Durant la digestion anaérobie du fumier brut de porc, l'élimination des coliphages F2 peut être relié à l'élimination de certains virus entériques indigènes (56). Mais, durant la digestion à 35°C, les coliformes fécaux et totaux et les streptocoques fécaux et totaux sont de pauvres reflets de l'évolution en nombre des virus (9). En effet, pour suivre l'assainissement sanitaire des effluents, il serait plus raisonnable d'utiliser des virus peu résistants comme les *Reovirus* et les *Picornavirus* qui représentent mieux les virus pathogènes animaux (51).

Plusieurs organismes indicateurs sont proposés dans la littérature : les bactéries gram négatives, les bactéries fécales, les salmonelles (14). Mais les streptocoques et entérocoques fécaux sont pourtant le plus souvent cités.

Les streptocoques fécaux sont des indicateurs de la réduction microbienne de 20 à 55°C (8). Les streptocoques fécaux sont utilisés dans le but de mesurer le résultat de la réduction des éléments pathogènes dans les réservoirs de digestion et d'assainissement (5). De plus, les streptocoques fécaux sont supérieurs aux coliformes fécaux comme indicateur de la contamination fécale (28). Comme le rapport streptocoques sur virus diminue de 1,4 fois, les streptocoques sont des indicateurs non quantitatifs, mais qualitatifs des virus (9).

L'utilisation des entérocoques, comme bactéries indicatrices des bactéries végétatives est, aussi, envisageable et plus valable que les *E.coli* (63) (88). En effet, beaucoup d'éléments pathogènes sont éliminés si les *Enterococci* sont réduits de 4 log₁₀ par gramme d'effluent. C'est le cas du virus du BVD, du virus de la rhinotrachéite infectieuse bovine, du virus de la maladie

d'Aujeszky, du virus de la fièvre porcine classique, des salmonelles et des œufs de parasites qui sont éliminés. Mais, les œufs d'ascaris les plus résistants ne sont pas éliminés mais perdent de la vitalité (7). Les entérocoques fécaux permettent une évaluation quantitative de la réduction des pathogènes et sont utilisés jusqu'à 60°C, au-delà il faut un organisme indicateur plus thermorésistant (7) (50). Par exemple, les *Parvovirus* porcins sont de bons organismes indicateurs pour des températures de 50 à 80°C (50). Donc la méthode des entérocoques fécaux est bien fiable dans les conditions de thermophilie (51). Ce qui est confirmé par le fait que les entérocoques fécaux sont des indicateurs fiables pour mesurer l'effet réducteur des pathogènes de la digestion thermophilique anaérobie pour les *Enterovirus* (50). Mais la méthode des entérocoques ne semble pas aussi fiable à des températures mésophiliques (51).

Les moyens de contrôle proposés sont donc nombreux et variés. Mais les méthodes ayant pour base la surveillance d'organismes indicateurs de la réduction des pathogènes semblent les plus sûres. Or, l'emploi unique de cette méthode ne paraît pas suffisant. Une telle technique ne semble efficace que si elle est associée à un tri sélectif des effluents suivant leur nature et leur origine.

Conclusion

La méthanisation, en tant que technique de traitement des effluents organiques, présente de nombreux avantages. Elle produit un engrais de bonne qualité et un gaz combustible tout en résolvant en partie le problème de la pollution des effluents organiques.

Mais la digestion anaérobie ne semble pas pouvoir résoudre avec autant de facilités le problème des pathogènes contenus dans les effluents traités. En effet, les agents pathogènes sont nombreux et très variés. En ce qui concerne les germes pathogènes sensibles (comme les salmonelles, les streptocoques, les E. coli, les entérovirus et les ascaris), leur nombre peuvent être réduit en nombre à un niveau acceptable, sous certaines conditions. La digestion thermophile semble pouvoir servir de procédé hygiénisant. La digestion mésophile semble devoir être limitée au traitement de produits non contaminés ou sinon être associée à d'autres traitements ayant un pouvoir hygiénisant reconnu.

Malheureusement, l'efficacité de la méthanisation contre les pathogènes ne se limite pas à de simples considérations de température. En effet, plusieurs autres problèmes se présentent. Tout d'abord, la grande variété de procédés de digestion anaérobie crée de multiples cas particuliers. Cette grande variété rend beaucoup plus difficile l'obtention de résultats généralisables en ce qui concerne l'effet de la méthanisation sur les pathogènes. D'autre part, un certain nombre de pathogènes se montrent assez résistants à la digestion anaérobie, comme les *Campylobacter jejuni* et les *Parvovirus*. Enfin, des pathogènes semblent complètement indifférents à la digestion anaérobie comme les *Clostridium*. Ces différents problèmes, justifient la nécessité de mettre en place des systèmes de contrôle du bon déroulement de la digestion anaérobie pour juger de son efficacité sur la réduction du nombre de pathogènes dans les effluents traités. Il semble d'autre part primordial de bien connaître la nature et l'origine des effluents afin de leur appliquer le traitement le plus adéquat. L'ensemble des recherches semble bien confirmer le classement des traitements selon l'US EPA, qui range la digestion anaérobie (35°C/15j ;

55°C :15j ; 20°C/60j) parmi les procédés réduisant significativement les pathogènes (89) (90).

A travers cette étude, nous avons pu remarquer l'inégalité des données trouvées dans la littérature. Cette inégalité est à l'origine de la difficulté d'analyse et de synthèse de ces données. Ces inégalités se situent à plusieurs niveaux. D'une part des expériences ne précisent souvent pas assez l'ensemble des paramètres opératoires, d'où des recherches inexploitable et non reproductibles. D'autre part, il y a une inégalité dans la répartition des recherches : la majorité des données traitent de la méthanisation d'effluents d'élevage par des expériences de laboratoire. Les recherches sur les autres effluents et surtout en milieu industriel ne sont que ponctuelles et de ce fait, sont difficilement généralisables. Ce bilan met en avant la nécessité de développer des programmes de recherche bien définis et bien répartis sur l'ensemble des effluents traités, afin d'obtenir des données plus comparables.

AGREMENT ADMINISTRATIF

Je soussigné, M. BONNES , Directeur par intérim de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse, certifie que

M. Laurent, Emmanuel MARACHE

a été admis(e) sur concours en : 1995

a obtenu son certificat de fin de scolarité le : 8 juillet 1999

n'a plus aucun stage, ni enseignement optionnel à valider.

AGREMENT SCIENTIFIQUE

Je soussigné, **Docteur BRUGERE**, Maître de Conférences de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse, déclare que j'ai lu la thèse de :

M. Laurent, Emmanuel MARACHE

intitulée :

Méthanisation des effluents et déchets organiques : état des connaissances sur le devenir pathogène

et que je prends la responsabilité de l'impression.

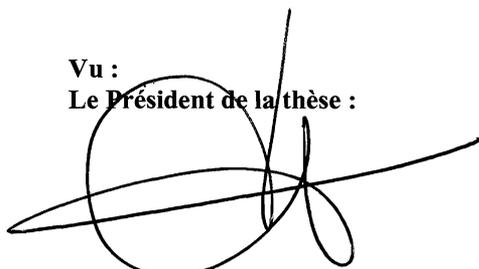
Docteur BRUGERE



Vu :
Le Directeur par intérim
de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse


Monsieur G. BONNES

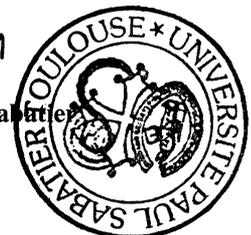
Vu :
Le Président de la thèse :



Professeur H. DABERNAT

Vu le 09 FEV. 2001
Le Président
de l'Université Paul Sabatier


Professeur R. BASTIDE



Annexes

Bactéries	Espèces cibles	Maladies	Déchets	Particularités des bactéries	Références
<i>Aeromonas hydrophila</i>	BV, CV, H	Désordres intestinaux, infections des plaies, septicémie	STEP, industrie (abattoir)	Gram -, anaérobie facultatif	1, 70,
<i>Bacillus anthracis</i>	BV, OV, CP, CV, PC, H	Charbon bactérien	STEP, Elevage	Gram+, sporulée	1, 70, 79
<i>Brucella abortus</i>	BV, OV, CP, CV, PC, H	Brucellose	Elevage, industrie (laiterie)	Gram-, aérobie strict	1, 70, 79, 2
<i>Brucella melitensis</i>	BV, OV, CP, CV, PC, H	Brucellose	Elevage, industrie (laiterie)	Gram-, aérobie strict	1, 70, 79, 2
<i>Brucella suis</i>	BV, OV, CP, CV, PC, H	Brucellose	Elevage, industrie (laiterie)	Gram-, aérobie strict	1, 70, 79, 2
<i>Campylobacter jejuni</i>	BV, OV, CP, CV, PC, H	Campylobactériose (diarrhée)	STEP, Elevage, industrie (laiterie)	Gram-	1, 70, 1, 70, 79, 60
<i>Chlamydia spp</i>	BV, CV, CP, H, OISX	Chlamydie	Elevage	Gram-	70, 79
<i>Clostridium botulinum</i>	BV, OV, CP, CV, PC, H	Botulisme	STEP, ordures ménagères	Gram+, anaérobie baronnet sporulée	1, 70, 79, 2
<i>Clostridium perfringens</i> type c	OV, CP, CV, PC, H, OISX	Enterotoxémie hémorragique	STEP, ordures ménagères	Gram+, anaérobie	1, 70, 79, 2, 7, 13
<i>Coxiella burnetii</i>	BV, OV, CP, CV, PC, H	Fièvre Q	STEP, Elevage	Gram-, aérobie	1, 70, 79
<i>E. coli</i> enteropathogène	BV, OV, CP, CV, PC, H	Colibacillose (diarrhée, mammites...)	STEP, Industrie (laiterie), ordures ménagères, Elevage	Gram-	1, 79, 2, 60, 7, 14
<i>Erysipelothrix rhusiopathiae</i>	PC, OISX, OV, CT, CN, C	Rouget, septicémie aigue, urticaire,	Elevage	Gram+, anaérobie facultatif	1, 70, 7, 13
<i>Legionella pneumophila</i>	V, CP, H	endocardite, polyarthrite			1, 70,
<i>Leptospira canicola</i>	PC, H BV, PC, CN, Rongeurs	Légionellose Leptospirose	STEP Elevage, STEP	Aérobie, spirochète	1, 70, 79, 2

Annexe n°1(1) : Exemples de bactéries pathogènes pouvant être retrouvées dans les déchets organiques.

Bactéries	Espèces cibles	Maladies	Déchets	Particularités des bactéries	des Références
<i>Leptospira icterohaemorrhagiae</i>	BV, PC, CV, Rongeurs	Leptospirose	STEP, Elevage	Aérobie, spirochète	70,2,18
<i>Leptospira interrogans</i>	BV, OV, CP, CV, PC, H, Rongeurs	Leptospirose	STEP, Elevage, industrie (laiterie)	Aérobie, spirochète	70,2,18
<i>Listeria monocytogenes</i>	BV, OV, CP, CV, PC, H, O	Listériose	STEP, Elevage, industrie (laiterie, abattoir)	Gram+, anaérobie facultatif	1,70,78,2,7,6
<i>Mycobacterium avium</i>	ISX PC, VOL, OV, BV, CP, C	Tuberculose aviaire	Elevage, STEP, industrie (abattoir)	Gram+, aérobie	1,70,78,10
<i>Mycobacterium bovis</i>	V, H BV, OV, CP, CV, PC, H	Tuberculose	Elevage, industrie (abattoir, laiterie)	Gram+, aérobie	1,70,78,10
<i>Mycobacterium paratuberculosis</i>	BV, OV, CP	Paratuberculose	Industrie (abattoir), Elevage	Gram+, aérobie	1,70,7,6
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	BV, OV, CP, CV, PC, CN, H	Tuberculose	STEP, Elevage	Gram+, aérobie	1,70,9
<i>Pasteurella tularensis</i>	H, Lapin	Tularémie	STEP	Gram-, anaérobie facultatif	70,18
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	BV, OV, CP, PC, CV, CN, CT, H	Infections diverses	STEP, industrie (abattoir, laiterie), ordures ménagères	Gram-, aérobie strict	1,70,78,7
<i>Pseudomonas pseudomallei</i>	CV, BV, OV, CP, PC, CN, H	Mélioïdose	Industrie (abattoir)	Gram-, aérobie strict	1,70,7
<i>Rickettsia spp</i>	CN, H	Rickettsiose	Elevage	Gram-, aérobie	70,9
<i>Salmonella choleraesuis</i>	PC	Salmonellose	STEP, industrie (abattoir), Elevage	Gram-, anaérobie facultatif	70,6
<i>Salmonella dublin</i>	BV, OV	Salmonellose	Elevage	Gram-, anaérobie facultatif	70,6
<i>Salmonella typhimurium</i>	BV, PC, OV, CV, VOL, H	Salmonellose	Elevage, STEP	Gram-, anaérobie facultatif	70,60,18

Annexe n°1(2) : Exemples de bactéries pathogènes pouvant être retrouvées dans les déchets organiques.

Bactéries	Espèces cibles	Maladies	Déchets	Particularités des bactéries	des Références
<i>Salmonella typhosa</i>	BV,OV,CP,CV,PC,H	Salmonellose	STEP	Gram-, anaérobie facultatif	1, 70, 18
<i>Shigella boydii</i>	H	Shigellose	STEP	Gram-, anaérobie facultatif	3, 7, 1, 70, 79, 6, 18
<i>Shigella dysenteriae</i>	H	Shigellose	STEP	Gram-, anaérobie facultatif	3, 7, 1, 70, 79, 6, 18
<i>Shigella flexneri</i>	H	Shigellose	STEP	Gram-, anaérobie facultatif	3, 7, 1, 70, 79, 6, 18
<i>Shigella sonnei</i>	H	Shigellose	STEP	Gram-, anaérobie facultatif	3, 7, 1, 70, 79, 6, 18
<i>Staphylococcus spp</i>	BV,OV,CP,CV,PC,H	Staphylococcie	STEP, industrie (laiterie, abattoir), ordures ménagères	Gram+, anaérobie facultatif	1, 70, 79, 7
<i>Streptococcus spp</i>	BV,OV,CP,CV,PC,H	Streptococcie	STEP, industrie (laiterie, abattoir), ordures ménagères	Gram+, anaérobie facultatif	1, 70, 79, 7
<i>Treponoma hyodysenteriae</i>	PC	Treponematose	Elevage	Microanaérobie, anaérobie	70, 79, 7
<i>Vibrio cholerae</i>	H	Choléra	STEP	Gram-, anaérobie facultatif	3, 70, 79, 60
<i>Yersinia enterocolitica</i>	BV,OV,CP,CV,PC,H,A	Yersiniose	STEP, industrie (abattoir, laiterie), ordures ménagères	Gram-, anaérobie facultatif	3, 1, 70, 79, 60
<i>Yersinia pseudotuberculosis</i>	x de ferme H,OV,Rongeurs	Yersiniose	Elevage, STEP	Gram-, anaérobie facultatif	70, 10, 60

Annexe n°1(3) : Exemples de bactéries pathogènes pouvant être retrouvées dans les déchets organiques.

Virus	Espèces sensibles	Maladies	Déchets	Particularités du virus	du	Références
Adenovirus aviaire	Vol	Maladies respiratoires et artérites.	Elevage	ADN, non enveloppé		38,79,35,31
Astrovirus	H	Gastroentérite	STEP	ARN		38,79,60,35,32
Calicivirus	H	Gastroentérite	STEP	ARN, non enveloppé		38,79,60,35,32
Coronavirus bovin	BV	Coronavirus (diarrhée)	Industrie(abattoir), STEP	ARN, enveloppé		38,1,7,6,33
Coronavirus porcin	PC	Gastroentérite transmissible	Industrie(abattoir), Elevage	ARN, enveloppé		38,1,7,6,33
Coxsackievirus	H	Encéphalomyélite	STEP, Ordures ménagères	ARN		38,79,60,7,32,18
Echovirus	H	Encéphalomyélite	STEP, Ordures ménagères	ARN		38,79,60,7,32,18
Enterovirus aviaire	OISX	Encéphalomyélite	Elevage, STEP	ARN		38,79,60,7,32,18,31
Herpes virus (Aujeszky)	BV,OV,PC	Maladie d'Aujeszky	Industrie(abattoir), Elevage, Ordures ménagères	ADN, enveloppé		1,7,6,33
Papillomavirus bovin	BV	Papillomatose	Elevage	ADN		79,33
Parvovirus bovin	BV	Parvovirose (diarrhée)	Industrie(abattoir), Elevage	ADN, non enveloppé		1,79,7,6,32
Parvovirus du vison	Vison	Plasmocytose, panleucopénié	Industrie(abattoir), Elevage	ADN, non enveloppé		1,79,7,6,32
Parvovirus porcin	PC	Parvovirose (troubles de la reproduction)	Industrie(abattoir), Elevage	ADN, non enveloppé		1,79,7,6,32

Annexe n°2(1) : Exemples de virus pathogènes pouvant être retrouvés dans les déchets organiques.

Virus	Espèces sensibles	Maladies	Déchets	Particularités du virus	du	Références
Poliovirus	H	Polioomyélite	STEP, Ordures ménagères	ARN		38, 79, 60, 7, 35, 18
Poxvirus (Clavélee)	OV	Clavélee	Industrie(abattoir)	ADN		1, 33
Poxvirus (ecthyma)	OV, CP, H	Ecthyma	Industrie(abattoir)	ADN		1, 33
Reovirus	BV, OV, Vol	Hépatoencephalomyélite	STEP, Ordures ménagères, Elevage	ARN, non enveloppé		38, 79, 60, 7, 35
Rhinovirus bovin	BV	Rhinite	Elevage	ARN, non enveloppé		79, 33
Rotavirus de l'homme	H	Rotavirose (diarrhée)	STEP, Industrie(abattoir), Elevage	ARN, non enveloppé		1, 79, 60, 7, 6, 35
Rotavirus des bovins	BV	Rotavirose (diarrhée)	STEP, Industrie(abattoir), Elevage	ARN, non enveloppé		1, 79, 60, 7, 6, 35
Rotavirus du porc	PC	Rotavirose (diarrhée)	STEP, Industrie(abattoir), Elevage	ARN, non enveloppé		1, 79, 60, 7, 6, 35
Togavirus (Border disease)	OV	Border disease	Industrie(abattoir)	ARN		1, 33
Togavirus (maladie des muqueuses)	BV, PC	Maladie des muqueuses	Industrie(abattoir)	ARN		1, 33
Togavirus (peste porcine classique)	PC	Peste porcine classique	Industrie(abattoir)	ARN		1, 33
Virus de la fièvre aphteuse	BV, OV, CP, PC	Fièvre aphteuse	Industrie(abattoir), Elevage	ARN, non enveloppé		1, 33, 18
Virus de la peste porcine africaine	PC	Peste porcine africaine	Industrie(abattoir)	ADN, enveloppé		1, 33, 18
Virus de l'hépatite A	H	Hépatite A	STEP, ordures ménagères	ARN		38, 79, 60, 7, 35, 18
Virus de l'hépatite E	H	Hépatite E	STEP, ordures ménagères	ARN		38, 35

Annexe n°2(2) : Exemples de virus pathogènes pouvant être retrouvés dans les déchets organiques.

Nématodes	Espèces cibles	Maladie	Déchets	Références
<i>Ankylostoma duodenalis</i>	H	Ankylostomatidose	STEP	1,79,2
<i>Ascaris lumbricoïdes</i>	H	Ascariidose	STEP	1,79,2,11
<i>Ascaris suum</i>	BV, OC, CP, PC, H	Ascariidose	Industrie(abattoir), Elevage	1,79,7,6
<i>Bunostomum</i> sp	BV	Bunostomose	Industrie(abattoir)	1
<i>Chabertia ovina</i>	OV, CP	Chabertiase	Industrie(abattoir)	1
<i>Dictyocaulus armfieldi</i>	CV	Dictyocaulose	Industrie(abattoir), Elevage	1,79,7,6
<i>Dictyocaulus viviparus</i>	BV	Dictyocaulose	Industrie(abattoir), Elevage	1,79,7,6
<i>Dracunculus medinensis</i>	H	Drancunculose	STEP	18
<i>Heterakis</i>	VOL		Elevage	79
<i>Hyostromylus rubidus</i>	PC	Hyostromylose	Industrie(abattoir), Elevage	1,79
<i>Macracanthorhynchus</i> sp	PC	Acanthocéphalose	Industrie(abattoir)	1
<i>Necator</i> sp	H	Oxyurose humaine	STEP	1
<i>Oesophagostomum dentatum</i>	PC	Oesophagostomose	Industrie(abattoir)	1
<i>Oesophagostomum radiatum</i>	BV	Oesophagostomose	Industrie(abattoir)	1
Oxyures de l'homme	H	Oxyurose humaine	STEP	1,2
Oxyures des ruminants	BV, OV, CP	Oxyurose des ruminants	Industrie(abattoir)	1,2
Oxyures equi	CV	Oxyurose du cheval	Industrie(abattoir)	1,2

Annexe n°3 (1): Exemples de nématodes pathogènes pouvant être retrouvés dans les déchets organiques.

Nématodes	Espèces cibles	Maladie	Déchets	Références
<i>Parascaris equorum</i>	CV,H	Ascariidose	Industrie(abattoir)	1
<i>Spirures des ruminants</i>	BV,OV,CP	Spirurose	Industrie(abattoir)	1
<i>Spirures du cheval</i>	CV	Spirurose	Industrie(abattoir)	1
<i>Spirures du porc</i>	PC	Spirurose	Industrie(abattoir)	1
<i>Strongles du cheval</i>	CV	Strongylose	Industrie(abattoir)	1,2
<i>Strongyloides ransonii</i>	PC	Strongyloïdose	Industrie(abattoir)	1
<i>Strongyloides stercoralis</i>	BV,OV,CP, CV, PC, H	Strongyloïdose	Industrie(abattoir), STEP	1
<i>Toxocara canis</i>	CN,PC,H	Ascariidose	STEP	1,79,2,60
<i>Toxocara cati</i>	CT,H	Ascariidose	STEP	1,79,2,60
<i>Toxocara vitulorum</i>	BV,H	Ascariidose	STEP	1,79,2,60
<i>Trichinella spiralis</i>	BV,OV,CP, CV, PC, H	Trichinellose	Industrie(abattoir)	1
Trichostrongylidés des ruminants	BV,OV,CP	Trichostrongylidose des ruminants	Industrie(abattoir), Elevage	1,79,6,7
<i>Trichostrongylus axei</i>	BV,OV,CP, CV	Trichostrongylidose	Industrie(abattoir), Elevage	1,79,6,7
<i>Trichuris ovis</i>	BV,OV,CP	Trichurose	Industrie(abattoir), STEP	1,2, 18
<i>Trichuris suis</i>	PC	Trichurose	Industrie(abattoir), STEP	1,2, 18

Annexe n°3 (2): Exemples de nématodes pathogènes pouvant être retrouvés dans les déchets organiques.

Trematodes	Espèces cibles	Maladie	Déchets	Références
<i>Clonorchis sinensis</i>	CN,CT,PC,RAT,H	Clonorchiasse	STEP	18
<i>Dicrocoelium lanceatum</i>	BV,OV,CP,CV,PC,H	Dicrocoeliose(petite douve)	Industrie(abattoir)	1
<i>Fasciola hepatica</i>	BV,OV	Fasciolose	STEP	79,2,6,7
<i>Schistosoma sp</i>	BV,CN,PC,H	Schistosomose	STEP	18

Annexe n°4: Exemples de trématodes pathogènes pouvant être retrouvés dans les déchets organiques.

Cestodes	Espèces cibles	Maladie	Déchets	Références
Anoplocephalidés des bovins	BV	Taeniasis	Industrie(abattoir), Elevage	1
Anoplocephalidés des ruminants	BV,OV,CP	Taeniasis	Industrie(abattoir), Elevage	1
Anoplocephalidés du cheval	CV	Taeniasis	Industrie(abattoir), Elevage	1
<i>Echinococcus granulosus equinus</i>	BV,CP	Taeniasis/Echinococcos	STEP	1,79,2,18
<i>Echinococcus granulosus granulosus</i>	BV,OV,CP,CV,H	Taeniasis/Echinococcos	STEP	1,79,2,18
<i>Echinococcus multilocularis</i>	Renard,H	Taeniasis/Echinococcos	STEP	1,79,2,18
<i>Hymenolepis nana</i>	H	Taeniasis	STEP	1,60,
<i>Taenia hydatigena</i>	BV,OV,CP,PC	Taeniasis/Echinococcos	STEP	1
<i>Taenia multiceps</i>	BV,OV,CP,CV,PC,H	Taeniasis/Echinococcos	STEP	1,60,18
<i>Taenia ovis</i>	OV	Taeniasis/Echinococcos	STEP	1,60,18
<i>Taenia saginata</i>	BV,H	Taeniasis/Echinococcos	STEP	1,79,2,60,18
<i>Taenia solium</i>	PC,BV,H	Taeniasis/Echinococcos	STEP	1,79,2,60,18

Annexe n°5: Exemples de cestodes pathogènes pouvant être retrouvés dans les déchets organiques.

Protozoaires	Espèces cibles	Maladies	Déchets	Références
<i>Acanthamoeba hatchetti</i>	H		STEP	18
<i>Balantidium coli</i>	PC,H	Balantidiose	STEP, Industrie(ab attoir), Elevage	1,79
<i>Besnoitia besnoitii</i>	BV,OV,CP	Besnoitose	STEP, Industrie(ab attoir)	1
Coccidies	BV,OV,CP,CV,PC,H,V OL	Coccidiose	STEP, Industrie(ab attoir), Elevage	1,2,7,6
<i>Cryptosporidium</i> sp	BV,OV,CP,H	Cryptosporidiose	STEP, Industrie(ab attoir)	1,6
<i>Eimeria</i> sp			STEP	18
<i>Entamoeba histolytica</i>	PC,H	Dysenterieamibienne	STEP, Industrie(ab attoir)	1,79,60
<i>Giardia Intestinalis</i>	H	Giardiase	STEP	60,18
<i>Giardia lamblia</i>	H	Giardiase	STEP	1,79
<i>Naegleria australensis</i>	H		STEP	18
<i>Naegleria fowleri</i>	H		STEP	18
<i>Sarcocystis</i> sp	BV,OV,CP,PC	Sarcosporidiose	STEP	1,79
<i>Toxoplasma gondii</i>	BV,OV,CP,CV,PC,H	Toxoplasmose	STEP, Industrie(ab attoir, laiterie)	1,79,60,18

Annexe n°6: Exemples de protozoaires pathogènes pouvant être retrouvés dans les déchets organiques.

Bibliographie :

(1)**Ademe** : Les germes pathogènes dans les boues résiduelles des stations d'épuration urbaines. Collection Ademe "valorisation agricole des boues d'épuration" ; 1994 ; 62pp.+30pp. d'annexes.

(2)**Agosto M.** : Valorisation agricole des déchets et risques sanitaires ; Thèse vétérinaire de Lyon ; 1995, 132pp. .

(3)**Al Seadi T.; Holm-Nielsen J.B.** ; Large scale co-digestion plants in Denmark ; Deutsche Veterinärmedizinische Gesellschaft e.V.; Band II; IEA BIOENERGY WORKSHOP; Hygienic and environmental aspects of anaerobic digestion: Legislation and experiences in Europe; Stuttgart ; 29-31 march 1999; p 9-18.

(4)**Baeten-d ; Vertraete-w** ; Manure and municipal solid waste fermentation in Flanders: an appraisal ; Biological wastes ; 1988 ; 26:4,297-314.

(5)**Bendixen H.J.** ;hygiene and sanitation requirements in danish biogas plants ; Chartier P. et al.(eds.): "biomass for energy and the environment". Proceedings of the 9th European Bioenergy Conference, Copenhagen, Denmark 24-27 june 1996, pp. 296-301.

(6)**Bendixen H.J.** ; Pathogens in biomass ; Proccedings of European Seminar on Collective Biogas Plants. European Experience in Combined Manure and Waste Processing. Athermie Action . DG XVII Herning, Denmark, 22-23 october 1992. P.93-107.

(7)**Bendixen H.J.** ; Safeguards against pathogens in danish biogas plants ; Wat. Sci. Tech. 1994; vol. 30 N°12,pp. 171-180.

(8)**Bendixen-hj ; Ammendrup-s** ; safeguards against pathogens in biogas plants. Pratical measures to prevent dissemination of pathogens and requirements for sanitisation ; Danish veterinary service DK-1958 Frederiksberg C Denmark1992 ; 47pp. .

(9)**Berg G.; Berman D** ; Destruction by anaerobic mesophilic and thermophilic digestion of viruses and indicator bacteria indigenous to domestic sludges ; 1980 ; Applied and Environmental microbiology, Vol 39,n° 2, p. 361-368.

(10)**Birbaum-c ; Eckert-j** ; Destruction of helminth eggs in treatment plants for sewage sludge ;1985 ; Schweizer archiv fur tierheilkunde :127:1,p .25-44.

(11)**Birkeland K.H.** ;Le biogaz en Norvège. Eden; colloque du 23 avril 1999, centre de l'UNESCO, Toulouse, France.

(12)**Bohm-r.** ; Effects of residues of anti-infective agents in animal excretions on slurry treatment and the soil ; DTW deutsche tierarztl. wochenschr. ;1996 ; 103(7) : p .264-268.

- (13)**Braum R.; Steffen R.** ; Situation de la digestion anaérobie en Autriche ; Eden; colloque du 23 avril 1999, centre de l'UNESCO, Toulouse, France.
- (14)**Brinkman J.** ; Development of a protocol for assessing and comparing the quality of aerobic composts and anaerobic digestates ; IEA, march 1997.p.30.
- (15)**Buchwalder-r ; Wollmer-gr** ; Studies on the effects on an anaerobic slurry preparation method on exogenous helminth stages (*Ascaris suum* eggs) ; Monathefte fur veterinarmedizin ;1989 ; 44 : 13, p.447-449.
- (16)**Bussieras J ; Chermette R.** ; Parasitologie vétérinaire : parasitologie générale ; Ed. Service de Parasitologie de l'Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort..
- (17)**Bussieras J ; Chermette R.** ; Parasitologie vétérinaire : Protozoologie ; Ed. Service de Parasitologie de l'Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort..
- (18)**Carpentier** ; Maitrise de la pollution de l'eau dans une grande agglomération Thèse vétérinaire ;1990.
- (19)**Carrington E.G.; Harman S.A.; Pike E.B.** ; Inactivation of Salmonella during anaerobic digestion of sewage sludge ; 1982 ; Journal of Applied Bacteriology; 53, p. 331-334.
- (20)**Carrington E.G. ; Pike E.B. ;Auty ; Morris** ;Destruction of faecal bacteria, enteroviruses and ova of parasites in waste water sludge by anaerobic mesophilic digestion wat.sci.tech. 1991 ; 24; no2 , p.377-380.
- (21)**Crainic R.; Nicolas J.C.** ; Virologie médicale ; éditions médicales internationales. 1993 ; 527pp.
- (22)**Demynck-m ; Nyns-ej ; Naveau-hp; Gasser-jkr** ; A review of anaerobic digestion on odour and on disease survival. Composting of agricultural and other wastes. Proceedings of seminar organised by commission of European Communities, Directorate general science, R and D, energy res. Prog., Brasenose college, Oxford, march 19-20 1985. P.257-269.
- (23)**Derbyshire J.B.; Monteith H.D.; Shannon E.E.** ; Virological studies on an anaerobic digestion system for liquid pig manure ; Agricultural Wastes ;1986 ; 18, p. 309-312.
- (24)**Doll-I ; Oechsner-h** ; Disinfecting liquid manure for application in water protection zones ; Landtechnik ; 1997 ; 52: 6, p.300-301.
- (25)**Duarte E.A.; Mendes B.; Oliveira J.S.** : Removal of salmonella, Streptococci and coliforms in pig breeding effluent by anaerobic mesophilic digestion ; 1992 ; Wat. Sci. Tech. ; Vol. 26, n°9-11, pp. 2169-2172.

- (26)**Dudley-dj ; Guentzel-mn ; Ibarra-mj ; Moore-be; Sagik-bp** ; Enumeration of potentially pathogenic bacteria from sewage sludges ; Applied and environmental microbiology ;1980 ; jan ; p.118-126.
- (27)**Eisenhardt A.; Lund E.; Nissen B.** ; The effect of sludge digestion on virus infectivity. ; 1977, Water Research ;Vol. 11, pp. 579-581.
- (28)**El Abagy ; El Zanfaly** ; Bacterial removal by anaerobic digestion Environment International ;1984 ;10: p.251-258.
- (29)**Fannin-kf ; Hsu-ph ; Mensinger-j; Cahill-c** ; Effective reduction of enteritic bacteria and viruses during the anaerobic digestion of biomass and wastes ; Energy from biomass and wastes VIII lake Buena Vista, Florida, USA, 30 january- 3 february 1984 ; p.833-851.
- (30)**Farrah-sr ;Bitton-g** ; Bacterial survival and association with sludge flocs during aerobic and anaerobic digestion of wastewater sludge under laboratory conditions ; Appl. Environ. Microbiol. ;1983 ; 45(1): p.174-81
- (31) **Fenner F. ; Bachman P.A. ; Gibbs E.P.J. ;Murphy F.A. ; Studdert M.J. ; White D.O.** ; Veterinary Virology ; Academic Press, 1987.
- (32)**Fields B.N.; Knipe D.N.; Howley P.M.** ; Virology Vol.1, Ed. Lippencott-Raven publishers. ; 3éme édition ; 1996.
- (33)**Fields B.N.; Knipe D.N.; Howley P.M.** ; Virology Vol.2, Ed. Lippencott-Raven publishers. ; 3éme édition ; 1996.
- (34)**Freney J.;Renaud F.; Hansen W. ; Bollet C.** ; Manuel de bactériologie clinique vol.1 ;ed.Elsevier ;1992.
- (35)**Freney J.;Renaud F.; Hansen W. ; Bollet C.** ; Manuel de bactériologie clinique vol.2 ;ed.Elsevier ;1992.
- (36)**Gadre R.V.; Ranade D.R.; Godbole S.H.** ;A note on survival of Salmonellas during anaerobic digestion of cattle dung. ; 1986 ; Journal of Applied Bacteriology, 60, p.93-96.
- (37)**Glausser m. ; Gogniat p. ; Aragno m.** ; Comportement des bacteries fecales durant la digestion anaerobie des boues d'épuration et des ordures ménagères. ;1985 ;Gas Wasser Abwasser. 65(1) ; p.24-27.
- (38)**Haslay C. ; Leclerc H.** ; Microbiologie des eaux d'alimentation. ; Edition Tec et Doc ;1993.
- (39) **Highman I.** ; Etat de la fermentation anaérobie des déchets agricoles aux Royaumes Unis ; Eden; colloque du 23 avril 1999, centre de l'UNESCO, Toulouse, France.

(40)**Hüffmeier H.** ; Fest und Flüssigmistanfall und Verwertung in der Bundesrepublik Deutschland. 1984 ; Dtsch. Tierärztl. Wschr. ; 91, p.232-233.

(41)**Juris p. ; Toth f. ; Laukova a. ; Plachy p.; Dubinsky p., Sokol j.** ; Survival of model bacterial strains and helminth eggs in the course of mesophilic anaerobic digestion of pig slurry ;Veterinari medicina ;1996 ; 41(5), p.149-153.

(42)**Kearney T.E.; Larkin M.J.; Frost J.P.;Levett P.N.** ;Survival of pathogenic bacteria during mesophilic anaerobic digestion of animal waste. ; 1993 ;Journal of Applied Bacteriology ;75; p.215-219 .

(43)**Kearney T.E.; Larkin M.J.; Levett P.N.** ; The effect of slurry storage and anaerobic digestion on survival of pathogenic bacteria. ;1993 ; Journal of Applied Bacteriology ; 74;p. 86-93.

(44)**Kerekrety-j ;Petrovicova-b ;Boda-k; ; Adamec-o; Blazej-a (ed.); Privarova-v** ;Anaerobic treatment of excrements from large-scale animal farms. ; Environmental biotechnology: proceedings of the international symposium on biotechnology, Bratislava, Czechoslovakia, june 27-29 ; 1990.p.277-286.

(45)**Klochkova-ls ; Radun-fl ; Grihaev-id** ; Microbiological evaluation of animal slurry fermented anaerobically with thermophilic bacteria ; Trudy, Vsesoyuznyi Nauchno issledovatel'skii institut veterinarnoi sanitarii ;1977 ;59 :p.39-43.

(46)**Köttner M.** ;Small scale farm digestors ; Deutsche Veterinärmedizinische Gesellschaft e.V.; Band II; IEA BIOENERGY WORKSHOP; Hygienic and environmental aspects of anaerobic digestion: Legislation and experiences in Europe; Stuttgart ; 29-31 march 1999 ; p 1-9.

(47)**La Farge (De) B.** ; Le Biogaz, procédés de fermentation méthanique. ; édition Masson ; 1995 ; 237pp. .

(48)**Lee-mr ;Sih-jch** ; Effect of anaerobic digestion on oocysts of the protozoan Eimeria tenella. 1988 ;Applied and environmental microbiology ; oct. ; p. 2235-2341.

(49)**Ling-b ; Den-tx ; Lu-zp; Min-lw; ;Wang-zx; Yuan-ax** ; Use of night soil in agriculture and fish farming. ; 1993 ;World health forum ; 14 ; 1, p.67-70.

(50)**Lund-b ; Bendixen-hj ; Have-p; Ahring-b** ; Reduction of pathogenic bacteria and viruses by anaerobic digestion ; Product quality, Marketing and end user demands ; p.281-286.

(51)**Lund-b ; Jensen-vf ; Have-p; Ahring-b** ; Inactivation of virus during anaerobic digestion of manure in laboratory scale biogas reactors. ; 1996 ;antonie van leeuwenhoek ; 69(1), p.25-31.

- (52)**Lund B.; Nissen B.** ; The survival of enteroviruses in aerated and unaerated cattle and pig slurry. ; 1983 ; *Agricultural Wastes* ; 7; p.221-233.
- (53)**Malphettes Y.**;Lisier: atout ou risque pour l'environnement. ; Thèse vétérinaire Toulouse ;1995.
- (54)**Marchaim-u ;Klinger-i ; Nielsen-vc(ed.); Voorburg-jh(ed.); L'hermite-p** ;1988 ; Ecological aspects of waste control in slaughterhouses. ; Volatile emissions from livestock farming and sewage operations. ;Proceedings of a workshop held at Uppsala, Sweden, 10-12 june, 1987 ; p.217-222.
- (55)**Marti O.G.; Booram C.V.; Hale O.M** ;. Survival of eggs and larvae of swine nematode parasites in aerobic and anaerobic waste treatment systems. ;1980 ; *J. Environ. Qual.*, Vol. 9, N° 3, pp 401-405.
- (56)**Mateu A.; Mata-Alvarez J.; Pares R.** ; Enterobacterial and viral decay experimental models for anaerobic digestion of piggery waste. ; 1992 ; *Appl. Microbiol. Biotechnol.* ; 38: p.291-296.
- (57)**McGarry-mg(ed.) Stainforth-j** ; Compost, fertilizer, and biogas production from human and farm wastes in the people's republic of china. ;1978 ; International development centre.; Ottawa; Canada. ;94pp.
- (58)**McKain-n Hobson-pn** ;A note on the destruction of porcine enteroviruses in anaerobic digestions. ; 1987 ;*Biological wastes* ; 22 ; p.147-155.
- (59)**Moen-ar ;Verstegen-mwa (ed.) ;Hartog-la-den (ed.); Kempen-gjm-van (ed.); Metz-jhm** ; Survival of animal pathogens in slurry Nitrogen flow in pig production and environmental consequences: proceedings of the first international symposium, Wageningen (Doorwerth), the Netherlands, ; 8-11 june 1993 ; p.410-412.
- (60)**Montcharmout A.** ;Les risques sanitaires liés à l'épandage de boues de stations d'épuration urbaines. ;Thèse vétérinaire de Lyon ;1999, 106pp.
- (61)**Monteih-hd ; Shannon-ee ;Derbyshire-jb** ; The inactivation of a bovine enterovirus and a bovine parvovirus in cattle manure by anaerobic digestion, heat treatment, gamma irradiation, ensilage and composting. ; 1986 ;*Journal of hygiene* ; 97,p.175-184.
- (62)**Olsen J.E.** ;On the reduction of Mycobacterium paratuberculosis in bovine slurry subjected to batch mesophilic or thermophilic anaerobic digestion. ;1985 ; *Agricultural Wastes* ;13, p.273-280.
- (63)**Olsen-je ; Egneus-h (ed.) ; Ellegard-a** ; The effect of mesophilic or thermophilic anaerobic digestion of slurry on the survival of pathogenic bacteria, indicator bacteria and intestinal parasites. *Bioenergy 84*. Proceedings of conference 15-21 june 1984, Goteborg, Sweden. Vol III. Biomass conversion. p.401-405.

(64)**Olsen J.E.; Larsen H.E.**; Bacterial decimation times in anaerobic digestions of animal slurries. ;1987 ;Biological Wastes ;21;3 ; p.153-168.

(65)**Olsen-je ;Nansen-p** ; Inactivation of some parasites by anaerobic digestion of cattle slurry. ;1987 ; Biological wastes ; 22, p.107-114.

(66)**OMS** ;L'utilisation des eaux usées en agriculture et en aquiculture: recommandations à visées sanitaires ;. Serie de rapport technique 778 ;1989.

(67)**Ouedraogo R.B.** ; Traitement des ordures ménagères au Sénégal ; Thèse vétérinaire Dakar ;1994.

(68)**Pike e.b.;Carrington e.g.;Harman s.a.** ; Destruction of salmonellas, enteroviruses and ova of parasites in wastewater sludge by pasteurisation and anaerobic digestion ;1988 ; water science technology ; 20(11/12) ; p.337-343.

(69)**Plym-Forshell-I ; Strauch-d** ; Survival of Salmonella bacteria and ascaris suum eggs in a thermophilic biogas plant. ;1983 ; Hygienic problems of animal manures ; Institut fur tiermedizin; Stuttgart; German Federal Republic ; p.217-222.

(70)**Quinn P.J.; Carter M.E. ; Markey B.; Carter G.R.** ;Clinical veterinary microbiology ;Ed. Wolfe ;1994. 648p.

(71)**Raviv-m ;Medina-s ;Chen-y; Inbar-y; Geler-z** ; Changes in the chemical and horticultural properties during composting of slurry produced by methanogenic fermentation of dairy cow manure. ;Compost: production, quality and use. Proceedings of a symposium organized by the commission of the european communities,directorate general science, research and development, Udine, Italy, 17-19 april 1986.p.377-382.

(72)**Ripert C.** ;Epidémiologie des maladies parasitaires: les protozoonoses ; tome 1 ;éditions médicales internationales ;1998. 393p.

(73)**Ripert C.** ;Epidémiologie des maladies parasitaires: les helminthoses ; tome 2 ;éditions médicales internationales ;1998. 562p.

(74)**Sarapatka B.** ; The effect of anaerobic farmyard manure treatment on the survival of some pathogenic organisms ;1994 ; rostlinna vyroba ;40(4),p.349-357.

(75)**Schlundt-j ;Munch-b** ; A comparison of efficiency of Rappaport-Vassiliadis, Tetrathionate and selenite broths with and without pre-enrichment for the isolation of Salmonella in animal waste biogas plants. ;1993 ;zentralblatt fur bakteriologie ;279 :3,p.336-343.

(76)**Singleton P.** ;Bacteriologie ; édition Masson ;1994. 247p.

- (77)**Sorlini C.; Allievi L.; Ranalli G.; Ferrari A.** ;A note on the removal of fecal bacteria in cattle slurry after different farm and laboratory treatments. ;1987 ; Biological Wastes ;22; p.39-47.
- (78)**Strauch D.** ; Survival of pathogenic microorganisms and parasites in excreta, manure and sewage sludge. ;Rev. Sci. Tech. Off. Int. Epiz. ;1991; 10(3),p.813-846.
- (79)**Strauch-d ; Winterhalder-k** ; Effect of disifectants, additives and antimicrobial drugs on anaerobic digestion. .1985 .Agricultural waste utilization and management. Proceeding of the 5th international symposium on agricultural wastes, 16-17 december 1985, Chicago, illinois, USA. p.516-522.
- (80)**Ward R.L.; Ashley C.S.** ;Inactivation of Poliovirus in digested sludge. ; Applied and environmental Microbiology, ;june 1976, p. 921-930.
- (81)**Watanabe h. ;Tomokazu k. ;Ochi s.; Ozaki m.** ; Inactivation of pathogenic bacteria under mesophilic and thermophilic conditions. ;1997 ; water science technology ;36 ;6-7 ; p.25-32.
- (82)**Wellinger A** ; Biogaz à partir de déchets ménagers, d'effluents industriels et de résidus agricoles. ; Eden; colloque du 23 avril 1999, centre de l'UNESCO, Toulouse, France. ; 23-avr-99.
- (83)**Whitmore-tn ;Robertson-lj** ;The effect of sewage treatment processes on oocysts of *Cryptosporidium parvum* ; 1995 ;J Appl Bacteriol78(1) ;p.34-8.
- (84) **Morozzi-g ;Sportolari-r ; Caldini-g; Cengi-g; Morosi-a** ; The effect of anaerobic and aerobic wastewater treatment on faecal coliforms and antibiotic-resistant faecal coliforms. 1988 ; Zentralbl Bakteriol Mikrobiol Hyg ; B185(4-5): p.340-9.
- (85) **Sanz-ji ;Rodriguez-n ;Amils-r** ;The action of antibiotics on the anaerobic digestion process ;1996 ; Appl Microbiol Biotechnol ;46(5-6): p.587-92.
- (86) **Poels-j ;Assche-p-van ; Vertraete-w; ; Van-assche-p** ; 1984 ; Effects of disinfectants and antibiotics on the anaerobic digestion of piggery waste. ; Agricultural wastes ; 9:4, p.239-247.
- (87)**Keller U.** ; Technology of sewage sludge hygienisation ;1983 ; Zentralbl Bakteriol mikrobiol Hyg B ;178(1-2):p.111-41.
- (88) **Larsen-eh ;Munch-b ;Schlundt-j** ;1994 ; Use of indicators for monitoring the reduction of pathogens in animal waste treated in biogas plants. ;Zentralblatt fuèr hygiene und umweltmedizin ;195:5-6, p.544-555.
- (89) **EPA** ; 1992 ; Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge (including domestic septage) under 40 CFR Part. 503. EPA/625/R-92/013.

(90) **EPA** ; 1977 ; Epuration interim primary water régulations. USEPA EPA.-570/9-76-003, Washington, D.C.

Toulouse,2001
NOM: MARACHE

PRENOM: LAURENT

TITRE: Méthanisation des effluents et déchets organiques: état des connaissances sur le devenir pathogène.

RESUME:

La méthanisation, lors du traitement des effluents organiques, réduit leur nuisance olfactive et leur charge organique tout en produisant un combustible propre et renouvelable et un amendement de bonne qualité. Le but de cette étude est de savoir si la méthanisation résout aussi le problème des germes pathogènes présent dans ces effluents organiques.

Une première partie présente le principe de la méthanisation et différents procédés existants. Une seconde rassemble différents agents pathogènes existants dans les effluents organiques suivant leur origine.

Une troisième partie expose les voies de dissémination des agents pathogènes et la notion de risque pour la santé humaine et animale.

Dans une quatrième partie est présentée une synthèse des connaissances sur les relations entre germes pathogènes et méthanisation.

En conclusion est effectué un bilan, d'après les connaissances existante, du devenir des germes pathogènes lors de la méthanisation, mais aussi une évaluation quantitative et qualitative de ces connaissances.

MOTS-CLES: METHANISATION-BIOGAZ-DECHET ORGANIQUE-EFFLUENT ORGANIQUE-BACTERIE-VIRUS-PARASITE.

ENGLISH TITLE: Methanisation of organic effluents and wastes: a review of knowledge of pathogenic development.

ABSTRACT:

During organic effluent treatment, reduces their olfactory pollution and their organic load, producing too clear and renewable combustible and good manure. The object of this study is to know if the methanisation resolves the problem of the pathogenic germs contained in organic effluents.

Our first party shows the principle of the methanisation and different existing processes.

Our second party looks over different pathogenic agents existing in organic effluents, following their origines.

Our third party exposes the ways of dissemination of the pathogenic agents and the notion of risks for the human and animal health..

Our fourth party exposes synthesis of the knowledges concerning the relations of between methanisation and pathogenic germs.

To conclude sheet , according to existing knowledge, of the pathogenic germs destiny during the methanisation and a quantitative and qualitative valuation of this kwnledge.

KEY WORDS: METHANISATION-BIOGAS-ORGANIC WASTE-ORGANIC EFFLUENT-BACTERIUM-VIRUS-PARASITE.