HAL
open science

DIGES 2 : Application pour le calcul du bilan des émissions de gaz à effet de serre des installations de digestion anaérobie, version 2.0. Guide méthodologique

Thierry Bioteau, P. Dabert

To cite this version:

Thierry Bioteau, P. Dabert. DIGES 2 : Application pour le calcul du bilan des émissions de gaz à effet de serre des installations de digestion anaérobie, version 2.0. Guide méthodologique. [Rapport Technique] irstea. 2009, pp.57. hal-02593780

HAL Id: hal-02593780

https://hal.inrae.fr/hal-02593780

Submitted on 15 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

DIgestion anaérobie et Gaz à Effet de Serre

Application pour le calcul du bilan des émissions de gaz à effet de serre des installations de digestion anaérobie

Version 2.0

Guide méthodologique

Version 2 : Thierry BIOTEAU, Patrick DABERT (Octobre 2009)

Version 1 : Armelle GAC, Fabrice BELINE, Thierry BIOTEAU (Février 2006)

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

RESUME

Le calculateur DIGES est un outil d'aide à la décision, destiné aux agents des délégations régionales de l'Ademe afin de les aider à mieux appréhender le bilan effet de serre des projets de digestion et de co-digestion anaérobie, existants ou émergeants dans leur région.
Les enjeux en terme d'effet de serre de ces projets sont liés d'une part au mode de traitement des substrats et d'autre part aux substitutions énergétiques.
Ainsi, pour évaluer le bilan « effet de serre » de ce type d'installation, on considère :

- les gaz à effet de serre (GES) émis par l'installation de Traitement par Digestion Anaérobie,
- les GES émis par les transports liés au fonctionnement de l'installation de digestion anaérobie (transport des substrats vers l'unité puis transport du digestat),
- les GES évités qui auraient été émis par une filière traditionnelle de traitement des substrats (traitement de référence),
- les GES évités qui auraient été émis par les transports dus au traitement de référence (transport vers l'unité de traitement de référence),
- les GES évités qui auraient été émis par une filière de production d'énergie de référence (substitution d'énergie),
- les GES évités liés à l'épandage du digestat (économie d'engrais minéral réalisée par le pouvoir fertilisant du digestat).

Le calculateur DIGES permet de calculer le bilan des émissions de GES pour des installations traitant de un à sept substrats en mélange. Il est possible de réaliser le calcul à partir de données par défaut, déterminées par rapport à des situations moyennes, ou à partir de données spécifiques aux installations, intégrées par l'utilisateur.
Le calculateur est accompagné d'un guide de l'utilisateur et d'un guide de l'administrateur qui indiquent comment utiliser et mettre à jour DIGES. Le guide méthodologique présente quant à lui la méthode de calcul du bilan « effet de serre » et précise les choix faits en matière de substrats à sélectionner, de composition et de facteurs d'émission.

Mots clé : digestion anaérobie ; co-digestion ; calculateur ; bilan des émissions de gaz à effet de serre ; traitement des substrats de référence ; production d'énergie de référence.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

SOMMAIRE

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS 3
PREALABLES 4

1. PRESENTATION GENERALE DU CALCULATEUR DIGES 7

1.1. LA VOCATION DE L'OUTIL 7
1.2. LES PRINCIPES DU CALCUL 7

2. LES SUBSTRATS ET LEURS CARACTERISTIQUES 8

2.1. METHODOLOGIE 8
2.1.1. Détermination de la liste de substrats *8*
2.1.2. Collecte des données et sélection *8*
2.2. LISTE ET COMPOSITION DES SUBSTRATS 8
2.3. PRESENTATION DES SUBSTRATS PAR CATEGORIE 12
2.3.1. Substrats agricoles *12*
2.3.2. Substrats d'industries agroalimentaires *13*
2.3.3. Substrats de collectivités *13*
2.3.4. Cultures énergétiques *14*

3. LA FILIERE DE DIGESTION ANAEROBIE 15

3.1. DESCRIPTION 15
3.1.1. Le traitement des substrats *16*
3.1.1.1. Les postes d'émissions 16
3.1.1.2. Le principe du calcul des émissions 18
3.1.2. La production d'énergie *18*
3.1.2.1. L'énergie primaire 19
3.1.2.2. La production d'énergie secondaire 20
3.1.2.3. L'utilisation de l'énergie valorisée 20
3.1.2.4. Récapitulatif du scénario « cogénération » pour la production d'énergie 22
3.1.2.5. Le principe du calcul des émissions 22
3.2. FACTEURS D'EMISSION CORRESPONDANTS 23

4. LES FILIERES DE TRAITEMENT DE REFERENCE 29

4.1. DESCRIPTION DES FILIERES PAR FAMILLE DE SUBSTRAT 29
4.1.1. Substrats agricoles *29*
4.1.2. Substrats des industries agroalimentaires *29*
4.1.2.1. La fabrication d'aliments 29
4.1.2.2. L'épandage agricole 30
4.1.2.3. Le stockage et l'épandage de boues de STEP industrielles 31
4.1.2.4. L'incinération 31
4.1.2.5. La mise en centre de stockage de substrats non dangereux (CSD) 32
4.1.3. Substrats des collectivités *33*
4.1.3.1. Biodéchets des ménages et substrats verts : La mise en centre de stockage de substrats non dangereux (CSD) 33

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

4.1.3.2. Le stockage et l'épandage des boues de STEP urbaines 34
4.1.3.3. Le traitement en STEP collective 34
4.2. FACTEURS D'EMISSION CORRESPONDANTS 36

5. LES FILIERES DE PRODUCTION D'ENERGIE DE REFERENCE 41

5.1. ENERGIE THERMIQUE 41
5.1.1. Principes de calcul des émissions gazeuses 41
5.1.2. Facteurs d'émission correspondants 42
5.2. ENERGIE ELECTRIQUE 42
5.2.1. Principes de calcul des émissions gazeuses 42
5.2.2. Facteur d'émission correspondant 42

6. UN CALCUL EN PLUSIEURS ETAPES 43

6.1. LE PRINCIPE DU CALCUL PAR BILAN 43
6.2. LES DONNEES COMPLEMENTAIRES NECESSAIRES AU CALCUL 43
6.3. LES ETAPES DU CALCUL 44
6.3.1. Quantités de gaz à effet de serre émises par la filière de traitement par digestion anaérobie 44
6.3.2. Quantités de gaz à effet de serre émis liés au transport des substrats et des digestats 45
6.3.3. Quantités de gaz à effet de serre évitées relatives à la filière de traitement de référence 46
6.3.4. Quantités de gaz à effet de serre évitées relatives au transport des substrats de la filière de référence 46
6.3.5. Quantités de gaz à effet de serre évitées relatives à la filière de production d'énergie de référence 47
6.3.6. GES évités par le pouvoir fertilisant du digestat 49
6.3.7. Le bilan effet de serre d'un projet de digestion anaérobie 51

7. ELEMENTS DE DISCUSSION 51

ANNEXES 41

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
Cemagref : Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement
CH_4 : méthane
CO_2 : dioxyde de carbone
CSD : Centre de Stockage des Substrats
éq. CO_2 : équivalent CO_2
g : gramme
GES : gaz à effet de serre
GPL : Gaz de Pétrole Liquéfié
IAA : Industries AgroAlimentaires
IFIP : Institut de la FIlière Porcine
ITAVI : Institut Technique de l'AVIculture
kg : kilogramme
kWh : kilowattheure
m^3 : mètre cube
MO : Matière Organique
MO_biod/MO : Taux de Matière Organique biodégradable
MS : Matière Sèche
MWh : mégawattheure
N : Azote
N_2O : protoxyde d'azote
p.d.t. : pomme de terre
PNR : Parc Naturel Régional
Pot. Méth. : potentiel méthanogène
STEP : station d'épuration
t : tonne
TRH : temps de rétention hydrolique (= temps de séjour des boues dans le digesteur)
VS : Volatil Solids (matière organique)
Σ_x : somme sur x

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

PREALABLES

Ce document est le guide méthodologique de la version 2.0 du calculateur DIGES.
Cette version de l'application est également accompagnée du guide de l'utilisateur et du guide de l'administrateur correspondants, qui indiquent comment utiliser et mettre à jour DIGES.
Le guide méthodologique présente quant à lui la méthode de calcul du bilan « effet de serre » pour une installation de digestion anaérobie. Il précise les choix faits en matière de substrats à sélectionner, de composition et de facteurs d'émission.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

1. Présentation générale du calculateur DIGES

1.1. La vocation de l'outil

Le calculateur DIGES est un outil d'aide à la décision, destiné aux agents des délégations régionales de l'Ademe afin de les aider à mieux appréhender le bilan effet de serre des projets de digestion anaérobie existants ou émergeants dans leur région.
Il est adapté pour les installations de digestion et co-digestion anaérobie, agricoles ou non.
Sa vocation peut être qualifiée de pédagogique et la méthode de calcul est basée sur la comparaison de situations globales, sans prise en compte des particularités locales. En aucun cas ce calculateur ne saurait donc fournir une quantification exacte des émissions de gaz à effet de serre pour une installation donnée. Son objectif est d'apporter des éléments de réflexion sur le bien fondé d'un traitement d'un ou plusieurs substrats par digestion anaérobie par rapport à un scénario de référence conventionnel.
La finalité première de l'outil est de calculer le bilan effet de serre d'un projet à partir de données fournies par l'utilisateur. Cependant lorsque l'utilisateur a peu d'informations sur un projet donné, ce calculateur peut également fournir un bilan de gaz à effet de serre indicatif à partir de scénarios simulés par défaut.

1.2. Les principes du calcul

Cet outil permet de quantifier le bilan effet de serre des installations de traitement de substrats par digestion anaérobie au regard des gaz à effets de serre (GES) évités (N_2O, CH_4 et CO_2[1]).

Les enjeux en terme d'effet de serre de ces projets sont liés d'une part au mode de traitement des substrats et d'autre part aux substitutions énergétiques.
Ainsi, pour évaluer le bilan « effet de serre » d'une installation de digestion anaérobie, à partir d'un ou plusieurs substrats, on considère :

- les gaz à effet de serre (GES) émis par l'installation de Traitement par Digestion Anaérobie,
- les GES émis par les transports liés à l'approvisionnement en substrats de l'installation de digestion anaérobie (transport des substrats vers l'unité puis transport du digestat),
- les GES évités qui auraient été émis par une filière traditionnelle de traitement des substrats (traitement de référence),
- les GES évités qui auraient été émis par les transports dus au traitement de référence (transport vers l'unité de traitement de référence),
- les GES évités qui auraient été émis par une filière de production d'énergie de référence (substitution d'énergie),
- les GES évités liés à l'épandage du digestat (économie d'engrais minéral réalisée par le pouvoir fertilisant du digestat).

Cela suppose de

- définir la filière digestion anaérobie, avec
  - les différents postes d'émissions et les facteurs d'émission associés ;
  - la production d'énergie, qui dépend des substrats traités, et son utilisation
- définir une filière de traitement de référence, avec
  - pour chaque substrat, les postes d'émissions et les facteurs d'émission associés
- définir une filière de production d'énergie de référence, avec
  - les mêmes quantités d'énergie électrique et thermique que celles produites par l'installation de digestion anaérobie,

[1] Les émissions de gaz sous forme CO_2 liées aux substrats organiques ne sont pas considérées comme des émissions de GES car elles s'inscrivent dans un cycle court, contrairement aux émissions de CO_2 liées à l'utilisation d'énergie fossile (déstockage)

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

- la façon dont cette énergie aurait été produite en l'absence de l'installation et les émissions de gaz à effet de serre associées

Les scénarios de références ont été choisis de manière conventionnelle et ne prennent pas en compte les particularités locales. On se base sur des scénarios qui auraient pu se passer dans une situation antérieure et non sur des scénarios alternatifs (comme le compostage).
Après une présentation des substrats qui peuvent être utilisés dans le calculateur DIGES, les sections 3, 4 et 5 présentent les trois filières définies ci-dessus.
Le détail du calcul par bilan est ensuite exposé dans la section 6.

2. Les substrats et leurs caractéristiques

2.1. Méthodologie

2.1.1. Détermination de la liste de substrats

La liste regroupe un panel de substrats qui se rencontrent couramment en digestion et co-digestion anaérobie. Elle a été déterminée conjointement par l'Ademe et le Cemagref.

2.1.2. Collecte des données et sélection

Les données de composition ont été collectées dans différentes sources (fonds documentaire, publications, avis d'experts). Pour chaque paramètre de composition, ces données ont été converties dans une unité commune pour pouvoir être comparées.
L'annexe 1 présente dans le détail les données recueillies ainsi que leurs sources respectives.

Le choix des données à utiliser parmi cet ensemble a été fait dans la plupart des cas en calculant une moyenne, pondérée par le nombre de valeurs disponibles.
Cependant, lorsque des sources se recoupaient (l'une reprenant les données d'une autre), les données issues de la source d'origine ont été utilisées. C'est le cas des sources dénommées « doc (1) »[2] et « PNR »[3], pour lequelles les données issues de la source « PNR » ont été utilisées.
D'autre part, certaines valeurs, spécifiques d'un substrat ou fournies par un expert ont parfois été privilégiées par rapport aux autres données disponibles. Le détail des choix est abordé par substrat, dans le point 2.3.

2.2. Liste et composition des substrats

Cette 2ème version du calculateur DIGES propose une liste de **78** substrats issus de recherches bibliographiques provenant du Cemagref et de l'Ademe. En complément, les données de l'outil « Methasim » en cours de développement par l'IFIP ont été ajoutées ce qui porte à **323** le nombre de substrats possibles**.** Ces substrats peuvent être combinés entre eux, dans la limite de 7 substrats différents par simulation. Il s'agit de substrats agricoles, de l'industrie agro-alimentaire (IAA) et des collectivités.
Le tableau 1 présente la liste de ces substrats ainsi que leurs caractéristiques de composition pour les données Cemagref-Ademe uniquement. En effet, pour des questions de propriété des données, les données de Méthasim ont été communiquées à l'Ademe et au

[2] doc (1) : Document ADEME/Christine Schubetzer - Potentiel méthanogène de différents substrats - Sources : Bureau d'études IRCO Sprl, Fachverband Biogas, ADAESO, PNR Lorraine / INPL
[3] PNR : Viard N, Drexhage M. Production indicative en biogaz et en méthane. PNR de Lorraine et TRAME, 2004 (base de données)

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Cemagref pour un usage interne. Ces substrats ne sont donc pas présents dans la version en téléchargement libre.

Ces données de composition correspondent à des substrats moyens, et l'utilisateur de DIGES a la possibilité de modifier les données des substrats qu'il inclut dans une simulation pour mieux rendre compte des particularités du projet qu'il souhaite évaluer.
Les données de composition sont des **composantes du calcul** des émissions gazeuses, elles peuvent servir à **convertir** des données acquises par l'utilisateur dans l'unité adéquate et permettent également de **définir le substrat.**

Substrat	% MS	N (kg / t MB)	% MO/MS	% MO/MB	Pot méth (m^3 CH_4/t MO)	Pot méth2 (m^3 CH_4/t MB)	MO_biod/MO (%)
fumier bovin	18,5	5,0	76,4	14,1	192,0	27,1	37,4%
fumier porcin	23,1	7,5	82,2	19,0	220,0	41,8	42,9%
lisier bovin	7,6	2,7	72,6	5,5	212,6	11,7	41,5%
lisier porcin	4,7	5,3	72,5	3,4	281,3	9,5	54,9%
fientes volaille	20,4	15,0	72,6	14,8	286,0	42,3	55,8%
fumier de volailles	64,2	25,9	68,3	43,8	210,0	92,1	41,0%
co-produits de l'industrie de la pomme de terre	20,7	5,9	84,5	17,5	350,0	61,2	68,3%
graisses d'abattoir	25,2	17,9	93,0	23,4	696,0	162,9	100,0%
Lactosérum	5,4	0,8	90,5	4,9	607,0	29,7	100,0%
boues de STEP (IAA)	9,5	1,2	73,0	6,9	210,0	14,6	41,0%
biodéchets ménagers	36,7	6,6	82,2	30,2	331,5	100,0	64,6%
boues de STEP (collectivités)	5,0	3,0	67,0	3,4	260,0	8,7	50,7%
graisses de STEP	40,9	4,3	78,6	32,1	803,3	258,2	100,0%
huiles et graisses de restauration	46,1	4,3	77,0	35,5	710,0	251,8	100,0%
drêches de brasserie	27,9	19,0	83,6	23,3	375,0	87,5	73,1%
fruits et légumes	14,8	5,3	78,4	11,6	320,0	37,1	62,4%
co-produits viticoles et vinicoles	57,0	23,9	64,5	36,8	430,0	158,1	83,9%
déchets verts	48,4	20,4	87,4	42,3	177,3	75,0	34,6%
Lisier canard	3,1	2,2	81,2	2,5	400,0	10,1	78,0%
fumier ovin	28,8	10,1	79,3	22,8	248,8	56,8	48,5%
Fumier équin	28,0	5,9	70,8	19,8	323,2	64,0	63,0%
Fumier ovin-caprin	60,0	8,1	78,0	46,8	269,6	126,2	52,6%
Lisier volaille	18,1	7,5	76,1	13,8	300,0	41,3	58,5%
Amidon pulpe	13,0	1,0	90,0	11,7	409,5	47,9	79,9%
Betterave fanes	16,2	3,1	77,9	12,6	353,5	44,6	68,9%
Betterave fourragère	15,5	4,1	88,0	13,7	366,2	50,1	71,4%
Betterave sucrière	20,1	4,4	94,3	19,0	395,1	74,9	77,0%
Blé	69,0	16,7	96,3	66,4	198,0	131,5	38,6%
Blé grain	86,6	19,5	98,0	84,9	367,1	311,5	71,6%
Boues de flotation	19,3	5,9	91,8	17,7	696,0	123,5	100,0%
Boues de STEP	8,0	2,3	79,2	6,3	450,4	28,5	87,8%
Brasserie déchets	20,3	9,2	84,9	17,3	372,5	64,3	72,6%
Céréales poussières	89,0	9,7	84,0	74,8	171,5	128,2	33,4%
Colza tourteau	88,8	47,2	88,8	78,8	453,5	357,4	88,4%
Contenu de panse	14,8	2,6	84,8	12,5	255,0	32,0	49,7%
Contenu de panse pressé	32,5	4,9	90,0	29,3	650,0	190,1	100,0%
Déchets de cuisine	18,1	5,3	89,0	16,1	397,1	64,1	77,4%
Déchets de légumes	13,9	5,6	80,7	11,2	385,8	43,3	75,2%
Déchets de sortie de silo	88,8	9,8	96,7	85,9	370,0	317,7	72,2%

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Déchets des marchés	**15,8**	**6,3**	**85,0**	**13,4**	**331,3**	**44,3**	**64,6%**
Déchets verts humides	**25,9**	**8,1**	**82,5**	**21,3**	**196,0**	**41,8**	**38,2%**
ensilage herbe	**36,2**	**15,0**	**83,7**	**30,3**	**350,1**	**106,0**	**68,3%**
ensilage maïs	**31,0**	**4,7**	**93,3**	**29,0**	**341,3**	**98,8**	**66,6%**
Estomac/intestin contenu	**14,2**	**3,5**	**82,7**	**11,8**	**239,4**	**28,1**	**46,7%**
Farine animale	**16,5**	**16,5**	**90,0**	**14,9**	**650,0**	**96,5**	**100,0%**
Feuillage	**85,0**	**8,5**	**82,0**	**69,7**	**400,0**	**278,8**	**78,0%**
Fines et spathes	**91,0**	**7,4**	**91,6**	**83,4**	**190,0**	**158,4**	**37,1%**
Foin	**86,7**	**19,7**	**85,2**	**73,8**	**270,0**	**199,3**	**52,7%**
Graisses	**53,0**	**11,1**	**96,0**	**50,9**	**398,0**	**202,5**	**77,6%**
Gruau de colza	**82,0**	**65,6**	**93,0**	**76,3**	**500,0**	**381,3**	**97,5%**
Herbe de fauche sur jachère	**15,0**	**3,2**	**84,0**	**12,6**	**309,5**	**39,0**	**60,4%**
Herbe fraîche	**25,4**	**8,4**	**89,9**	**22,8**	**309,8**	**70,6**	**60,4%**
Jachères	**50,0**	**10,5**	**75,0**	**37,5**	**294,0**	**110,3**	**57,3%**
Luzerne	**25,4**	**9,6**	**89,9**	**22,8**	**373,4**	**85,2**	**72,8%**
Maïs	**23,5**	**4,5**	**96,0**	**22,6**	**340,0**	**76,8**	**66,3%**
Maïs résidus	**33,0**	**4,1**	**72,0**	**23,8**	**650,0**	**154,4**	**100,0%**
Marc de fruit	**45,0**	**5,0**	**94,7**	**42,6**	**385,0**	**164,0**	**75,1%**
Mélasse	**81,0**	**12,2**	**93,8**	**75,9**	**308,7**	**234,4**	**60,2%**
Melon jus	**3,0**	**0,6**	**75,0**	**2,3**	**196,0**	**4,4**	**38,2%**
Orge	**28,7**	**7,7**	**93,2**	**26,7**	**452,0**	**120,9**	**88,1%**
Paille	**86,5**	**6,1**	**83,5**	**72,2**	**201,2**	**145,3**	**39,2%**
Paille de céréales	**86,5**	**4,3**	**83,4**	**72,1**	**376,0**	**271,1**	**73,3%**
Paille de mais	**86,4**	**10,4**	**74,5**	**64,3**	**629,0**	**404,6**	**100,0%**
Pain vieux	**65,0**	**59,8**	**97,0**	**63,1**	**725,0**	**457,1**	**100,0%**
Pelouse	**30,0**	**6,0**	**80,5**	**24,1**	**512,5**	**123,5**	**99,9%**
Petit lait	**5,6**	**0,5**	**88,3**	**4,9**	**554,4**	**27,3**	**100,0%**
Pomme de terre fanes	**25,0**	**4,4**	**79,0**	**19,8**	**550,0**	**108,7**	**100,0%**
Pomme de terre pulpe	**16,3**	**2,0**	**92,5**	**15,1**	**310,2**	**46,7**	**60,5%**
Poussière silos	**46,0**	**9,7**	**75,0**	**34,5**	**308,0**	**106,3**	**60,1%**
Rafles d'automne	**77,5**	**4,5**	**97,3**	**75,4**	**240,0**	**181,0**	**46,8%**
Rafles de printemps	**88,4**	**9,0**	**93,5**	**82,6**	**220,0**	**181,7**	**42,9%**
Raisin marc distillé	**20,0**	**3,8**	**75,0**	**15,0**	**270,0**	**40,5**	**52,7%**
Résidus de distillation de céréales	**6,2**	**3,4**	**91,4**	**5,7**	**482,9**	**27,5**	**94,2%**
Résidus de distillation de pomme de terre	**9,6**	**7,0**	**88,8**	**8,5**	**381,1**	**32,3**	**74,3%**
Seigle	**35,0**	**14,0**	**94,0**	**32,9**	**346,9**	**114,1**	**67,6%**
Semences déclassées	**87,5**	**21,4**	**97,6**	**85,4**	**320,0**	**273,3**	**62,4%**
séparateur de graisse (Fettabscheider)	**43,1**	**6,6**	**88,8**	**38,3**	**619,0**	**237,1**	**100,0%**

Tableau 1 : Liste des substrats et caractéristiques

La **matière sèche** (MS) des substrats est exprimée en pourcentage de la matière brute (%MB). Cette donnée permet de définir le substrat (par exemple, le taux de matière sèche des boues de STEP urbaines permet d'indiquer qu'il s'agit ici de boues liquides - cf. 2.3.3.).

Le **contenu azoté** est exprimé en kilogramme d'azote par tonne de matière brute (kgN/tMB). Cette donnée intervient dans le calcul des émissions de protoxyde d'azote (voir ci-après).

Les teneurs en **matière organique** sont couramment exprimées par rapport à la matière sèche (%MS). On l'exprime également ici par rapport à la matière brute (MO en %MB), ce

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

qui permet d'exprimer le potentiel méthanogène à la fois par rapport à la matière organique et par rapport à la matière brute.

En effet, la production de méthane au cours de la fermentation d'un substrat dépend de sa teneur en matière organique. Dans le domaine scientifique, le **potentiel méthanogène**[4] est donc couramment exprimé en mètre cube de méthane par tonne de matière organique (m^3CH_4 /tMO). Toutefois, pour une meilleure lisibilité des données par l'ensemble des utilisateurs de DIGES, il est également exprimé en mètre cube de méthane par tonne de matière brute (m^3CH_4/tMB), unité plus couramment utilisée dans le domaine technique. C'est cette valeur qui est utilisée dans le calcul des émissions de méthane (cf. ci-dessous).

Le calcul des émissions de méthane et de protoxyde d'azote pour élaborer le bilan effet de serre, est réalisé de la même manière pour tous les substrats, dans les filières de digestion anaérobie et/ou de référence. Ces calculs sont effectués de la manière suivante (voir les calculs détaillés en 6.3. et facteurs d'émission (FE) en 3.2. et 4.2.) :

N_2O (t éq.CO_2) = tonnage (MB) x **N (kg/tMB)** x FE (%N) x facteurs de conversion

CH_4 (t éq.CO_2) = tonnage (MB) x **Potentiel Méthanogène (m^3CH_4 / tMB)**
x FE (% Pot. Méth.) x facteurs de conversion

Le paramètre **MO_biod/MO** est une estimation de la matière organique biodégradable du substrat. Il est utilisé pour le calcul des GES évités par le pouvoir fertilisant du digestat (§ 6.3.6) et dans le calcul du transport du digestat (§ 6.3.2).

Le calcul de ce paramètre est dérivé du potentiel méthanogène par un calcul qui implique les masses molaires des composés CO_2 et CH_4.
Pour plus de détail :
On fait l'hypothèse que la matière organique carbonée biodégradée au cours de la digestion anaérobie se trouve exclusivement sous forme CO_2 et CH_4. On peut estimer la masse que représente cette matière rapportée à la quantité de matière organique initiale ce qui nous permettra d'estimer la biodégradabilité potentielle maximale d'un substrat donné.
La conversion en masse s'effectue dans les Conditions Normales de Pression et Température (CNPT).(volume molaire de 22,4L.mol^{-1} dans les CNPT)
Si on prend l'exemple d'un potentiel méthanogène(B0) de 300L/kg de MO.
B0 = 300 L/kg de MO
Masse de C-CH_4 = (300 / 22,4L.mol^{-1}) * 12 g.mol^{-1} = 161g de C-CH_4/ kg de MO
Masse de H-CH_4 = (300 / 22,4L.mol^{-1}) * 4*1 g.mol^{-1} = 54g de H-CH_4/ kg de MO

Par ailleurs, on suppose une teneur en méthane et en CO_2 dans le biogaz constante respectivement de 60% et de 40%. On en déduit donc que le volume de CO_2 représente les 2/3 du volume de méthane. En effet :
VCO_2 = 40%(VCO_2 + VCH_4) soit : VCO_2 = 2/3 VCH_4)

Donc :
Masse de C-CO_2 = (300 / 22,4L.mol^{-1}) * 12 g.mol l^{-1} * 2/3 = 107g de C-CO_2/ kg de MO
Masse de O-CO_2 = (300 / 22,4L.mol^{-1}) * 2*16 g.mol l^{-1} * 2/3 = 286g de O-CO_2/ kg de MO

On obtient un total de 608 g de MO dégradée sous forme de biogaz par kg de MO initiale soit environ 61% de MO potentiellement biodégradable dans les conditions optimales d'obtention du potentiel méthanogène.

[4] Cette donnée traduit le maximum de méthane qu'un substrat peut produire en anaérobiose, en conditions optimales de température et de pression, sans limitation de durée

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

MO_biod/MO étant dérivé du B0, il s'agit d'une dégradation maximale qu'il s'agit de moduler par un facteur de conversion prenant en compte les émissions réelles par rapport aux émissions potentielles.
Afin de se placer dans les conditions réelles d'une installation de méthanisation, nous utilisons le même coefficient de modulation du potentiel méthanogène (78%) décrit pour le calcul de la quantité de méthane produite pendant la digestion anaérobie (§ 3.2).

Le calcul de ce paramètre MO_biod/MO dérivé du potentiel méthanogène peut donc s'écrire :

MO_biod/MO en %:
= [(B0 * 12/22,4) + (2/3 * B0 * 12/22,4) + (B0 * 4/22,4) + (B0 * 32 /22,4)] /1000 * 78%

Avec :
- B0 : potentiel méthanogène
- 78% : pourcentage de dégradation de la matière organique en conditions réelles

En faisant l'hypothèse que la minéralisation de l'azote suit la même dynamique que la dégradation du carbone (R. Moletta, La Méthanisation), ce facteur nous sera utile pour l'estimation de la minéralisation de l'azote liée à la digestion anaérobie (§ 6.3.6). De même, ce facteur sera utilisé pour estimer la perte de matière pour le calcul du transport du digestat aux parcelles d'épandage (§ 6.3.2).

2.3. Présentation des substrats par catégorie

La description des substrats dans les paragraphes suivants correspond à la première version de DIGES. Les autres substrats correspondent à des substrats supplémentaires fournis par l'Ademe afin de compléter le nombre de substrats de la version 1. On détaillera le cas particulier des cultures énergétiques par rapport à la version 1.
Si vous disposez de la version de DIGES qui contient des substrats commençant par « Methasim », ils sont issus du logiciel Methasim créés par l'IFIP.

2.3.1. Substrats agricoles

Les valeurs de composition des **fumiers et lisiers**, correspondent aux situations d'élevage les plus courantes. Ces données moyennes ne s'appliquent donc pas forcement aux déjections issues de modes d'élevage spécifiques (ex : lisier de veau, fumier de poulets issu d'élevages biologiques, etc.).

Les **fientes de volailles** correspondent à des fientes humides, ce scénario étant le plus probable. En effet, les autres types de fientes sont les fientes sèches et les fientes pré-séchées qui ont subit un traitement de séchage dans le bâtiment d'élevage ou dans le bâtiment de stockage, en vue d'être exportées de l'exploitation pour valorisation sous forme d'amendement organique. La digestion anaérobie de ces deux types de fientes n'est donc pas envisagée.

Ces données de composition ont été déterminées en calculant la moyenne pondérée des données recueillies parmi différentes sources et présentées en annexe 1.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

2.3.2. Substrats d'industries agroalimentaires

Les résidus de végétaux issus d'industries de transformation peuvent être méthanisés. Les installations de digestion anaérobie se rencontrent couramment dans l'industrie de la pomme de terre. Les **co-produits de l'industrie de la pomme de terre** ont donc été retenus dans la liste. Les données de composition pour ce substrat correspondent aux fanes et aux pulpes. Elles sont issues de la base de données constituée au PNR de Lorraine[5].

Les **fruits et légumes** intégrés ici concernent à la fois les substrats de triage et de parage des chaînes de transformation ou conditionnement et les substrats de marchés alimentaires (invendus). Les données sont issues de la base de données du PNR de Lorraine.

Les **drèches de brasserie** constituent le principal co-produit de la production de bière. Il s'agit des enveloppes des grains d'orge. La composition provient de la base de données du PNR de Lorraine.

Les **co-produits viticoles et vinicoles** sont des substrats issus de la viticulture et de la vinification. Il s'agit de marcs de raisin, lies, vinasses, condensats, substrats de distillation et de fermentation vinicole, etc. Les paramètres de composition du tableau 1 ont été établis à partir de valeurs concernant des vinasses, du mou de raisin et des résidus de distillation (PNR de Lorraine). La pratique de la méthanisation est courante dans ce secteur d'activité.

Les graisses présentent un intérêt non négligeable en co-digestion anaérobie en raison de leur potentiel méthanogène élevé. D'autre part, des installations de digestion anaérobie existent dans l'industrie des viandes. Les **graisses d'abattoir** ont donc été intégrées à la liste. Leurs données de composition proviennent de la base du PNR de Lorraine.

Le **lactosérum** est un sous produit de la fabrication de fromages. Le potentiel méthanogène est élevé ce qui le rend intéressant en mélange avec d'autres substrats. On le retrouve dans des cas de co-digestion anaérobie agricole. Les données de composition proviennent de la base de données du PNR de Lorraine.

Il a semblé également intéressant d'inclure les **boues de stations d'épuration industrielles** dans l'approche. Peu de données sont disponibles sur ce type de substrat. Les paramètres de composition ont été déterminés à partir d'une étude réalisée pour l'ADEME, en partie par le Cemagref[6].

2.3.3. Substrats de collectivités

Au niveau national, nombreuses sont les installations de méthanisation qui pratiquent la digestion anaérobie de substrats ménagers. Par ailleurs, la méthanisation des **biodéchets ménagers** est en nombre d'installations la plus répandue en Europe du nord.
Les biodéchets ménagers composent la partie biodégradable des ordures ménagères. Selon les définitions, ils comportent des putrescibles seuls (substrats alimentaires et de jardin) ou des putrescibles additionnés de papiers et de cartons. Les valeurs proposées ici pour les biodéchets correspondent uniquement aux substrats putrescibles.
Les données de composition MS, N, et MO sont issues de la publication ADEME « La composition des ordures ménagères en France ». L'annexe 1 présente d'autres valeurs, correspondant à des substrats comportant des proportions variables en papiers et cartons.
Le potentiel méthanogène varie en fonction de la nature des biodéchets (données bibliographiques : 50 à 130 m^3CH_4/tMB). Il est retenu un potentiel méthanogène de 100m^3CH_4/ tMB, couramment utilisé par les acteurs du secteur.

Les **déchets verts** sont issus de l'entretien des espaces verts et des jardins. Ils se composent de tontes de pelouse, de feuilles mortes, de taille de haies, etc. en dépit d'un

[5]Viard N, Drexhage M. Production indicative en biogaz et en méthane. PNR Lorraine, TRAME, 2004
[6] Cemagref / INRA / CReeD / Anjou Recherche / Ecobilan / Orval - Impacts environnementaux de la gestion biologique des substrats Bilan des connaissances - ADEME. 2005

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

potentiel méthanogène faible, ils permettent d'obtenir un digestat de qualité satisfaisante pour une valorisation agronomique. Les données de matière sèche, azote et matière organique proviennent de la base de données du PNR de Lorraine. Le potentiel méthanogène a été déterminé à dire d'expert[7].

La digestion anaérobie des **boues urbaines** existe sur plusieurs unités en France. Les boues méthanisées sont des boues primaires seules ou des boues mixtes. La situation la plus courante est la digestion anaérobie de boues liquides issues d'un traitement aérobie. Les données de composition retenues dans tableau 1 concernent ces boues liquides. Ce sont celles du Comité National Boues, validées par des experts du Cemagref. L'annexe 1 présente également d'autres valeurs, concernant tous types de boues avec des compositions très variables.

En complément des boues de station d'épuration, on inclut dans l'approche les **graisses de flottation des STEP**. Ces graisses sont issues des pré-traitements réalisés en tête de station (dessablage - dégraissage). Elles ont trois origines : les effluents urbains, les graisses des industries, les huiles et graisses de restauration (lorsque ces deux substrats ne sont pas récupérés ou traités à la source, ils rejoignent le réseau collectif). Les données de compositions sont des moyennes de valeurs issues de la base de données du PNR de Lorraine et d'un rapport de Mémoire du Cemagref[8] ; sauf pour la teneur azotée, car étant donné l'écart entre les deux valeurs disponibles, celle provenant du Cemagref a été conservée.

Les **huiles et graisses alimentaires usagées** sont des huiles en provenance de la **restauration commerciale et collective**, mais incluses ici en raison de leur traitement en STEP urbaine (cf. 4.2). Tout comme l'ensemble des graisses, leur potentiel méthanogène est élevé, ce qui justifie leur utilisation en digestion anaérobie. Cette valeur est une moyenne de celles rencontrées dans la base de données du Parc Naturel Régional de Lorraine. Les données utilisées pour déterminer le taux de matière sèche et de matière organique sont également issues d'un document de travail interne de l'ADEME[9]. En l'absence actuelle de données sur la teneur azotée, celle déterminée pour les graisses de STEP a été utilisée.

2.3.4. Cultures énergétiques

Les **cultures énergétiques** ont été ajoutées dans cette 2ème version du logiciel DIGES. Les cultures identifiées sont : le maïs ensilage, l'ensilage d'herbe, le foin, la luzerne, le blé, le seigle et l'orge. Les substrats « Methasim » présentent une liste plus complète.

Ces substrats présentent un potentiel méthanogène intéressant pour la digestion anaérobie et sont couramment utilisés dans les unités de méthanisation installées en Allemagne.

On notera que dans le cas des cultures énergétiques, contrairement aux substrats présentés ci-dessus, il ne s'agit pas ici d'un déchet ou d'un sous-produit qu'il convient de traiter. Ce substrat est cultivé spécifiquement pour optimiser le rendement de l'installation de digestion anaérobie.

[7] ADEME (S. Wenisch)
[8] Royer Cécile. Traitement biologique aérobie des graisses. Mémoire. Cemagref. 1998. Confidentiel
[9] Document ADEME/Christine Schubetzer - Potentiel méthanogène de différents substrats – Sources : Bureau d'études IRCO Sprl, Fachverband Biogas, ADAESO, PNR Lorraine / INPL

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

3. La filière de digestion anaérobie

3.1. Description

La filière fait référence par défaut à une digestion anaérobie en phase **liquide** (substrats liquides ou fluides), **mésophile** (35-37°C) avec un temps de rétention hydraulique de **30 jours**.
Il peut exister d'autres modes de digestion anaérobie en fonction de la température (thermophile, …), du nombre de phases (1 ou 2 phases), etc. Les différences entre ces modes de digestion ne sont pas prises en compte dans la simulation.

Quel que soit le substrat, la description de la filière de digestion anaérobie est la même.
Elle comporte deux grands thèmes, détaillés ci-après : le traitement des substrats et la production d'énergie (cf. Schéma1).

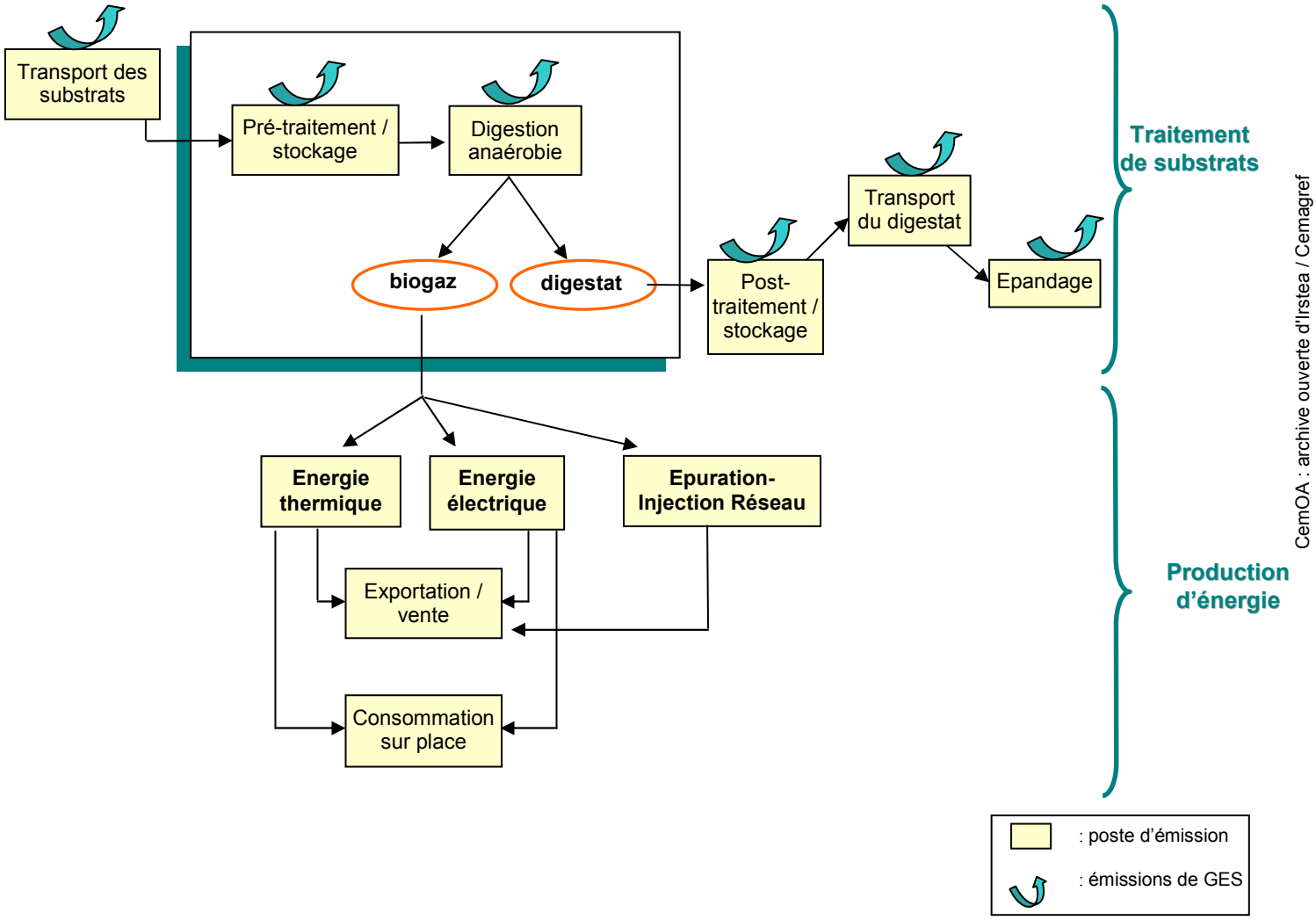

Schéma 1 : Description de la filière de digestion anaérobie

3.1.1. Le traitement des substrats

Chaque installation de digestion anaérobie peut présenter des particularités. Les grands postes associés au traitement des substrats dans le schéma 1 peuvent donc exister ou non en fonction des installations.

3.1.1.1. Les postes d'émissions

➢ Le poste « **transport des substrats** » permet de comptabiliser les émissions dues au transport des substrats. L'utilisateur peut indiquer la distance parcourue afin d'acheminer les substrats vers l'unité de digestion anaérobie. Après avoir enquêté quelques installations de méthanisation en fonctionnement, il s'avère que le véhicule le plus fréquemment utilisé possède une charge utile de 10-15 tonnes. Une installation de taille importante utilise également des semi-remorques de 38t avec une charge utile de 25 tonnes pour certains co-substrats. Afin de se placer dans le cas le plus fréquemment rencontré et pour prendre en compte le facteur d'émission le plus « pénalisant », la méthode de calcul retenue se base sur un facteur d'émission du Bilan Carbone ® de 261,3 g C/km (tableau n°78 du guide des facteurs d'émission du Bilan Carbone) soit 958 g CO_2/km. Ce facteur d'émission est spécifique à la classe de PTAC correspondant aux tracteurs routiers de PTAC de 11 à 19t. Il nous parait donc bien adapté pour une estimation correcte des émissions liées au transport des substrats assez divers qui peuvent être rencontrés. Ce facteur d'émission correspond à une moyenne pour tous types de parcours, en charge ou à vide. La charge maximale utile moyenne pour cette classe de PTAC est de 11,62 t (tableau n°74 du guide des facteurs d'émission du Bilan Carbone). On prendra en considération cette charge utile moyenne pour le calcul du nombre de trajets nécessaires à l'acheminement des substrats. Le calcul s'écrit comme suit :

Quantités de C en t éq CO_2 :

$$= \Sigma_{substrat} \text{ (arrondisup (tonnage/11.62) * 2 * dist * FE}_{CO2\ km}\text{)}$$

Avec :

- tonnage : quantité de substrat transporté
- arrondisup() : arrondi à l'entier supérieur pour calculer le nombre d'aller retour réels
- dist : distance du trajet aller à parcourir en km
- 2 : afin de tenir compte du trajet de retour à vide du véhicule
- FE $_{CO2km}$: facteur d'émission de CO_2 par km pour un tracteur routier ayant une charge utile moyenne de 11.62 t (= 958 gCO_2/km)

Dans le cas d'une installation à la ferme, ce poste d'émission peut être négligeable pour les déjections d'élevage. Il devra par contre être renseigné pour les co-substrats.

➢ Le poste « **pré-traitement / stockage** » correspond à un traitement ou un stockage du ou des substrats avant entrée dans le digesteur.

Dans les cas où ce poste existe, il peut y avoir un ou plusieurs pré-traitements (broyage, dilacération, tri, mélange avec l'inoculum, pré-fermentation). Les informations disponibles sur le traitement préalable à la digestion anaérobie sont peu nombreuses et par défaut, on considère donc un stockage simple, sans traitement.

Il est difficile de prendre correctement en compte le stockage des substrats agroalimentaires et de collectivités avant la digestion anaérobie. En effet, les pratiques et durées de stockage sont variables. Il s'agit généralement d'un stockage temporaire à l'arrivée sur le site avant acheminement vers le digesteur. Par conséquent, ce poste est inclus dans l'approche mais les émissions liées ne sont pas correctement évaluées (cf. point 3.2.). Les versions

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

ultérieures du calculateur pourront prévoir une amélioration en fonction de l'avancée des connaissances sur ce point.

Pour les substrats agricoles, il faut qu'une quantité suffisante de substrats s'accumule avant d'alimenter le digesteur. Pour ces substrats on considère un stockage, sans traitement, similaire aux stockages décrits pour la filière de référence mais d'une durée moyenne de 20 jours, soit 4 fois moins longue que la durée de stockage de la filière de référence.

Le stockage peut être couvert ou non, avec récupération ou non du biogaz généré, pour être valorisé énergétiquement. Plus précisement, trois cas se distinguent :

- Stockage couvert avec récupération du biogaz. Le taux de récupération est de 100% du méthane émis. Le CH_4 est ensuite utilisé pour la production d'énergie ;
- Stockage couvert sans récupération du biogaz (taux de récupération : 0%) : la fosse n'est pas hermétiquement close et des émissions de CH_4 ont lieu dans l'air. Généralement, les installations de digestion anaérobie agricoles ont une fosse de pré-stockage enterrée et recouverte d'une dalle béton, comportant une ouverture pour le passage d'un agitateur ou d'une pompe (cas le plus fréquent), ce qui a pour conséquence l'émission de gaz dans l'air ;
- Stockage non couvert : dans ce cas, le taux de récupération est de 0% et les émissions de méthane ont lieu directement dans l'air.

Si l'utilisateur de DIGES dispose d'informations spécifiques à l'installation qu'il souhaite évaluer, il pourra indiquer à laquelle de ces trois possibilités elle correspond.
Pour le scénario par défaut, on considère un stockage des substrats sans récupération du biogaz, cas le plus fréquent surtout si il s'agit de substrats solides (fumiers ou cultures énergétiques). Dans le cas des lisiers, les fosses font rarement l'objet d'une récupération du biogaz à ce stade du traitement.

➢ Le poste « **digestion anaérobie** » désigne le processus de méthanisation des substrats dans le digesteur (mésophile, TRH : 30 jours). Il est retenu un fonctionnement normal de la digestion : le système est étanche et il n'y a pas de fuites de biogaz. En effet, les fuites éventuelles de biogaz seraient, pour ce poste, davantage dues à un dysfonctionnement qu'à une caractéristique intrinsèque de la technologie de digestion anaérobie.
Il a été considéré que le biogaz produit au cours de la digestion contient 60% de méthane.

➢ Le poste d'émission « **post-traitement / stockage** » désigne un traitement et/ou un stockage du digestat.
Le traitement du digestat peut être une déshydratation, et/ou un compostage, etc. Par exemple, si le digestat est destiné à être commercialisé comme amendement organique, il rentre dans le champ d'application de la norme AFNOR NFU 44051, ce qui implique une étape de maturation aérobie (compostage).
Les connaissances actuelles ne permettent pas de déterminer les émissions qui ont lieu au cours des étapes de traitement. Par conséquent, seules les émissions de gaz à effet de serre de l'étape de stockage sont prises en compte dans le calculateur.
Comme pour le pré-stockage, le post-stockage peut être couvert ou non, avec récupération ou non du biogaz produit, en fonction des trois possibilités suivantes :

- Stockage couvert avec récupération du biogaz (taux de récupération du méthane : 100%) pour la production d'énergie ;
- Stockage couvert sans récupération du biogaz (taux de récupération de 0%), avec des émissions de méthane polluantes ;
- Stockage non couvert sans récupération du CH_4 (0%), avec des émissions polluantes.

L'utilisateur de DIGES peut renseigner cette information s'il la connaît. Le calcul se fait avec l'hypothèse par défaut d'un stockage couvert avec récupération du biogaz.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

➢ Le poste « **transport du digestat** » permet de comptabiliser les émissions d'énergie fossiles dépensées dues au transport du digestat vers la parcelle d'épandage. Le calcul s'écrit de la même manière que pour le transport des substrats mais en tenant compte d'un coefficient d'abattement de la matière. Pour cela, on utilise le coefficient **MO_biod/MO** qui fait partie des paramètres décrivant la composition.

On estime ainsi le tonnage du digestat par :

Quantités de C en t éq CO_2 :

$$= \Sigma_{substrat} \text{ (arrondisup((tonnage - tonnage* MO_biod/MO * \%MO/MB) / 11.62) * 2 * dist * FE}_{CO2km}$$

Avec :

- tonnage : quantité du substrat initial
- arrondisup() : arrondi à l'entier supérieur pour calculer le nombre d'aller retour réels
- dist : distance du trajet aller à parcourir en km
- MO_biod/MO : pourcentage correspondant à la matière organique biodégradable dérivé du potentiel méthanogène
- %MO/MB : teneur en matière organique de la matière brute
- FE $_{CO2km}$: facteurs d'émission de CO_2 par km pour un tracteur routier ayant une charge utile moyenne de 11.62 t (= 958 gCO_2/km)

➢ « **L'épandage** » sur les terres agricoles est la destination la plus courante du digestat. On considère qu'il est effectué en surface, ce qui correspond à la pratique d'épandage la plus courante. Dans ce cas, les émissions de méthane et de protoxyde d'azote qui se produisent ne sont pas négligeables.

3.1.1.2. Le principe du calcul des émissions

Qu'il s'agisse de rejets dans l'air ou de quantités produites et valorisables (production de CH_4 dans le digesteur et récupération aux postes de stockage), les émissions de méthane et de protoxyde d'azote, sont calculées pour chacun des postes décrits ci-dessus et pour chaque substrat composant le mélange digéré. Ces calculs sont effectués selon les formules simplifiées ci-dessous :

N_2O = tonnage x teneur en N x FE x facteurs de conversion

CH_4 = tonnage x Potentiel Méthanogène x FE x facteurs de conversion

L'utilisateur de DIGES indique des tonnages de substrats à digérer qui, couplés aux données de composition, conduisent à des quantités d'azote et de méthane potentiel auxquelles sont appliquées des facteurs d'émission. Ces facteurs d'émission sont présentés par la suite dans le point 3.2. et le calcul sera détaillé dans la partie 6.
Avant d'aborder ces points, la description de la filière de digestion anaérobie se poursuit avec le volet « production d'énergie ».

3.1.2. La production d'énergie

L'utilisateur de DIGES doit renseigner des informations sur les caractéristiques de l'installation de digestion anaérobie afin de calculer les émissions de GES évitées par la production d'énergie. Ces informations concernent :

- la récupération de biogaz au niveau des ouvrages de stockage pour la production d'énergie

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

- le mode de valorisation énergétique (co-génération, tout thermique, tout électrique ou injection dans le réseau de distribution de gaz)
- les quantités d'énergie thermique et électrique valorisées
- les modes d'utilisation de l'énergie produite

Si certaines données sont inconnues, DIGES peut calculer à partir de scénarios par défaut la production d'énergie correspondante. Cette partie détaille point par point les étapes de production et d'utilisation de l'énergie et décrit les scénarios retenus par défaut dans le calculateur. Le schéma 2 rappelle les principales notions utilisées pour aborder la production et l'utilisation d'énergie, avec les ratios de conversion utilisés par la suite.

On notera que dans le cas de l'injection dans le réseau de distribution de gaz, il n'est pas tenu compte des rendements d'utilisation du gaz (rendement d'une chaudière d'un particulier). En effet, seul le rendement d'épuration du biogaz avant l'injection est considéré.

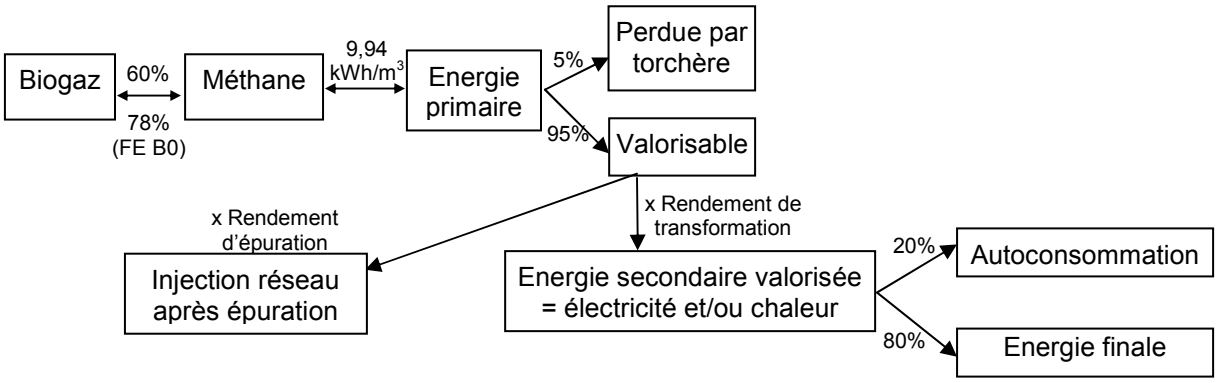

Schéma 2 : Du biogaz à l'énergie finale

3.1.2.1. L'énergie primaire

Le processus de fermentation dans le digesteur produit du biogaz contenant 60% de méthane. Les étapes de stockage en amont et en aval de la digestion anaérobie produisent également du méthane qui peut être valorisé énergétiquement dans le cas d'un ouvrage couvert avec récupération du biogaz (cf. 3.1.1.1.). Le flux de méthane en sortie de l'unité de digestion correspond donc à la somme de la production du méthane récupéré lors du pré-stockage des substrats, lors de la digestion et lors du post-stockage du digestat. Afin d'évaluer la production de méthane, le potentiel méthanogène (maximum théorique de production) de chaque substrat est utilisé, potentiel qui est modulé par un facteur de 78% qui sera détaillé par la suite au §3.2.
Le méthane a une **énergie primaire** de **9,94 kWh/m^3 CH_4**. Il s'agit de l'énergie que contient ce produit énergétique avant transformation en énergie secondaire. Cette énergie primaire du méthane est convertie en énergie réellement valorisée sur l'installation en tenant compte d'une perte liée aux opérations de maintenance des unités de production énergétique. (cf. tableau 2).

méthane produit à la sortie du digesteur	**100%**
méthane brûlé en torchère	**5%**
méthane valorisé	**95%**

Tableau 2 : Destination du méthane produit au cours de la digestion [10]

[10] déterminé par l'ADEME à partir notamment de l'étude Cabinet Merlin /EREP, 2004

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

3.1.2.2. La production d'énergie secondaire

L'énergie secondaire est ici l'électricité et/ou la chaleur. En effet, plusieurs modes de production d'énergie existent en digestion anaérobie. Des installations fonctionnent en **cogénération**, produisant à la fois de l'énergie thermique et de l'énergie électrique. Certaines ne produisent **que de l'électricité** et d'autres, enfin, **que de la chaleur**.
A chacun de ces scénarios correspond un rendement énergétique spécifique, avec un pourcentage d'énergie primaire converti en énergie électrique et/ou un pourcentage de conversion en énergie thermique, ainsi qu'un pourcentage de perte énergétique dans le système[11] (cf. tableau 3).

Mode de production	Type d'énergie	Rendement de transformation
Cogénération Electricité + Chaleur	Electrique	**30%**
	Thermique	**35%**
	Energie perdue	**35%**
Production Electricité	Electrique	**30%**
	Energie perdue	**70%**
Production Chaleur	Thermique	**80%**
	Energie perdue	**20%**

Tableau 3 : Rendement de transformation de l'énergie valorisable en fonction des modes de production énergétique (en % de l'énergie valorisable)

Dans le calculateur DIGES, l'utilisateur a la possibilité de choisir quel scénario ci-dessus correspond à l'installation de digestion anaérobie pour laquelle il établit le bilan effet de serre. S'il dispose d'informations plus précises, il peut également indiquer directement en kWh quelles sont les quantités d'énergie électrique et/ou thermique valorisées.
Dans le cas de **l'injection dans le réseau de distribution de gaz,** ce n'est pas le rendement de l'énergie secondaire qui est pris en compte mais un rendement lié à l'épuration du biogaz qui est estimée et indiquée dans le tableau ci-dessous (cf tableau 3bis). Le document source mentionne 2% de pertes de biogaz dues à l'épuration ainsi qu'une consommation d'énergie de 0,42 kWh/Nm^3 de biométhane épuré (soit 0,42/9,94=0,042 Nm^3/Nm^3, soit 4,2%).

Avec : 9,94 = coefficient de conversion du méthane en énergie en kWh/m^3 CH_4

Rendement de l'injection de biogaz dans le réseau en % de l'énergie valorisable
93,8%[12]

Tableau 3bis : Prise en compte de l'épuration du biogaz pour l'injection de biogaz dans le réseau de distribution

3.1.2.3. L'utilisation de l'énergie valorisée

L'énergie secondaire (électrique et/ou thermique) est valorisée pour deux usages : l'énergie autoconsommée par l'installation de digestion anaérobie et l'énergie finale[13] (cf. Schéma 2). C'est ce que l'on appelle l'énergie valorisée.

[11] Déterminé par l'ADEME à partir notamment de l'étude Cabinet Merlin /EREP, 2004
[12] Déterminé d'après : Analyse du cycle de vie des modes de valorisation énergétique du biogaz issu de méthanisation de la Fraction Fermentescible des Ordures Ménagères collectée sélectivement en France, Rapport final, Septembre 2007, tableau 17
[13] C'est l'énergie livrée aux consommateurs pour être convertie en énergie "utile". Exemple : électricité, essence, gaz, gazole, fioul domestique etc.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

L'énergie valorisée peut donc être destinée à trois utilisations (cf. Schéma 1) :

- une part est **autoconsommée** par l'installation (chauffage de l'effluent, du digesteur, etc.), elle reste dans le système ;
- une part est **consommée sur place** (électricité et chauffage des bâtiments de l'exploitation agricole, des locaux d'habitation, etc., hors autoconsommation de l'installation de digestion anaérobie) ;
- une part est **vendue** (à EDF, à un réseau de chaleur, à un industriel, etc.)

Dans le calculateur DIGES, il est possible d'indiquer de manière spécifique pour chaque installation, les pourcentages ou les quantités d'énergie (en kWh) correspondants aux trois usages ci-dessus.
Des pourcentages d'utilisation par défaut ont également été déterminés[14] (cf. Tableau 4).

Energie	Utilisation	%
Electricité	Electricité valorisée	**100%**
	Energie autoconsommée process	**20%**
	Energie consommée sur place	**40%**
	Energie vendue	**40%**
Chaleur	Chaleur valorisée	**100%**
	Energie autoconsommée process	**20%**
	Energie vendue	**40%**
	Energie consommée sur place	**40%**

Tableau 4 : Parts de l'énergie électrique et de l'énergie thermique appliquées, par défaut, pour chaque usage (autoconsommation, consommation sur place, vente)

On considère un **taux d'autoconsommation de 20%** de l'énergie électrique et de l'énergie thermique produites, pour le fonctionnement de l'installation de digestion anaérobie.
L'énergie utile est donc de 80%. On considère qu'elle est pour moitié consommée sur place et pour moitié exportée. Pour l'énergie électrique comme pour l'énergie thermique produite, **40% sont consommés sur place** et **40% sont exportés**.

[14] déterminé par l'ADEME dans le cadre de l'étude

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

3.1.2.4. Récapitulatif du scénario « cogénération » pour la production d'énergie

Le scénario de cogénération a été défini précédemment pour une installation de digestion anaérobie en intégrant les hypothèses de pertes de biogaz, de transformation par cogénération et d'utilisation de l'énergie électrique et de l'énergie thermique.
Le schéma 3 permet de visualiser la destination finale de l'énergie primaire du biogaz produit au cours de la digestion anaérobie.

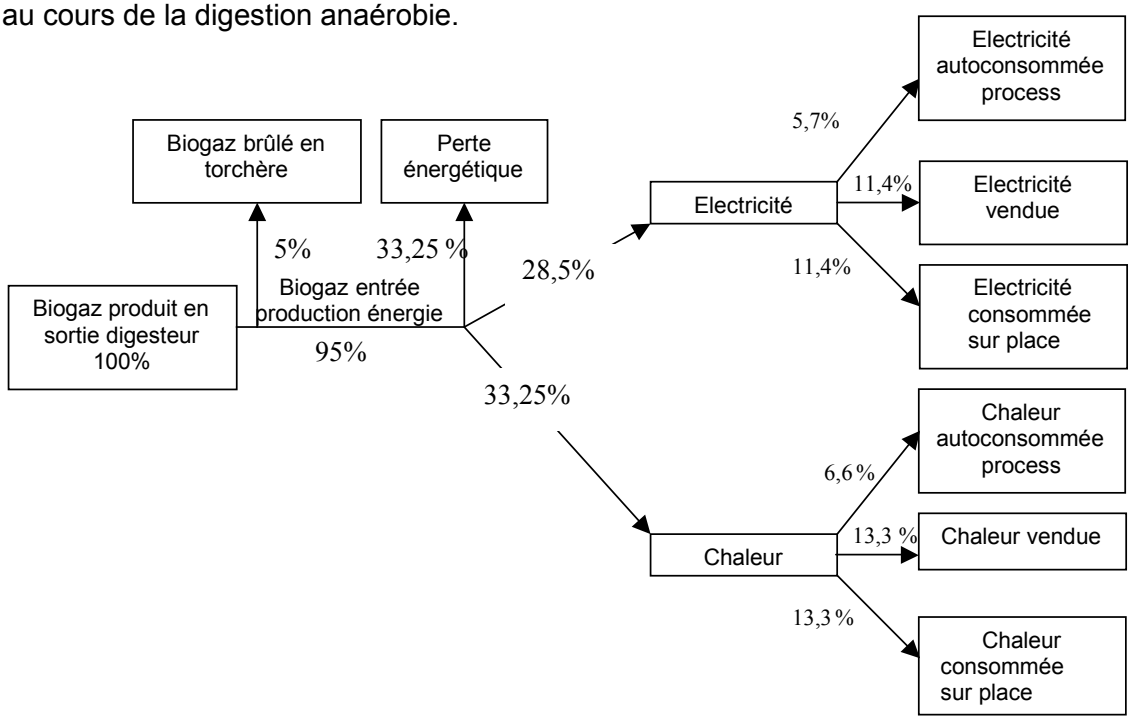

Schéma 3 : Valorisation et utilisation de l'énergie primaire dans le scénario par défaut

Nous noterons qu'il s'agit ici de moteurs à allumage commandé qui fonctionnent au biogaz uniquement. Les moteurs « dual fuel » fonctionnant avec un ajout de fuel ne sont pas intégrés dans DIGES. Si le rendement de ces moteurs est légèrement supérieur et qu'ils présentent un intérêt technico-économique pour des installations de petite taille (<100 kWe), ils sont moins répandus que les cogénératrices au biogaz pur.

3.1.2.5. Le principe du calcul des émissions

On peut remarquer sur le schéma 1 que les émissions de GES ne sont pas prises en compte dans le thème production d'énergie. En effet, bien que des émissions gazeuses aient lieues, il s'agit d'émissions de CO_2 qui, lorsqu'elles sont liées à la production d'énergie, ne sont pas comptabilisées comme gaz à effet de serre en raison de l'origine biomasse de cette production.
Cependant, pour l'établissement du bilan effet de serre, il est nécessaire de connaître les quantités d'énergie électrique et thermique finales produites par l'installation de digestion anaérobie. C'est en effet à partir de ces quantités d'énergie, qui se substituent à celles qui auraient été consommées par la filière de référence, que l'on peut calculer les émissions gazeuses évitées (cf. section 5.).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

3.2. Facteurs d'émission correspondants

On rappelle que les facteurs d'émission du tableau 5, déterminés pour la filière de digestion anaérobie, ne concernent que le thème « **traitement des substrats** », les émissions liées au thème « énergie » n'étant pas comptabilisées.
Comme indiqué précédemment, les substrats présentés ici correspondent à la version « libre » du logiciel.
On précise que les facteurs d'émission correspondent à une production de gaz au niveau des postes d'émission et pas forcément à une émission dans l'air. Notamment, pour le pré-stockage et le post-stockage, le méthane produit est soit valorisé pour la production d'énergie, soit émis dans l'air. Les précisions sur le calcul seront apportées dans la partie 6.

Le choix des données d'émission est précisé ci-après, par poste d'émission.

Déchets	pré-stockage du déchet		digestion anaérobie		post-stockage - traitement		épandage du digestat	
	FE N_2O	FE CH_4	FE N_2O	FE CH_4	FE N_2O	FE CH_4	FE N_2O	FE CH_4
fumier bovin	0,08	2,60	0,00	78,00	0,00	2,08	0,90	0,01
fumier porcin	0,08	2,60	0,00	78,00	0,00	2,08	0,90	0,02
lisier bovin	0,00	4,18	0,00	78,00	0,00	2,08	0,90	0,01
lisier porcin	0,00	4,18	0,00	78,00	0,00	2,08	0,90	0,02
fientes volaille	0,08	2,60	0,00	78,00	0,00	2,08	0,90	0,02
fumier de volailles	0,08	2,60	0,00	78,00	0,00	2,08	0,90	0,01
co-produits de l'industrie de la pomme de terre	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,03
graisses d'abattoir	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,06
lactosérum	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,05
boues de STEP (IAA)	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,02
biodéchets ménagers	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,03
boues de STEP (collectivités)	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,02
graisses de STEP	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,06
huiles et graisses de restauration	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,06
drêches de brasserie	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,03
fruits et légumes	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,03
co-produits viticoles et vinicoles	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,03
déchets verts	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,01
Lisier canard	0,00	4,18	0,00	78,00	0,00	2,08	0,90	0,03
fumier ovin	0,08	2,60	0,00	78,00	0,00	2,08	0,90	0,02
Fumier équin	0,08	2,60	0,00	78,00	0,00	2,08	0,90	0,02
Fumier ovin-caprin	0,08	2,60	0,00	78,00	0,00	2,08	0,90	0,02
Lisier volaille	0,00	4,18	0,00	78,00	0,00	2,08	0,90	0,02
Amidon pulpe	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,03
Betterave fanes	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,03
Betterave fourragère	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,03
Betterave sucrière	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,03
Blé	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,02
Blé grain	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,03

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Boues de flotation	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,06
Boues de STEP	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,04
Brasserie déchets	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,03
Céréales poussières	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,01
Colza tourteau	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,04
Contenu de panse	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,02
Contenu de panse pressé	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,05
Déchets de cuisine	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,03
Déchets de légumes	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,03
Déchets de sortie de silo	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,03
Déchets des marchés	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,03
Déchets verts humides	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,02
ensilage herbe	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,03
ensilage maïs	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,03
Estomac/intestin contenu	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,02
Farine animale	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,05
Feuillage	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,03
Fines et spathes	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,02
Foin	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,02
Graisses	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,03
Gruau de colza	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,04
Herbe de fauche sur jachère	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,02
Herbe fraîche	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,02
Jachères	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,02
Luzerne	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,03
Maïs	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,03
Maïs résidus	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,05
Marc de fruit	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,03
Mélasse	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,02
Melon jus	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,02
Orge	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,04
paille	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,02
Paille de céréales	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,03
Paille de mais	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,05
Pain vieux	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,06
Pelouse	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,04
Petit lait	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,04
Pomme de terre fanes	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,04
Pomme de terre pulpe	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,02
Poussière silos	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,02
Rafles d'automne	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,02
Rafles de printemps	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,02
Raisin marc distillé	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,02
Résidus de distillation de céréales	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,04
Résidus de distillation de pomme de terre	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,03
Seigle	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,03

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Semences déclassées	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,03
séparateur de graisse (Fettabscheider)	0,00	0,00	0,00	78,00	0,00	2,08	0,20	0,05

Tableau 5 : Facteurs d'émission de N_2O et CH_4 par substrat et par poste d'émission pour la filière de digestion anaérobie (en % N initial et % potentiel méthanogène, respectivement)

- Pré-stockage, pré-traitement

Il a été précisé que le pré-stockage des substrats d'IAA et de collectivités était difficile à aborder en raison de la variabilité des pratiques et du manque de disponibilité des données. En considérant qu'il s'agit plutôt de stockage de courte durée, on utilise par défaut des facteurs d'émission de méthane et protoxyde d'azote de valeur nulle. Par la suite, en fonction des données disponibles, cette approche devra être approfondie.

Pour les déjections animales, on considère que la durée de stockage est 4 fois moins longue que celle définie pour la filière de référence. Les facteurs d'émission déterminés pour la filière de référence sont donc divisés par quatre et intégrés ici (cf. section 4.2).
La définition de ce poste d'émission prévoit de pouvoir y inclure les pré-traitements évoqués précédemment. Dans l'état actuel des connaissances, aucune donnée s'y rapportant n'a pu être intégrée. Cependant, les versions ultérieures du calculateur pourront éventuellement le prévoir.

- Digestion anaérobie

Le biogaz produit au cours de la digestion anaérobie contient principalement du méthane et ne contient pas de protoxyde d'azote. Le facteur d'émission de protoxyde d'azote est donc nul quel que soit le substrat.

Il a été retenu l'hypothèse qu'il n'y avait pas de fuites au niveau du digesteur. Les facteurs d'émission du méthane mentionnés au tableau 5 correspondent donc à une production de gaz.
Cette production de méthane est par la suite valorisée en partie pour la production d'énergie (se reporter à la section 3.1.2). On rappelle que le méthane en sortie du digesteur est brûlé dans une unité de production d'énergie (chaudière, moteurs, …) ou en torchère. Cette combustion n'émet pas de gaz à effet de serre. Il est admis, en effet, que le dioxyde de carbone libéré au cours de cette combustion n'a pas d'impact du fait de son origine biomasse. Les émissions de méthane liées à la production d'énergie sont donc nulles.

La production de méthane à la sortie du digesteur est calculée en multipliant le facteur d'émission par le potentiel méthanogène de chaque substrat, selon la formule simplifiée rappelée ci-dessous :

CH_4 = tonnage x Potentiel Méthanogène x FE x facteurs de conversion

Des données de production de méthane au cours de la digestion anaérobie des différents substrats ont été recueillies dans la bibliographie. Afin de déterminer des facteurs d'émission pour le méthane en pourcentage du potentiel méthanogène, ces données de production ont été divisées par les potentiels méthanogènes correspondant à chaque substrat (issus du tableau 1). Les valeurs obtenues sont relativement proches, ce qui amène à considérer que l'on peut utiliser un facteur d'émission de méthane identique pour l'ensemble des substrats.
Cette conclusion permet de faire un choix méthodologique (un seul FE pour tous les substrats), cependant, les valeurs obtenues ne permettent pas de calculer un facteur d'émission moyen fiable car les données de production et les potentiels méthanogènes ne proviennent pas des mêmes sources (différences dans les conditions de mesure, les

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

compositions des substrats, etc.). De plus, des incertitudes existent car, dans la bibliographie, il n'est parfois pas indiqué ce qui est de l'ordre du potentiel méthanogène et de la production de biogaz.
Afin de disposer d'un FE fiable, les mesures effectuées sur des déjections animales dans le cadre d'un travail de thèse au Cemagref[15] ont été utilisées. Pour chaque substrat étudié, la production de méthane à 30 jours (ce qui correspond au temps de rétention hydraulique de la filière décrite par défaut) a été divisée par le potentiel méthanogène du substrat. On obtient ainsi des coefficients (en % du potentiel méthanogène) par type de déjection, fiables car issus de mesures effectuées sur le même substrat d'origine et dans les mêmes conditions opératoires. La moyenne de ces coefficients permet de déterminer un facteur d'émission de méthane de 78% du potentiel méthanogène au cours de la digestion anaérobie. Par extension, ce facteur d'émission est appliqué aux autres substrats.
De même, René Moletta, dans son ouvrage : « La Méthanisation » indique :
« Au cours de la digestion, les 2/3 de la matière organique biodégradable sont transformés en biogaz… La transformation des 2/3 de la matière organique en conditions anaérobies entraîne une minéralisation de l'azote dans les mêmes proportions. Lors de la digestion, la minéralisation (et la conservation) de l'azote et du phosphore, la diminution de la teneur en matière sèche et la diminution de la phytotoxicité des substrats ont des conséquences positives sur la valeur fertilisante du digestat. »
Le facteur 2/3 qu'il mentionne est à rapprocher des 78% indiqués précédemment. Ces « coefficients de modulation » traduisent de la différence entre les conditions réelles et les conditions expérimentales où le potentiel méthanogène est obtenu dans des conditions optimales. Il est donc préférable de tenir compte de cette modulation dans les calculs (ce qui n'est pas toujours le cas dans les autres simulateurs de bilan GES).

- Post-stockage, post-traitement

Les données d'émission disponibles dans la bibliographie et concernant le stockage ou le traitement du digestat, sont très peu nombreuses.
Par conséquent, pour déterminer les facteurs d'émission, on cherche à disposer de comparaisons de mesures entre des substrats bruts et des substrats digérés.
Dans une publication de Amon & al.[16] sur les émissions au cours du stockage de digestat de lisier bovin, les mesures de N_2O sur lisier brut et lisier digéré ne sont pas significativement différentes. On applique donc ici le FE déterminé pour le lisier brut dans la filière de référence, soit 0% (cf. section 4.2). Par ailleurs, on peut supposer que les digestats sont plutôt liquides, auquel cas leur stockage (et traitement) s'effectue en conditions anaérobies, sans émissions de N_2O. Le même facteur d'émission peut alors être appliqué pour l'ensemble des substrats.

La publication de Amon & al. a également fourni des éléments sur les émissions de CH_4 au cours du stockage de digestat de lisier de bovin. Selon les mesures effectuées, les émissions au cours du stockage du digestat sont réduites de 66,8% par rapport aux émissions au stockage du lisier brut. A partir de cette donnée, nous avons considéré un stockage du digestat de 30 jours (avec pour hypothèse un temps total de la filière de digestion anaérobie identique à celui de la filière de référence, soit 20 jours de pré-stockage, 30 jours de digestion et 30 jours de post-stockage) et une réduction des émissions de 66,8% par rapport à un lisier brut.

[15] thèse Vedrenne F. Compréhension des processus responsables des émissions de méthane issues des déjections animales liquides en vue d'une maîtrise de ces émissions. Cemagref. Ademe. En cours
[16] Amon B. & al. 2005

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Le calcul s'écrit :
FEpost-stockage_digestat_CH_4 = FEstockage_lisier_brut_CH_4 * 33,2/100 * 30/80
Avec :
FEpost-stockage_digestat_CH_4 : Facteur d'émission du CH_4 calculé pour le post-stockage du digestat
FEstockage_lisier_brut_CH_4 : Facteur d'émission du CH_4 pour le stockage du lisier brut
33,2/100 : facteur correspondant à une réduction d'émission de 66,8%
30/80 : facteur correspondant à la durée de stockage du digestat par rapport au stockage du lisier brut
Le taux d'émission obtenu est de **2,08%** du potentiel méthanogène du substrat.

A terme, ces résultats déterminés pour le méthane et le protoxyde d'azote devraient être approfondis pour une évaluation plus précise du bilan.
En effet, les premières approximations faites ci-dessus supposent que le digestat se comporte de la même manière quelle que soit la composition du mélange digéré et son traitement.

Les facteurs d'émission déterminés pour ce poste d'émissions permettent de calculer les rejets dans l'air pour des ouvrages de stockage sans récupération du biogaz (couverts ou non). Dans le cas d'un stockage couvert avec récupération du biogaz, on utilise les mêmes facteurs d'émission mais les quantités de CH_4 comptabilisées ne sont pas intégrées dans le bilan des émissions gazeuses, elles sont utilisées pour les calculs relatifs à la valorisation énergétique (cf. partie 3.1.2.1.).

- <u>Epandage du digestat</u>

Les éléments disponibles dans la bibliographie constituée sont également peu nombreux sur les émissions de GES liées à l'épandage de digestat.

Quelques publications fournissent des éléments de comparaison entre les émissions de N_2O au cours de l'épandage de lisier brut et de lisier digéré. Dans 2 publications[17] du même auteur, les émissions à l'épandage de digestat sont plus élevées de 5% dans un cas et de différence non significative dans l'autre. Dans une autre publication[18], elles sont plus faibles de 80% et dans la dernière étude[19] plus récente, on aboutit à une différence de 20% inférieure pour l'émission à l'épandage de digestat par rapport à l'épandage du lisier bovin brut. Il apparaît ainsi difficile de conclure. Par conséquent, on considère que les émissions sont de même ordre de grandeur que celles de la filière de référence et on utilisera donc les mêmes FE.
Conformément aux facteurs d'émission déterminés pour les filières de référence des différents substrats (cf. tableau 6, point 4.2.), un FE de 0,9% de l'azote initial est appliqué pour l'ensemble des déjections animales et de 0,2% pour l'ensemble des autres substrats[20].

Par extension, on applique ce raisonnement pour déterminer les émissions de CH_4. Cependant, alors que pour le protoxyde d'azote les émissions étaient nulles ou négligeables au cours des étapes précédant l'épandage, des émissions de méthane significatives ont lieu dans ces postes. On détermine donc pour chaque substrat la quantité du potentiel méthanogène non dégradée. Cette quantité est calculée à partir du potentiel méthanogène initial, par déduction des émissions ayant eu lieu dans les étapes antérieures. Il est ensuite

[17] J.Clemens & al. 2004 et Clemens & al. 2001
[18] Amon & al. 2004
[19] Köster & al. 2009
[20] y compris pour les graisses de STEP et huiles et graisses alimentaires : dans la filière de référence de ces substrats, il y a un traitement spécifique pour éliminer l'azote, les émissions à l'épandage sont donc nulles ; par contre, ce traitement n'a pas lieu dans la filière de digestion anaérobie.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

appliqué à cette quantité de méthane potentiel, un facteur d'émission de 0,04%. Ce facteur est issu d'une étude menée par le Cemagref dans le cadre d'une convention avec l'ADEME : « Flux de gaz à effet de serre (CH_4, N_2O) et d'ammoniac (NH_3) liés à la gestion des déjections animales : Synthèse bibliographique et élaboration d'une base de données ». Par ce calcul on obtient les FE du tableau 5. Le calcul du facteur d'émission de méthane à l'épandage (FE_EpCH_4) s'écrit :

FE_EpCH_4 = [1-Σ(FE_précédents)*B0] * 0,0004

Avec :

FE_précédents : FE au pré-stockage et FE digestion anaérobie

B0 : potentiel méthanogène

0,0004 : 0,04%

Afin de calculer l'émission de CH_4 de ce poste, on utilise le facteur d'émission ainsi calculé et le potentiel méthanogène initial de chaque substrat.

Etant donné l'absence d'informations plus précises, on considère que ces facteurs d'émission s'appliquent aux digestats en l'état ainsi qu'aux digestats ayant fait l'objet d'une maturation (compost).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

4. Les filières de traitement de référence

La méthodologie d'élaboration du bilan effet de serre d'installations de digestion anaérobie amène à définir pour chaque substrat, la filière de référence selon laquelle il aurait été traité en l'absence de digestion anaérobie.

4.1. Description des filières par famille de substrat

4.1.1. Substrats agricoles

Les déjections animales pouvant être utilisées pour une simulation sont les fumiers de bovins, porcins et volailles, les lisiers bovins et porcins, ainsi que les fientes de volailles.
Les filières sont les mêmes pour l'ensemble de ces substrats : on considère les déjections à la sortie du bâtiment d'élevage, puis on compare les émissions gazeuses de la filière digestion anaérobie avec celles de la filière de référence pour la gestion des substrats, à savoir un stockage au niveau de l'exploitation suivi d'un épandage agricole (cf. schéma 4).

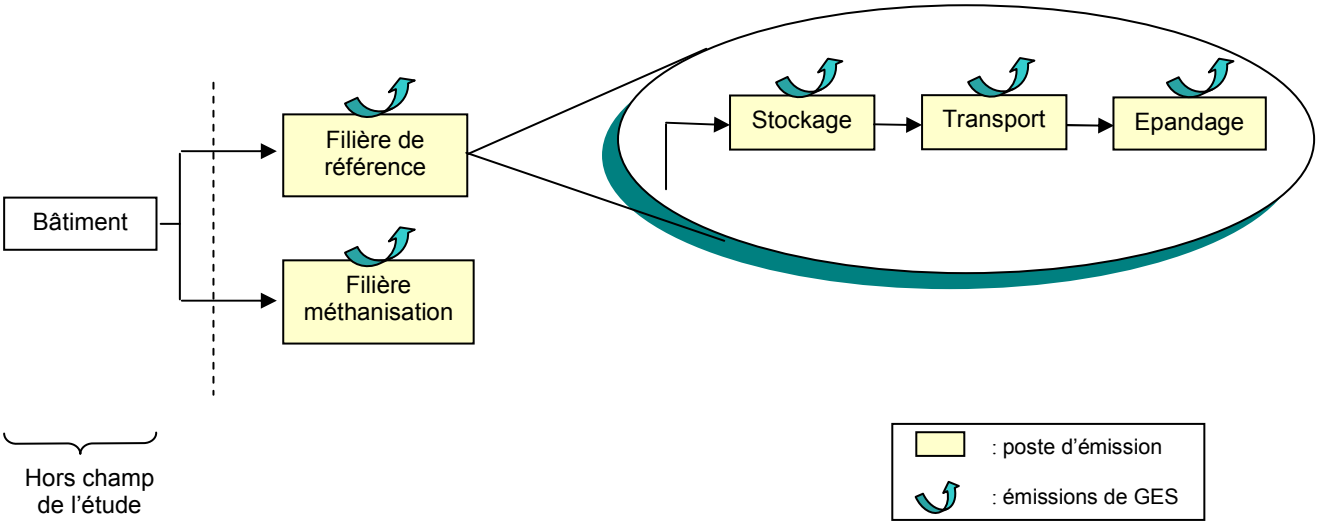

Schéma 4 : Champ de l'étude et filière de traitement de référence pour les déjections animales

Pour les fumiers, on pose pour hypothèse que le stockage s'effectue en bout de champ, sur une durée moyenne de 80 jours. Les lisiers et fientes sont quant à eux considérés stockés dans une fosse béton semi-enterrée non couverte, sur une durée moyenne de 80 jours également. Le transport des effluents d'élevage vers la parcelle d'épandage est pris en compte. L'utilisateur indique la distance à parcourir pour les acheminer vers les parcelles.
A l'épandage, on considère les techniques utilisées le plus couramment : épandeur à fumier et épandage en surface par buse palette pour les lisiers et fientes.

4.1.2. Substrats des industries agroalimentaires

4.1.2.1. La fabrication d'aliments

De nombreux sous-produits et co-produits des industries agro-alimentaires trouvent un débouché en étant valorisé en tant que matière première dans une autre activité.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Ainsi, en 1996, 48,9% des 1 148 000 tonnes de déchets produits par les industrie de transformation de légumes (dont 24% de **co-produits de l'industrie de la pomme de terre**) étaient valorisés en alimentation animale. Ce pourcentage était de 92,6% pour les sous-produits des laiteries et fromageries (dont 95% de **lactosérum**) et de 74,9% pour les sous-produits des brasseries (dont 65% de **drêches de brasserie**)[21]. Ces sous-produits peuvent également être valorisés en alimentation humaine (poudre de lait à partir de lactosérum).
Dans l'approche, on compare la filière de traitement des déchets par digestion anaérobie et leur gestion dans la filière de référence (cf. schéma 5).

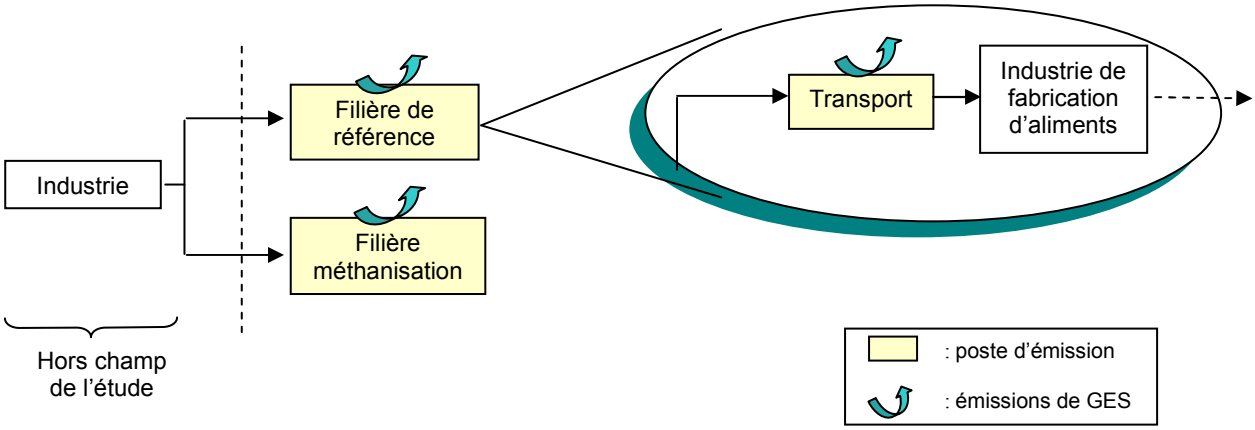

Schéma 5 : Champ de l'étude et filière de traitement de référence pour les co-produits de l'industrie de la pomme de terre, les drêches de brasserie et le lactosérum

Dans la filière de référence, ces sous-produits sont intégrés dans un nouveau process de fabrication et ne sont plus gérés en tant que déchets. Les gaz à effet de serre de cette activité ne sont donc pas considérés ici. Le facteur d'émission appliqué à ce mode de valorisation sera donc de valeur nulle. On tiendra compte néanmoins des émissions de GES induits par le transport vers l'industrie de fabrication d'aliments.

4.1.2.2. L'épandage agricole

Avec la valorisation en alimentation, l'épandage agricole est la principale voie de débouchés des déchets agro-alimentaires. Ils présentent en effet un intérêt agronomique en tant qu'amendement ou fertilisant organique.
L'ensemble de la filière distillerie (secteurs viti-vinocoles, cidreries, brasseries, malteries) constitue le 2ème gisement de substrats concernés par l'épandage agricole en 2000 selon l'étude de CM International[22]. Selon cette même étude, les **co-produits viticoles et vinicoles** sont majoritairement épandus.
On compare donc ici les émissions de gaz à effet de serre liées à la digestion anaérobie des co-produits vitivinicoles à celles liées à leur épandage agricole (cf. schéma 6).

[21] Petitjean S. - Utilisation des substrats en agriculture – Le courrier de l'environnement n°28 - 1996
[22] CM International – Evaluation des quantités actuelles et futures de sous-produits épandus sur les sols agricoles provenant des industries agroalimentaires –Avril 2002

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

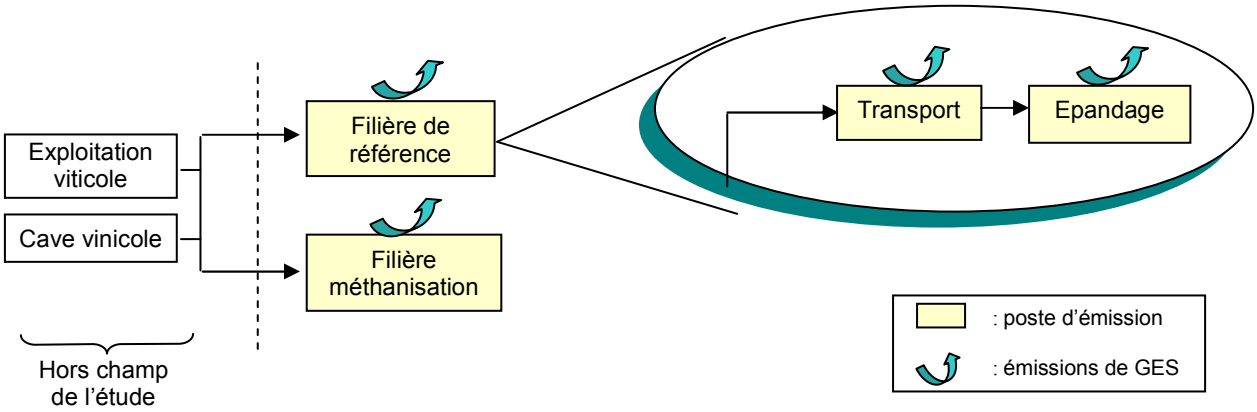

Schéma 6 : Champ de l'étude et filière de traitement de référence pour les co-produits viticoles et vinicoles

On considère un épandage en surface qui est la situation la plus courante. Les émissions de GES liées au transport vers les parcelles d'épandage sont considérées.

4.1.2.3. Le stockage et l'épandage de boues de STEP industrielles

De nombreuses industries agroalimentaires sont équipées d'une station de traitement de leurs effluents qui génère des **boues**.
Celles qui disposent d'unité de digestion anaérobie peuvent méthaniser ces boues en mélange ou non avec d'autres effluents et d'autres substrats. Plus généralement, les boues sont stockées avant d'être épandues. On compare le traitement par digestion anaérobie des boues à la sortie de la station d'épuration industrielle avec la gestion de ces mêmes boues par une phase de stockage suivi d'un épandage agricole (cf. schéma 7).

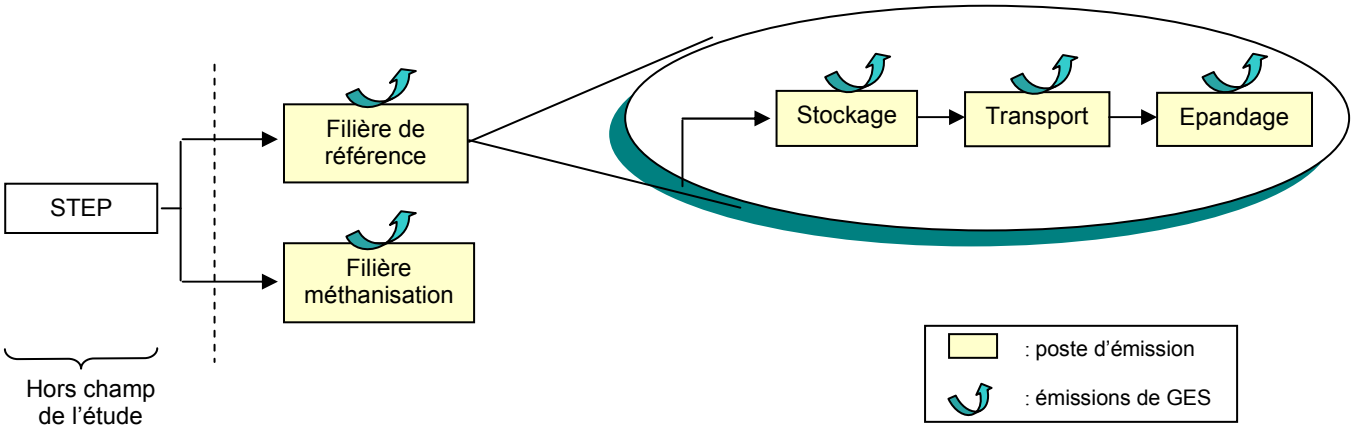

Schéma 7 : Champ de l'étude et filière de traitement de référence pour les boues de STEP industrielles

Le stockage a lieu en silo à boues circulaire en béton, non enterré et non couvert. De la même façon que précédemment, le transport des boues vers les parcelles d'épandage est considéré.

4.1.2.4. L'incinération

L'incinération est une voie de traitement que l'on peut qualifier d'ultime, généralement utilisée pour des substrats non valorisables au niveau agronomique ou alimentaire.
L'épandage des graisses étant interdit par décret et les voies de traitement spécifiques étant coûteuses et non généralisées, l'incinération est la filière de traitement la plus courante pour les **graisses d'abattoir.**

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

On considère les graisses à la sortie de l'abattoir puis on compare les émissions gazeuses de la filière de traitement par digestion anaérobie à celles de la filière de référence (cf. schéma 8).

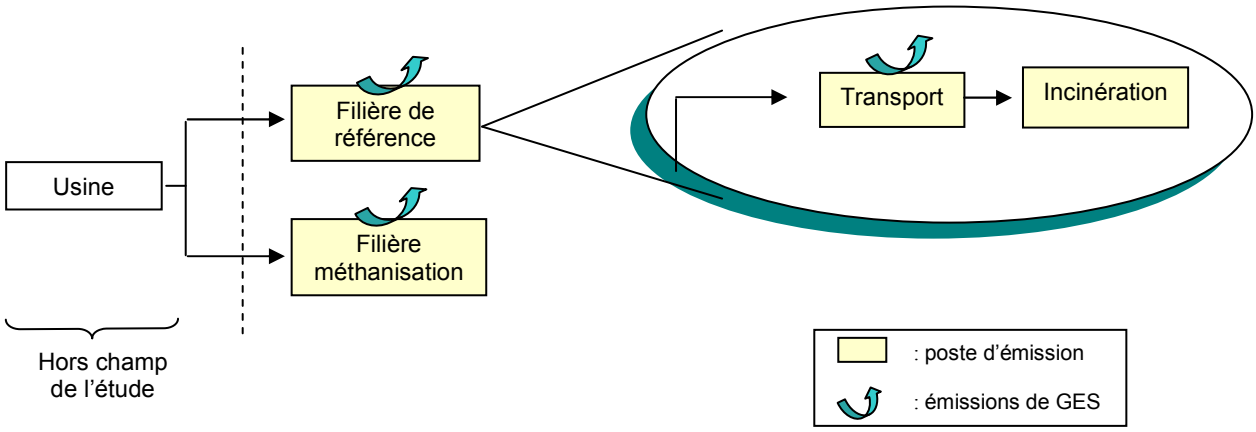

Schéma 8 : Champ de l'étude et filière de traitement de référence pour les graisses d'abattoir

Il convient ici de préciser que s'agissant de combustion de graisse d'origine biomasse, les émissions gazeuses de CO_2 ne sont pas considérées comme impactant sur l'effet de serre. Les facteurs d'émission correspondants seront de valeur nulle. Par contre, les émissions de GES liées aux transports des graisses vers l'unité d'incinération sont considérées.

4.1.2.5. La mise en centre de stockage de substrats non dangereux (CSD)

Les **déchets de fruits et légumes** considérés ici rejoignent généralement le circuit de gestion des déchets ménagers et assimilés. Ces derniers sont pour la plupart stockés en décharge (52% selon les chiffres Ademe 2002[23]).
On compare donc ici les deux filières en considérant les substrats de fruits et légumes à leur arrivée sur un site, soit de digestion anaérobie soit de stockage des substrats (cf. schéma 9).

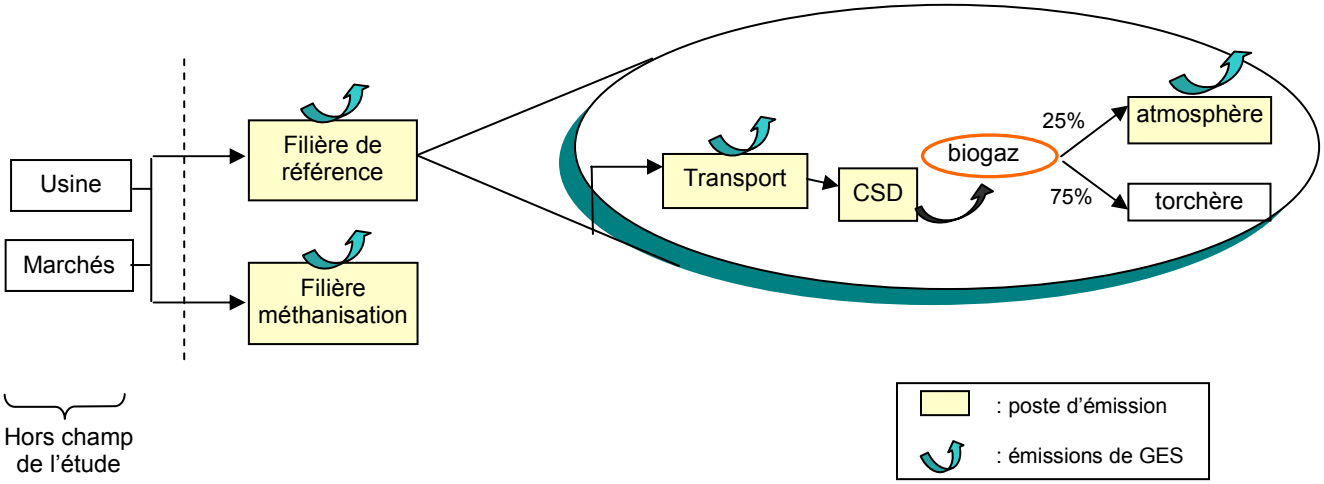

Schéma 9 : Champ de l'étude et filière de traitement de référence pour les substrats de fruits et légumes

Les émissions de GES liées aux transports vers le Centre de Stockage des Substrats sont considérées. Les substrats ménagers sont composés en partie de substrats fermentescibles. Lors de leur stockage en CSD, ils subissent une dégradation anaérobie productrice de biogaz qui doit être réglementairement capté. Le biogaz capté dans ce scénario est brûlé en

[23] www.ademe.fr rubrique Déchets / Chiffres clés

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

torchère. Par convention, on considère que cette combustion de biomasse n'émet pas de gaz à effet de serre.
Pour le calcul des émissions de gaz à effet de serre, on s'intéresse donc à la part de biogaz non captée (fuite) qui est émise à l'atmosphère.
L'outil de calcul établi pour le registre européen des émissions polluantes[24] est référent en matière de calcul d'émissions gazeuses dans l'air issues des CSD. Il fournit des éléments pour déterminer la proportion de biogaz capté, en fonction des équipements de stockage. Ainsi, à partir des hypothèses fournies, on retient un taux de captage de 75% qui correspondrait au taux de captage moyen d'un centre de stockage comportant des casiers à couverture semi-perméable et des casiers à couverture imperméable naturelle. Cette part captée est brûlée en torchère.
La proportion moyenne de biogaz émise dans l'air est donc de 25% du biogaz produit.

4.1.3. Substrats des collectivités

4.1.3.1. Biodéchets des ménages et substrats verts : La mise en centre de stockage de substrats non dangereux (CSD)

Il a été énoncé ci-dessus que la filière de gestion des substrats ménagers et assimilés la plus courante est la mise en décharge. Cela concerne dans l'approche les **biodéchets des ménages** et les **substrats verts**.
Il est donc considéré que la digestion anaérobie des biodéchets ménagers et des substrats verts permet d'éviter les émissions de gaz à effet de serre dues à leur enfouissement en centre de stockage sans valorisation du biogaz.
On compare alors les deux filières en considérant ces substrats à leur arrivée sur un site, soit de digestion anaérobie soit de stockage des substrats (cf. schéma 10).

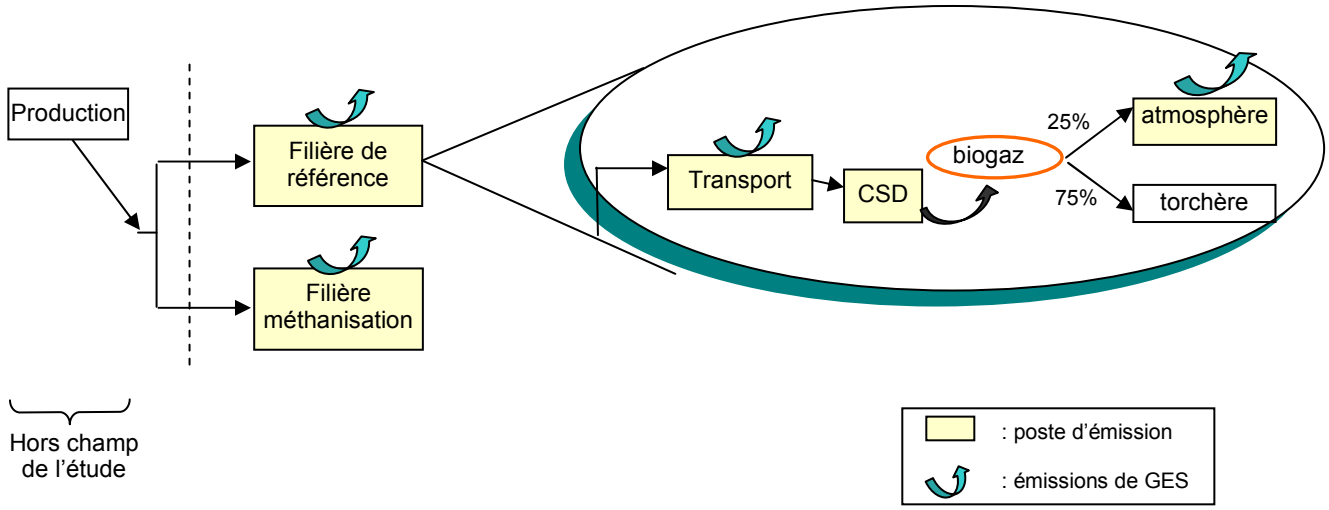

Schéma 10 : Champ de l'étude et filière de traitement de référence pour les biodéchets ménagers et les substrats verts

Comme évoqué précédemment (cf. 4.1.2.5.), au cours du stockage en CSD la fraction fermentescible des ordures ménagères se dégrade et produit du biogaz. 75% du biogaz produit est brûlé en torchère[25]. En raison de l'origine biomasse, les émissions gazeuses de CO_2 liées à cette combustion ne sont pas considérées comme impactant sur l'effet de serre.

[24] ADEME. Outil de calcul des émissions dans l'air de CH_4, CO_2, SOx, NOx issues des centres de stockage de substrats ménagers et assimilés, 14/03/2003 (dit outil de calcul EPER)
[25] taux de captage moyen d'un centre de stockage, à partir des hypothèses indiquées dans l'outil de calcul EPER

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Pour le calcul du bilan effet de serre, on s'intéresse aux 25% de biogaz produit qui sont émis dans l'air.

4.1.3.2. Le stockage et l'épandage des boues de STEP urbaines

L'approche est centrée sur les boues liquides issues d'un traitement aérobie des effluents urbains. Ce type de traitement est le plus répandu, il concerne 51% des STEP urbaines[26].
La gestion de ces boues comporte le plus couramment une phase de stockage en silo à boues circulaire en béton non enterré et non couvert et un épandage agricole en surface.
On considère les boues de STEP à la sortie de la station puis on compare les émissions de gaz à effet de serre liées à la digestion anaérobie à celles liées au stockage et à l'épandage.
De la même façon que précédemment, le transport des boues vers les parcelles d'épandage est considéré.

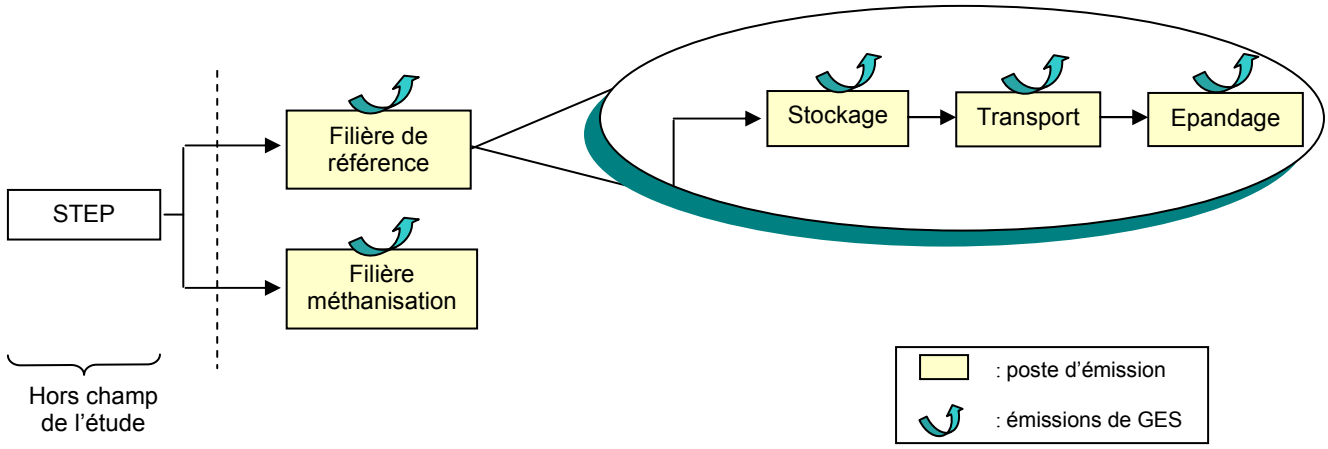

Schéma 11 : Champ de l'étude et filière de traitement de référence pour les boues de stations d'épuration collectives

4.1.3.3. Le traitement en STEP collective

Deux types de substrats sont concernés par le traitement en STEP collective : les substrats graisseux issus des STEP, les huiles et graisses alimentaires usagées. Pour ces deux substrats, la description de la filière de traitement de référence est la même (cf. schéma 12).

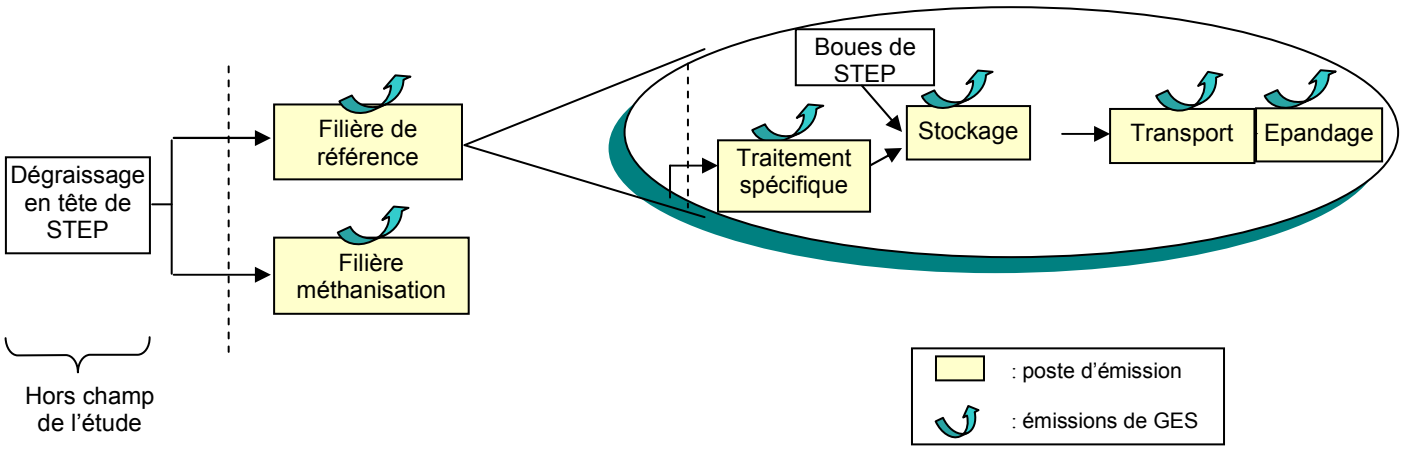

Schéma 12 : Champ de l'étude et filière de traitement de référence pour les graisses de STEP et les huiles et graisses usagées

[26] Moletta R, Cansell F. Méthanisation des substrats organiques RECORD. Février 2003

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Les **graisses des stations d'épuration** sont récupérées au cours du pré-traitement des effluents urbains, après l'étape de dégrillage. 60% du gisement national est traité in situ, par procédé aérobie ou anaérobie[27]. Dans le cas d'une digestion anaérobie, les graisses sont traitées en mélange avec les boues de STEP. Lorsqu'elles sont traitées par voie biologique aérobie, il s'agit d'un traitement spécifique aux graisses, dans un bassin d'aération, qui génère des boues. Après traitement spécifique, ces boues sont, soit réinjectées en tête de station d'épuration et traitées avec les effluents (traitement aérobie), soit mélangées avec les boues issues de l'épuration. Dans les deux cas, elles suivent ensuite les filières classiques de traitement des boues de STEP (cf. point 4.1.2.3). On compare donc les émissions gazeuses de la filière de traitement des substrats graisseux par digestion anaérobie (en mélange avec des boues d'épuration) avec la filière de traitement par voie aérobie : traitement spécifique puis mélange avec les boues d'épuration avant stockage et épandage des boues (cf. schéma 12).

Les **huiles et graisses usagées** en provenance de la restauration peuvent être récupérées à la source lorsque les restaurants sont équipés de bacs à graisses. Selon l'étude BIPE, bien que 55% des établissements soient équipés de ces bacs, seulement 17% du gisement est récupéré à la source (500 000 tonnes). La grande majorité de ces substrats rejoint donc le réseau collectif pour être traité en station d'épuration. Les huiles et graisses usagées composent ainsi, en partie, le gisement de graisses issues de STEP. La filière de référence est donc la même que pour les graisses de STEP exposée ci-dessus.

Comme indiqué précédemment dans le chapitre sur la composition des substrats, la mise en culture de **plantes énergétiques** est spécifique à la méthanisation. Ces cultures peuvent être effectuées sur des parcelles habituellement en jachère ou en substitution à des cultures habituellement vendues ou consommées par les animaux d'élevage ou encore faire partie des Cultures Intermédiaires Piège à Nitrate (CIPAN). La situation de référence peut donc être variable.
Si on considère le cas probablement le plus fréquent de la substitution à une culture habituellement vendue ou consommée sur place, les pratiques agricoles de la situation de référence par rapport à la situation de digestion anaérobie ne seront pas très différentes.
Pour ces substrats, on a donc considéré des facteurs d'émission de valeurs nulles pour les filières de références et pour la filière de digestion anaérobie avant digestion.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

[27] étude BIPE, 2004

4.2. Facteurs d'émission correspondants

Les facteurs d'émission (FE) consignés dans le tableau 6 sont issus de la littérature.
Ainsi, on retrouve dans ce tableau les informations sur les filières de référence (antérieures à la digestion anaérobie) pour chaque substrat : les déjections animales sont traitées par stockage et épandage, les graisses d'abattoir ont pour filière de référence l'incinération, etc.

Déchets	stockage		traitement		épandage		CSD		incinération		fabrication d'aliments	
	FE N_2O	FE CH_4	FE N_2O	FE CH_4	FE N_2O	FE CH_4	FE N_2O	FE CH_4	FE N_2O	FE CH_4	FE N_2O	FE CH_4
fumier bovin	0,30	10,40			0,90	0,04						
fumier porcin	0,30	10,40			0,90	0,04						
lisier bovin	0,00	16,70			0,90	0,03						
lisier porcin	0,00	16,70			0,90	0,03						
fientes volaille	0,15	10,40			0,90	0,04						
fumier de volailles	0,30	10,40			0,90	0,04						
co-produits de l'industrie de la pomme de terre											0,00	0,00
graisses d'abattoir									0,00	0,00		
lactosérum											0,00	0,00
boues de STEP (IAA)	0,00	32,30			0,20	0,05						
biodéchets ménagers							0,00	4,20				
boues de STEP (collectivités)	0,00	28,50			0,20	0,04						
graisses de STEP	0,00	1,60	1,00	0,00	0,00	0,01						
huiles et graisses de restauration	0,00	1,60	1,00	0,00	0,00	0,01						
drêches de brasserie											0,00	0,00
fruits et légumes							0,00	4,20				
co-produits viticoles et vinicoles					0,20	0,03						
déchets verts							0,00	4,20				
Lisier canard	0,00	16,70			0,90	0,03						
fumier ovin	0,30	10,40			0,90	0,04						
Fumier équin	0,30	10,40			0,90	0,04						
Fumier ovin-caprin	0,30	10,40			0,90	0,04						
Lisier volaille	0,00	16,70			0,90	0,03						
Amidon pulpe											0,00	0,00
Betterave fanes											0,00	0,00
Betterave fourragère											0,00	0,00
Betterave sucrière											0,00	0,00
Blé											0,00	0,00
Blé grain											0,00	0,00
Boues de flotation	0,00	28,50			0,20	0,04						
Boues de STEP	0,00	28,50			0,20	0,04						
Brasserie déchets											0,00	0,00
Céréales poussières											0,00	0,00
Colza tourteau											0,00	0,00
Contenu de panse									0,00	0,00		

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Contenu de panse pressé									0,00	0,00		
Déchets de cuisine							0,00	4,20				
Déchets de légumes							0,00	4,20				
Déchets de sortie de silo											0,00	0,00
Déchets des marchés							0,00	4,20				
Déchets verts humides							0,00	4,20				
ensilage herbe											0,00	0,00
ensilage maïs											0,00	0,00
Estomac/intestin contenu									0,00	0,00		
Farine animale									0,00	0,00		
Feuillage							0,00	4,20				
Fines et spathes											0,00	0,00
Foin											0,00	0,00
Graisses	0,00	1,60	1,00	0,00	0,00	0,01						
Gruau de colza											0,00	0,00
Herbe de fauche sur jachère											0,00	0,00
Herbe fraîche											0,00	0,00
Jachères											0,00	0,00
Luzerne											0,00	0,00
Maïs											0,00	0,00
Maïs résidus											0,00	0,00
Marc de fruit							0,00	4,20				
Mélasse											0,00	0,00
Melon jus											0,00	0,00
Orge											0,00	0,00
paille											0,00	0,00
Paille de céréales											0,00	0,00
Paille de mais											0,00	0,00
Pain vieux											0,00	0,00
Pelouse							0,00	4,20				
Petit lait											0,00	0,00
Pomme de terre fanes											0,00	0,00
Pomme de terre pulpe											0,00	0,00
Poussière silos											0,00	0,00
Rafles d'automne											0,00	0,00
Rafles de printemps											0,00	0,00
Raisin marc distillé											0,00	0,00
Résidus de distillation de céréales											0,00	0,00
Résidus de distillation de pomme de terre											0,00	0,00
Seigle											0,00	0,00
Semences déclassées											0,00	0,00
séparateur de graisse (Fettabscheider)	0,00	1,60	1,00	0,00	0,00	0,01						

Tableau 6 : Facteurs d'émission de N_2O et CH_4 par substrat et par poste d'émission pour les filières de référence (en % N initial et % potentiel méthanogène, respectivement)

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

- Stockage et épandage des substrats agricoles

Les facteurs d'émission retenus ici sont issus de l'étude « Flux de gaz à effet de serre (CH_4, N_2O) et d'ammoniac (NH_3) liés à la gestion des déjections animales : Synthèse bibliographique et élaboration d'une base de données ». (BDGES)
Par comparaison avec la version 1 de Diges certains FE ont été remis à jour en fonction de la version finale de ce document. En effet, dans la version finale de BDGES d'Aout 2006, les FE de méthane au stockage ont été modifiés suite à une dernière réunion avec le groupe de travail. (voir Rapport final)
Dans cette étude les FE sont globalisés par poste d'émission et, parfois, par type de déjection. Les FE de protoxyde d'azote au stockage sont ainsi différentiés par type de déjection mais sont communs aux différentes espèces animales. Aucun facteur d'émission n'avait pu être défini pour les fientes. Pour ce cas particulier, nous appliquons un FE issu d'une référence bibliographique (Freibauer, 2003). Après conversion, on obtiendra un FE de 0,15. (cf. Rapport final BDGES)

Au stockage, les FE déterminés dans le cadre de cette étude sont retranscrits.
A l'épandage, les FE étaient de 0,9% du N épandu et 0,04% du potentiel méthanogène épandu. Il faut ici moduler ce FE en tenant compte de ce qui a été émis au stockage (FEref_épandage = 0,04* (100-FEref_stockage)/100). Le FE converti est également de 0,9% du N initial (émissions minimes au stockage). Pour le méthane, on obtient un facteur d'émissions de 0,04% ou de 0,03% du potentiel méthanogène initial selon les substrats.

- Substrats d'industries agro-alimentaires

Plusieurs substrats ont pour filière de référence l'intégration dans un nouveau process industriel pour la fabrication d'aliments (**co-produits de l'industrie de la pomme de terre, drêches de brasserie** et **lactosérum**). Comme évoqué précédemment, pour ces co-produits qui n'ont alors plus le statut de substrat, on ne comptabilise pas les émissions correspondantes et les facteurs d'émission à appliquer ont une valeur nulle.

De même, lorsque la filière de référence est l'incinération (cas des **graisses d'abattoir**), s'agissant d'une combustion de biomasse, les émissions de CO_2 ne sont pas comptabilisées et les émissions de CH_4 et N_2O sont considérées comme nulles.

Pour les **substrats de fruits et légumes**, il a été déterminé que la filière de référence était le stockage en CSD. En l'absence d'informations spécifiques sur ce substrat et étant donné qu'en conditions réelles il est stocké en mélange avec d'autres substrats, nous reportons ici les facteurs d'émission déterminés pour les biodéchets dans le même poste (voir ci-dessous).

Les facteurs d'émission pour l'épandage des **co-produits viticoles et vinicoles** sont issus de l'étude Cemagref-Ademe « Impacts environnementaux de la gestion biologique des substrats ». Il s'agit des valeurs de référence déterminées pour ce poste, applicables à tous les substrats. Le facteur d'émission de N_2O d'origine est de 2 g N / kg N épandu, soit 0,2% de la teneur en azote initiale du substrat. Le facteur d'émission de méthane est de 1 kg éq.CO_2/tMS, ce qui correspond après conversion à partir des données de composition du tableau 1, à une valeur de 0,025% du potentiel méthanogène initial.

En ce qui concerne les **boues de STEP industrielle**, en l'absence d'éléments spécifiques, on utilise les mêmes facteurs d'émission d'origine que pour les boues de stations d'épuration collectives (voir ci-dessous). Ces valeurs d'origine sont converties à partir des données de composition du tableau 1 pour obtenir les FE du tableau 6.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

- Substrats de collectivités

Pour les **biodéchets ménagers**, des émissions gazeuses, liées à la dégradation de la matière organique surviennent au cours du stockage en CSD. On considère que les émissions de protoxyde d'azote sont nulles étant donné que les processus de dégradation sont majoritairement anaérobies.

Le facteur d'émission du protoxyde d'azote est donc nul.

Pour déterminer les émissions de méthane dans l'air, on s'intéresse tout d'abord à la production qui a lieu au cours du stockage. Des valeurs de production de CH_4 en centres de stockage ont été recueillies dans la littérature scientifique (El Fadel, 1996 et Barlaz, 1990 d'après Ham, 1979). Il s'agit de mesures effectuées sur la totalité de la période de production de méthane, soit sur des périodes de 5 à 20 ans. En moyennant ces valeurs, ont obtient une production totale de méthane de 61,88 m^3CH_4/tMO.

Comme indiqué dans la définition de la filière de référence, on prend pour hypothèse un centre de stockage comportant des casiers à couverture semi-perméable et des casiers à couverture imperméable naturelle. Dans ce cas, on applique un taux de captage de 75%[28]. Par ailleurs, pour les CSD comportant des casiers avec couverture, la méthodologie EPER indique qu'il faut considérer un taux d'oxydation du méthane de 10%.

Les émissions de méthane dans l'air peuvent donc être calculées de la manière suivante :

Emissions CH_4 = Production CH_4 x (1- taux oxydation) x (1 – taux de captage)
Emissions CH_4 = 61,88 m^3CH_4/tMO x 90% x 25%
Emissions CH_4 = 13,9 m^3CH_4/tMO

Pour déterminer le facteur d'émission, on rapporte cette émission calculée au potentiel méthanogène initial des biodéchets, exprimé en m^3 par tonne de matière organique :

FE CH_4 = Emissions CH_4 / Potentiel méthanogène
FE CH_4 = 13,9 m^3CH_4/tMO / 331,5 m^3CH_4/tMO
FE CH_4 = 4,2%

Ce FE sera ensuite utilisé pour calculer les émissions de méthane, en tonnes d'équivalent CO_2 selon la formule simplifiée ci-dessous (voir le détail du calcul au 6.3.2.) :

CH_4 (t éq.CO_2) = tonnage (MB) x Potentiel Méthanogène (m^3CH_4 / tMB)
x FE CH_4 (% Pot. Méth.) x facteurs de conversion

Ce facteur d'émission est reporté pour les substrats de fruits et légumes ainsi que pour les **substrats verts** dont les filières de référence sont également la mise en CSD. Ces deux substrats composent en partie les biodéchets ménagers, c'est pourquoi on ne calcule pas de facteur d'émission spécifique à partir des données de composition.

Les facteurs d'émission relatifs aux **boues de STEP collectives** proviennent de différentes sources. Au stockage de ce substrat liquide, considérant les processus proches de ceux qui surviennent dans le cas de stockage de lisier (anaérobiose), on utilise un FE de N_2O de valeur nulle. Le facteur d'émission de CH_4 provient d'un document de travail interne de l'Ademe[29]. Sa valeur initiale est de 33 kg CH_4/tMS, ce qui donne 28,5% du potentiel méthanogène des boues de STEP urbaines, et 32,3% de celui des boues de STEP industrielles (cf. ci-dessus).

[28] ADEME. Outil de calcul des émissions dans l'air de CH_4, CO_2, SOx, NOx issues des centres de stockage de substrats ménagers et assimilés, 14/03/2003
[29] Document ADEME - C. Schubetzer & S.Wenisch /DDS Bilan « Effet de serre » d'un projet de méthanisation agricole - Déjections animales et co-substrats. 10/09/04

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Pour l'épandage des boues de STEP, les facteurs d'émission sont issus de l'étude « Impacts environnementaux de la gestion biologique des substrats ». Il s'agit des valeurs de référence, communes à tous les substrats : 2 gN-N_2O/kgN et 1 kg éq.CO_2/tMS, soit respectivement 0,2% du N initial et 0,04% du potentiel méthanogène initial. Après conversion à partir des données de composition, le facteur d'émission de méthane devient pour les boues de STEP industrielles 0,05% du potentiel méthanogène.

Pour les **graisses de STEP** et les **huiles et graisses usagées** les FE pour le traitement spécifique proviennent de l'étude « Impacts environnementaux de la gestion biologique des substrats ». Il s'agit de valeurs de référence qui présentent des limites. En effet, par manque de données, dans cette étude le traitement aérobie en phase liquide a été assimilé à du stockage. De plus, les chiffres obtenus proviennent uniquement de données concernant les déjections animales. On retient toutefois les facteurs d'émission de 1%N pour le protoxyde d'azote et de 0% pour le méthane.
Comme explicité précédemment, les postes stockage et épandage concernent ici en réalité les graisses en mélange avec les boues d'épuration. Cependant, afin de ne pas comptabiliser en double les émissions liées à la gestion des boues de STEP, on a ici déterminé des FE pour les boues issues du traitement spécifique des graisses. Ce traitement a permis d'abattre l'azote contenu dans le substrat initial. Après le traitement il n'y a donc plus d'azote dans ces boues, par conséquent les émissions de N_2O au stockage et à l'épandage sont nulles. Le FE correspondant à appliquer est donc égal à zéro.
Pour déterminer les émissions de CH_4 au stockage et à l'épandage à partir des mêmes FE initiaux que pour les boues de STEP (respectivement 33 kg CH_4/tMS et 1 kg éq.CO_2/tMS), les données contenues dans un rapport du Cemagref sur le traitement biologique aérobie des graisses[30] ont été utilisées. Ainsi, à partir des données de composition contenues dans ce rapport, on obtient un facteur d'émission de 1,6% du potentiel méthanogène initial des graisses au stockage et de 0,01% à l'épandage. Ces FE sont applicables aux graisses de STEP ainsi qu'aux huiles et graisses de restauration qui les constituent en partie.

- <u>Cultures énergétiques</u>

Comme indiqué précédemment dans le chapitre sur la composition des substrats, la mise en culture de plantes énergétiques est spécifique à la méthanisation. Ces cultures peuvent être effectuées sur des parcelles habituellement en jachère ou en substitution à des cultures habituellement vendues ou consommées par les animaux d'élevage ou encore faire partie des Cultures Intermédiaires Piège à Nitrate (CIPAN).
Comme on l'a vu pour les autres situations de référence, nous nous bornons à comparer les situations au cours du traitement et lorsque la situation de référence ne correspond pas à un traitement de déchet mais est intégré dans un autre processus de fabrication, nous ne considérons pas les GES émis.
En effet, nous ne nous situons pas dans une démarche véritable d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) avec une comptabilisation complète des émissions comparées des filières. Typiquement, l'impact des cultures énergétiques induisant une diminution des surfaces de cultures dédiées à l'alimentation et augmentant ainsi les importations de ces mêmes besoins alimentaires est un sujet de type ACV qui n'est pas intégré ici.

[30] Royer Cécile. Traitement biologique aérobie des graisses. Mémoire. Cemagref. 1998. Confidentiel

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

5. Les filières de production d'énergie de référence

Remarque préalable :
On rappelle que la production d'énergie thermique et électrique par la filière de digestion anaérobie a été abordée au point 3.1.2. Les quantités d'énergie finale[31] y ont été calculées.
On calcule ici les émissions gazeuses qui auraient été liées à la production de ces mêmes quantités par les filières de production d'énergie de référence.

5.1. Energie thermique

5.1.1. Principes de calcul des émissions gazeuses

On cherche à savoir quelles auraient été les émissions de gaz à effet de serre, si la quantité d'énergie thermique finale produite par l'installation de digestion anaérobie avait été produite à partir d'un autre combustible plus classique.
La situation de référence se définit ainsi en fonction du ou des combustibles qui auraient été utilisés pour produire cette même quantité d'énergie thermique.

La quantité d'énergie thermique finale produite par l'installation de digestion anaérobie a été calculée précédemment. Elle se compose de

- l'énergie thermique consommée sur place (hors consommation liée au process de digestion anaérobie), c'est à dire sur l'habitation, l'exploitation agricole, etc.
- l'énergie thermique vendue à un tiers (industriel, réseau de chaleur, etc.).

Ces quantités sont renseignées par l'utilisateur de DIGES ou calculées à partir des pourcentages du tableau 4 sur l'utilisation de l'énergie thermique (cf. 3.1.2.).

Pour l'utilisation du calculateur DIGES, une situation de référence doit être définie pour chacune des deux utilisations : consommation sur place et vente.
L'utilisateur choisit ainsi, pour une installation donnée, le ou les combustibles qui correspondent à la situation de référence et indique en quelle proportion ils sont utilisés dans ce scénario. L'utilisateur pourra par exemple indiquer que la chaleur utilisée sur place se substitue à celle produite auparavant par la chaudière au fioul de l'habitation, ou que celle vendue l'est à un industriel voisin qui utilisait auparavant une chaudière au gaz naturel.
Une situation de référence par défaut est également proposée, dans le cas où l'utilisateur n'aurait pas ces informations. On retient par convention un scénario avec 50% de gaz naturel et 50% de fuel lourd[32] (cf. Tableau 7).

Combustibles utilisés antérieurement		
Combustibles	**pour l'énergie thermique consommée sur place (%)**	**pour l'énergie thermique vendue (%)**
essence	0,0	0,0
gazole	0,0	0,0
fuel lourd	50,0	50,0
gaz naturel	50,0	50,0
kérosène	0,0	0,0
charbon	0,0	0,0
GPL	0,0	0,0
Total	**100**	**100**

Tableau 7 : Combustibles et pourcentages de substitution utilisés par défaut pour la situation de référence de production d'énergie thermique

[31] livrée au consommateur (c'est à dire ici = totale produite – autoconsommée par le process)
[32] déterminé par l'ADEME

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

5.1.2. Facteurs d'émission correspondants

Le tableau 8 présente les facteurs d'émission des différents combustibles que l'on pourrait rencontrer dans un scénario de référence. Ils sont issus d'une note de l'ADEME[33].
Les « substrats ménagers » ont été enlevés de cette liste car, dans la réalité, il est peu probable qu'une unité de digestion anaérobie se substitue à une unité d'incinération de substrats ménagers.

Energie thermique	Emissions de GES par combustible (g CO_2 / kWh)
essence	264
gazole	271
fuel lourd	282
gaz naturel	206
kérosène	267
charbon	343
GPL	231

Tableau 8 : Facteurs d'émission par combustible pour la production d'énergie thermique

5.2. Energie électrique

5.2.1. Principes de calcul des émissions gazeuses

On considère l'énergie électrique utile produite par l'installation de digestion anaérobie, comme se substituant à la même quantité d'énergie électrique qui aurait été utilisée en l'absence de cette installation.
On rappelle que l'énergie électrique utile est la somme de l'énergie électrique utilisée sur place (hors autoconsommation) et de l'énergie électrique vendue.
Ces quantités sont renseignées par l'utilisateur de DIGES ou calculées à partir des pourcentages du tableau 4 sur l'utilisation de l'énergie électrique (cf. 3.1.2.).

On ne raisonne plus ici en considérant une substitution à une source d'énergie, comme c'était le cas pour l'énergie thermique, mais on considère l'usage pour lequel l'énergie électrique est consommée. En effet, conformément à une note résultant d'une convention entre l'Ademe et EDF[34], le contenu CO_2 du kWh se différentie par usage.
Dans un souci de simplification, on considère que l'énergie électrique, quelle que soit son utilisation, se substitue à la même quantité d'énergie utilisée auparavant pour un usage national moyen.

5.2.2. Facteur d'émission correspondant

On utilise le facteur d'émission global correspondant à un usage moyen national, de 75 g CO_2/kWh, défini par la note de cadrage sur le contenu CO_2 du kWh en France.

Energie électrique	Emissions de GES par usage (g CO_2 / kWh)
CONTENU MOYEN NATIONAL	75

Tableau 9 : Facteur d'émission utilisé pour la production d'énergie électrique

[33] ADEME - Facteurs d'émission de dioxyde de carbone pour les combustibles - Les chiffres ADEME à utiliser. 2005
[34] Ademe-RTE - Note de cadrage sur le contenu CO2 du kWh d'usage en France - 8 octobre 2007

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

6. Un calcul en plusieurs étapes

6.1. Le principe du calcul par bilan

Le bilan effet de serre d'un projet de digestion anaérobie est calculé en comparant les émissions de gaz à effet de serre liées à ce projet, à celles qui auraient été émises dans le cas d'un scénario de référence, pour le traitement des substrats et la production d'énergie. Il s'agit d'un calcul en plusieurs étapes (Schéma 13) dont le contenu est détaillé ci-après.
Le scénario de référence s'entend dans le sens de « ce qui aurait existé en l'absence de digestion anaérobie » et non de scénario le plus courant.

Le calcul de ce bilan s'effectue selon les étapes suivantes :

- les gaz à effet de serre (GES) émis par l'installation de Traitement par Digestion Anaérobie,
- les GES émis par les transports liés à l'approvisionnement en substrats de l'installation de digestion anaérobie (transport des substrats vers l'unité puis transport du digestat),
- les GES évités qui auraient été émis par une filière traditionnelle de traitement des substrats (traitement de référence),
- les GES évités qui auraient été émis par les transports dus au traitement de référence (transport vers l'unité de traitement de référence),
- les GES évités qui auraient été émis par une filière de production d'énergie de référence (substitution d'énergie),
- les GES évités liés à l'épandage du digestat (économie d'engrais minéral réalisée par le pouvoir fertilisant du digestat).

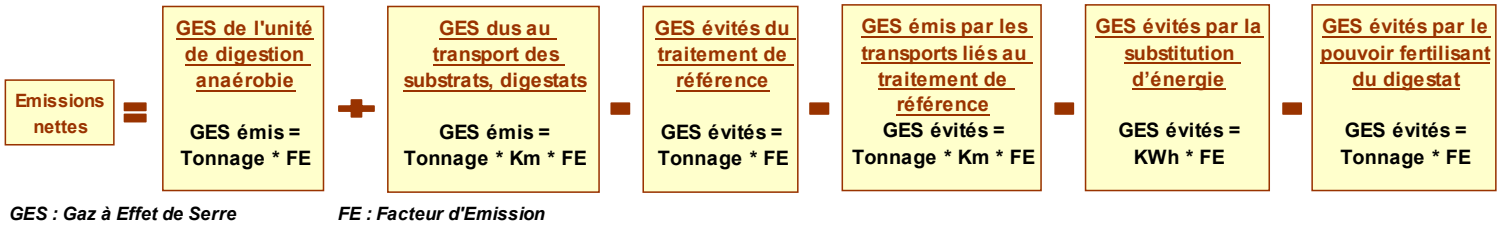

Schéma 13 : Les étapes du calcul par bilan

6.2. Les données complémentaires nécessaires au calcul

Les données nécessaires au calcul du bilan « effet de serre » ont été évoquées dans les parties précédentes sur la filière de digestion anaérobie, le traitement des substrats dans la filière de référence et la production d'énergie de référence. Elles sont reprises dans les formules développées par la suite.
Nous précisons que ces valeurs de PRG sont issues de l'IPCC 2005 et calculées pour une référence de 100 ans.
A ces données s'ajoutent les coefficients de conversion de N_2O et CH_4 en équivalent CO_2, du tableau 10.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

	g CO_2 par g de N_2O ou g de CH_4	g CO_2 par g de N ou g de C
N_2O	298	468,29
CH_4	25	33,33

Tableau 10 : Facteurs de conversion de N_2O et CH_4 en équivalent CO_2 (IPCC 2005)

6.3. Les étapes du calcul

Les principes de calcul aux six étapes exposées dans le schéma 13 ont déjà été expliqués dans les parties précédentes du rapport.
Il s'agit ici de détailler les formules de calcul qui permettent d'établir le bilan effet de serre.

6.3.1. Quantités de gaz à effet de serre émises par la filière de traitement par digestion anaérobie

Les quantités de gaz à effet de serre émis dans l'air par la filière digestion anaérobie sont comptabilisées pour chaque substrat et pour chaque poste d'émission.
Les étapes du calcul sont présentées ci-après.

Quantités de N_2O en t éq CO_2 :

$$= \Sigma_{substrat} (\Sigma_{poste} (\text{tonnage} * \text{teneur en N} * FE_{N2O\ meth} * 1/1000 * 468{,}29))$$

+

Quantités de CH_4 en t éq CO_2 :

$= \Sigma_{substrat}$ (émissions Pré-stockage + émissions Post-stockage + émissions Epandage)

Avec **:**

Emissions du poste Pré-stockage :

$$t * Pot.Méth. * FE_{CH4\ meth\ pré\text{-}s.} * (100 - \%\ CH_4\ récup.Pré\text{-}st.) * 16/24{,}05 / 1000 * 25$$

Emissions du poste Post-stockage :

$$t * Pot.Méth. * FE_{CH4\ meth\ post\text{-}s} * (100 - \%\ CH_4\ récup.Post\text{-}st.) * 16/24{,}05 / 1000 * 25$$

Emissions du poste Epandage :

$$t * Pot.Méth. * FE_{CH4\ meth\ ép.} * 16/24{,}05 * 1/1000 * 25$$

=

Quantité de GES émis, en tonnes de CO_2 pour la filière de **digestion anaérobie** (1)

Avec :

- t : tonnage de matière brute
- teneur en N : en kg N / tMB
- $FE_{N2O\ meth}$: facteurs d'émission de N_2O pour la filière digestion anaérobie, en % N
- 468,29 g CO_2/g N : facteur de conversion du N_2O en équivalent CO_2
- Pot.Méth. : potentiel méthanogène en m^3CH_4/tMB
- $FE_{CH4\ meth\ pré\text{-}s.}$: facteur d'émission de CH_4 pour la filière digestion anaérobie au pré-stockage des substrats, en %potentiel méthanogène
- $FE_{CH4\ meth\ post\text{-}s.}$: facteur d'émission de CH_4 pour la filière digestion anaérobie au post-stockage du digestat, en %potentiel méthanogène
- $FE_{CH4\ meth\ ép.}$: facteur d'émission de CH_4 pour la filière digestion anaérobie à l'épandage du digestat, en %potentiel méthanogène
- % CH_4 récup. Pré-st. : part du CH_4 produit au cours du pré-stockage des substrats et récupéré pour valorisation énergétique (0% si stockage non couvert ou si stockage couvert sans récupération, 100% si stockage couvert)
- % CH_4 récup. Post-st. : part du CH_4 produit au cours du post-stockage du digestat et récupéré pour valorisation énergétique (0% si stockage non couvert ou si stockage couvert sans récupération, 100% si stockage couvert)
- 16/24,05 : ratio de conversion des m^3 de CH_4 en kg de CH_4
- 25 gCO_2/ gCH_4 : facteur de conversion du CH_4 en équivalent CO_2

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Les facteurs d'émission utilisés sont ceux du tableau 5 (partie 3.2.). Le facteur d'émission de méthane du poste « digestion anaérobie » correspond à la totalité du méthane produit. On considère qu'il n'y a pas de fuite au niveau du digesteur et que la totalité du méthane produit est valorisé pour la production énergétique. Les émissions dans l'air sont donc nulles et le poste digestion anaérobie n'est pas concerné par le calcul.
Le stockage des substrats avant digestion (pré-stockage) ainsi que le stockage du digestat après digestion (post-stockage) peuvent être couverts ou non, avec ou sans récupération du biogaz produit. Les formules de calcul sont les mêmes, en utilisant les paramètres suivants en fonction des cas:

- stockage couvert avec récupération du biogaz : % CH_4 récup. = 100% ;
- stockage non couvert, la totalité du biogaz est émis dans l'air : % CH_4 récup. = 0%
- stockage couvert sans récupération du biogaz, la totalité du biogaz est émis dans l'air : % CH_4 récup. = 0%

6.3.2. Quantités de gaz à effet de serre émis liés au transport des substrats et des digestats

➢ L'utilisateur peut indiquer la distance parcourue (km) afin d'acheminer les substrats vers l'unité de digestion anaérobie. Après avoir enquêté quelques installations de méthanisation en fonctionnement, il s'avère que le matériel le plus fréquemment utilisé possède une charge utile de 10-15 tonnes. Une installation de taille importante utilise également des semi-remorques de 38t avec une charge utile de 25 tonnes pour certains co-substrats. Afin de se placer dans le cas le plus fréquemment rencontré et pour prendre en compte le facteur d'émission le plus « pénalisant », la méthode de calcul retenue se base sur un facteur d'émission du Bilan Carbone ® de 261,3 g C/km (tableau n°78 du guide des facteurs d'émission du Bilan Carbone) soit 958 g CO_2/km. Ce facteur d'émission est spécifique à la classe de PTAC correspondant aux tracteurs routiers de PTAC de 11 à 19t. Il nous parait donc bien adapté pour une estimation correcte des émissions liées au transport des substrats assez divers qui peuvent être rencontrés. Ce facteur d'émission correspond à une moyenne pour tous types de parcours, en charge ou à vide. La charge maximale utile moyenne pour cette classe de PTAC est de 11,62 t (tableau n°74 du guide des facteurs d'émission du Bilan Carbone). On prendra en considération cette charge utile moyenne pour le calcul du nombre de trajets nécessaires à l'acheminement des substrats. Le calcul s'écrit comme suit :

Quantités de C en t éq CO_2 :

$$= \Sigma_{substrat} \text{ (arrondisup(tonnage/11.62) * 2 * dist * FE}_{CO2\ km}\text{)} \quad (2)$$

L'utilisateur peut également indiquer une distance parcourue (km) afin d'acheminer le digestat vers sa valorisation finale. Afin de tenir compte de l'abattement de matière lié au processus de digestion anaérobie, le calcul s'écrit :

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Quantités de C en t éq CO_2 : (2)

= $\Sigma_{substrat}$ (arrondisup((tonnage - tonnage* MO_biod/MO * %MO/MB) / 11.62) * 2 * dist * FE $_{CO2km}$)

Avec :

- tonnage : quantité de substrat transporté
- arrondisup() : arrondi à l'entier supérieur pour calculer le nombre d'aller retour réels
- dist : distance à parcourir en km
- 2 : afin de tenir compte du trajet de retour à vide du véhicule
- MO_biod/MO : pourcentage correspondant à la matière organique biodégradable dérivé du potentiel méthanogène
- %MO/MB : teneur en matière organique de la matière brute
- FE $_{CO2km}$: facteur d'émission de CO_2 par km pour un tracteur routier ayant une charge utile moyenne de 11.62 t (= 958 gCO_2/km)

6.3.3. Quantités de gaz à effet de serre évitées relatives à la filière de traitement de référence

Le principe du calcul est le même que pour la filière de digestion anaérobie. Les quantités de GES évitées par la substitution à la filière de traitement de référence, sont comptabilisées pour chaque substrat et chaque poste d'émission, selon les formules suivantes.

Quantités de N_2O en t éq CO_2 :

= $\Sigma_{substrat}$ (Σ_{poste} (tonnage * teneur en N * FE $_{N2O\ ref}$ * 1/1000 * 468,29))

+

Quantités de CH_4 en t éq CO_2 :

= $\Sigma_{substrat}$ (Σ_{postes} (tonnage * Pot. Méth. * FE$_{CH4\ ref}$ * 16/24,05 * 1/1000 * 25)

=

Quantité de GES évités, en tonnes de CO_2 pour le **traitement de référence** (3)

Avec :

- tonnage : en matière brute
- teneur en N : en kg N / tMB
- FE $_{N2O\ ref}$: facteurs d'émission de N_2O pour la filière de référence, en % N
- 468,29 g CO_2/g N : facteur de conversion en équivalent CO_2
- Pot. Méth. : potentiel méthanogène en m^3CH_4/tMB
- FE $_{CH4\ ref}$: facteurs d'émission de CH_4 pour la filière de référence, en %potentiel méthanogène
- 16/24,05 : ratio de conversion des m^3 de CH_4 en kg de CH_4
- 25 gCO_2/ gCH_4 : facteur de conversion du CH_4 en équivalent CO_2

Les facteurs d'émission utilisés sont ceux du tableau 6 (cf. section 4.4.).

6.3.4. Quantités de gaz à effet de serre évitées relatives au transport des substrats de la filière de référence

Il s'agit du même calcul qu'au § 6.3.2.

Quantités de C en t éq CO_2 : (4)

= $\Sigma_{substrat}$ (arrondisup(tonnage/11.62) * 2 * dist * FE $_{CO2\ km}$)

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

6.3.5. Quantités de gaz à effet de serre évitées relatives à la filière de production d'énergie de référence

Pour pouvoir calculer les émissions évitées grâce à l'unité de digestion anaérobie, il est nécessaire de connaître les quantités d'énergie thermique et électrique valorisées par cette unité, ainsi que leurs modes d'utilisation.

1) Calcul de la quantité d'énergie annuelle valorisée

Les formules développées ci-dessous retranscrivent la méthode de calcul de l'énergie valorisée exposée dans la partie 3.1.2. (cf. notamment le schéma 2).
Les quantités d'énergie électrique et thermique valorisées peuvent être soit saisies par l'utilisateur de DIGES, soit calculées à partir de la quantité de méthane valorisable et des hypothèses par défaut, en deux étapes, selon les formules ci-dessous :

a/ Quantité de méthane valorisable énergétiquement (m^3 CH_4) :

= (CH_4 produit digesteur + CH_4 récupéré pré-stockage + CH_4 récupéré post-stockage)

= (**t * Pot.Méth.* $FE_{CH4meth\ dig}$**) + (**t * Pot.Méth.* $FE_{CH4meth\ pré\text{-}s}$* %$CH_4$récup.Pré-st.**) +
(**t * Pot.Méth * $FE_{CH4\ meth\ post\text{-}s}$* % CH_4 récup.Post-st.**)

Avec :
- t. : tonnage de substrat, en matière brute
- Pot.Méth. : potentiel méthanogène en m^3CH_4/tMB
- $FE_{CH4\ meth\ dig}$: facteur d'émission de CH_4 au cours de la digestion, en % potentiel méthanogène
- $FE_{CH4\ meth\ Pré\text{-}st.}$: facteur d'émission de CH_4 au pré-stockage, en % potentiel méthanogène
- $FE_{CH4\ meth\ Post\text{-}st.}$: facteur d'émission de CH_4 au post-stockage, en % potentiel méthanogène
- % CH_4 récup. Pré-st. : part du CH_4 produit au cours du pré-stockage des substrats et récupéré pour valorisation énergétique
- % CH_4 récup. Post-st. : part du CH_4 produit au cours du post-stockage du digestat et récupéré pour valorisation énergétique

Le méthane produit au cours du stockage des substrats avant digestion (pré-stockage) et du digestat après digestion (post-stockage) peut être récupéré pour la valorisation énergétique dans le cas d'un stockage couvert avec récupération du biogaz. Dans le cas le plus fréquent, le pré-stockage n'est pas couvert et le post-stockage est couvert avec récupération du biogaz, ce qui permet également de disposer d'un complément de stockage du biogaz produit par le digesteur. Cela se traduit dans les formules de calcul par l'utilisation des paramètres suivants, en fonction du cas de figure :
- Stockage couvert avec récupération du biogaz : % CH_4 récup. = 100%
- Stockage non couvert : % CH_4 récup. = 0%
- Stockage couvert sans récupération du biogaz : % CH_4 récup. = 0%

b/ Quantité d'énergie valorisée, électrique et thermique, en kWh (co-génération) :

Energie électrique ($E_{élec.}$ en kWh)	Energie thermique (E_{therm} en kWh)
= énergie primaire * Rdt élect.	= énergie primaire * Rdt therm.
= (CH_4 valorisable * 9,94kWh/m^3 * 95%) * 30%	= (CH_4 valorisable * 9,94kWh/m^3 * 95%) * 35%

Avec :
- CH_4 valorisable en m^3, calculé à l'étape précédente
- 9,94 kWh / m^3CH_4 = facteur de conversion du méthane en énergie primaire
- 95% : part de l'énergie primaire qui est valorisable (les 5% restants sont perdus par torchère)
- Rdt élect. : rendement de transformation de l'énergie primaire en énergie électrique : 30% en co-génération, 30% en tout électrique, 0% en tout thermique
- Rdt therm. : rendement de transformation de l'énergie primaire en énergie thermique. 35% en co-génération, 0% en tout électrique, 80% en tout thermique

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

2) Utilisation de l'énergie valorisée

Les quantités d'énergie électrique ($E_{élec.}$) et thermique (E_{therm}) valorisées ont été saisies directement en kWh par l'utilisateur ou calculées par DIGES.
Après cette étape, l'utilisateur a la possibilité de préciser le mode d'utilisation de cette énergie : part de l'énergie électrique et de l'énergie thermique autoconsommées par le process, exportées pour être vendues à un tiers et consommées sur place (cf. 3.1.2.3.).
On s'intéresse ici à l'énergie finale, c'est à dire aux parts exportées et consommées sur place (soit le total produit, moins l'autoconsommation).
Les calculs ci-dessous font apparaître les pourcentages utilisés par défaut (cf. tableau 4, partie 3.1.2.3.). Ils sont modifiables par l'utilisateur.

Energie électrique exportée (kWh)
= $E_{élec.}$ * % $E_{élec.}$ exportée
= $E_{élec.}$ * 40%

Energie électrique consommée in situ (kWh)
= $E_{élec.}$ * % $E_{élec.}$ in situ
= $E_{élec.}$ * 40%

Energie thermique exportée (kWh)
= E_{therm} * % E_{therm} exportée
= E_{therm} * 40%

Energie thermique consommée in situ (kWh)
= E_{therm} * % E_{therm} in situ
= E_{therm} * 40%

Avec :
- $E_{élec.}$: quantité d'énergie électrique valorisée, en kWh
- % $E_{élec.}$ exportée : pourcentage de l'énergie électrique valorisée qui est exportée (vente)
- % $E_{élec.}$ in situ : pourcentage de l'énergie électrique valorisée qui est consommée sur place
- E_{therm} : quantité d'énergie thermique valorisée, en kWh
- % E_{therm} exportée : pourcentage de l'énergie thermique valorisée qui est exportée (vente)
- % E_{therm} in situ : pourcentage de l'énergie thermique valorisée qui est consommée sur place

3) Calcul de la quantité de GES évitée relative à la production d'énergie

Le calcul des émissions gazeuses évitées est réalisé à partir des quantités d'énergie par usages calculées ci-dessus.
On rappelle que pour l'énergie électrique, le calcul est effectué par rapport à un usage national moyen de l'électricité. Pour l'énergie thermique, il est réalisé en fonction des combustibles qui auraient été utilisés antérieurement pour la production des mêmes quantités de chaleur. Ces combustibles et leur part d'utilisation sont renseignés par l'utilisateur de DIGES si ce dernier possède ces informations. Dans le cas contraire le scénario par défaut est utilisé.
Ces émissions sont calculées selon les formules ci-dessous :

GES évités relatifs à l'énergie électrique (t éq. CO_2)
= (Electricité exportée + Electricité in situ) * 75 g/kWh * 1.10^{-6}

\+

GES évités relatifs à l'énergie thermique (t éq. CO_2)
= E. therm. exportée * $\Sigma_{combustible}$ (% substitution $_{therm.\ exp.}$ * FE $_{combustible}$*1.10^{-6})
+ E. therm. in situ * $\Sigma_{combustible}$ (% substitution $_{therm.\ in\ situ}$* FE $_{combustible}$*1.10^{-6})

=

Quantité de GES évités, en tonnes de CO_2 pour la **substitution d'énergie** (5)

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

- Electricité exportée : quantité d'énergie électrique exportée (vendue), calculée à l'étape précédente, en kWh
- Electricité in situ : quantité d'énergie électrique consommée sur place, calculée à l'étape précédente, en kWh
- 75 g/kWh : contenu national moyen du kWh d'usage en France
- E. therm. Exportée : quantité d'énergie thermique exportée (vendue), calculée à l'étape précédente, en kWh
- E. therm. in situ : quantité d'énergie thermique consommée sur place, calculée à l'étape précédente, en kWh
- % substitution $_{therm.\ exp.}$: part de chaque combustible dans la production d'une quantité de chaleur identique à celle qui est valorisée par l'unité de digestion anaérobie et exportée
- % substitution $_{therm.\ in\ situ}$: part de chaque combustible dans la production d'une quantité de chaleur identique à celle qui est valorisée par l'unité de digestion et consommée in situ
- FE $_{combustible}$: facteur d'émission de GES, par combustible, en g CO_2/kWh

6.3.6. GES évités par le pouvoir fertilisant du digestat

« Au cours de la digestion, les 2/3 de la matière organique biodégradable sont transformés en biogaz…La transformation des 2/3 de la matière organique en conditions anaérobies entraîne une minéralisation de l'azote dans les mêmes proportions. Lors de la digestion, la minéralisation (et la conservation) de l'azote et du phosphore, la diminution de la teneur en matière sèche et la diminution de la phytotoxicité des substrats ont des conséquences positives sur la valeur fertilisante du digestat. » (René Moletta, « La Méthanisation »)

Le bilan carbone ® indique un facteur d'émission de 1.11kg C émis (soit 4.07 kg eq CO2) pour 1 kg d'ammonitrate produit. Le calcul de l'économie d'engrais réalisée s'écrit comme suit :

Quantités de N en t éq CO_2 :

$$= \Sigma_{substrat}\ (tonnage * N * MO_biod/MO * FE_N) \quad (6)$$

Avec :
- tonnage : tonnage de matière brute
- N : teneur du substrat en azote en kg par tonne de MB
- MO_biod/MO : pourcentage de matière organique biodégradable
- FE $_N$: facteur d'émission pour la production d'un kg d'ammonitrate

Afin de tenir compte de l'effet fertilisant direct des déjections animales qui aurait eu lieu en l'absence de digestion anaérobie, la formule ci-dessus est modifiée comme suit pour les substrats suivants :

Cas des lisiers :

L'effet fertilisant direct d'un lisier brut est non négligeable. Il peut être variable suivant la composition de lisier. Nous retiendrons ici une valeur de l'effet fertilisant direct moyenne de 50% de la teneur en N total[35]. La formule de calcul devient :

Quantités de N en t éq CO_2 :

$$= \Sigma_{substrat}\ (tonnage * N * 50\% * MO_biod/MO * FE_N) \quad (6)$$

[35] *Source : brochure "Fertiliser avec les engrais de ferme", IE – ITAVI – ITP, 2001, moyenne des lisiers*

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Cas des fumiers :
L'effet fertilisant direct d'un fumier est moins important. Nous retiendrons ici une valeur de l'effet fertilisant direct de 25% de la teneur en azote total[36]. Il reste donc 75% de l'azote total qui est à prendre en compte pour ce calcul.

Quantités de N en t éq CO_2 :
$= \Sigma_{substrat}$ (tonnage * N * 75% * MO_biod/MO * FE $_N$) 6

Cas des boues:
L'épandage étant le traitement de référence pour les boues de STEP industrielles et urbaines, nous choisirons par analogie la même formule que pour le cas des lisiers.

Pour tous les autres substrats, c'est la première formule qui s'applique, ceux-ci n'étant pas utilisés à l'épandage dans le cadre du traitement de référence.

Nous noterons, après avoir testé l'outil, que cette partie donne des résultats non négligeables dans le bilan GES global. Il convient de préciser que cet effet environnemental positif ne peut être obtenu qu'après une substitution réelle d'engrais minéral par l'apport au sol de ce digestat de méthanisation.
En effet, les contraintes techniques rendant difficiles l'épandage sur certaines cultures ne sont par exemple pas abordées. Par ailleurs, il est bien sûr fortement conseillé d'adopter un système d'épandage limitant les pertes d'azote par volatilisation d'ammoniac (épandage localisé en surface ou par enfouissement superficiel ou profond).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

[36] *Source : brochure "Fertiliser avec les engrais de ferme", IE – ITAVI – ITP, 2001,* moyenne des *fumiers*

6.3.7. *Le bilan effet de serre d'un projet de digestion anaérobie*

Le bilan est établit selon la formule présentée en début de chapitre :

	Quantité de GES émis, en tonnes de CO_2 pour la filière de **digestion anaérobie** (1)
+	**Quantité de GES émis, en tonnes de CO_2** par les transports liés à l'approvisionnement en substrats de l'installation de **digestion anaérobie** (2)
−	**Quantité de GES évités, en tonnes de CO_2** pour le **traitement de référence** (3)
−	**Quantité de GES émis, en tonnes de CO_2** par les transports liés au **traitement de référence** (4)
−	**Quantité de GES évités, en tonnes de CO_2** pour la **substitution d'énergie** (5)
−	**Quantité de GES évités, en tonnes de CO_2** pour l'économie d'engrais minéral liée au pouvoir fertilisant du digestat pour la filière de **digestion anaérobie** (6)
=	**Emissions nettes, en tonnes de CO_2**

7. Eléments de discussion

La version 2.0 du calculateur DIGES propose une première évaluation du bilan effet de serre pour des unités de digestion anaérobie. Certains points ont été améliorés par rapport à la 1ère version de ce calculateur avec notamment l'intégration d'une liste de substrats plus complète et l'estimation des émissions liées au transport des substrats ainsi que la prise en compte du pouvoir fertilisant du digestat.

Ce bilan est perfectible car, si la méthodologie d'élaboration du bilan est bien établie, certains points mériteraient d'être améliorés et approfondis dans les versions ultérieures du calculateur :

- Calcul des émissions :
  - Dans le cas d'une digestion anaérobie avec plusieurs co-substrats, le calcul des émissions dans l'air et des productions de gaz ne tient pas compte des interactions possibles entre les substrats (inhibitions ou synergies). Les émissions totales correspondent à la somme des émissions relatives à chacun des substrats.

- Disponibilité des données :
  Que ce soit pour les données de composition ou les facteurs d'émission, les sources exploitées n'ont pas toujours fourni les informations recherchées. Certaines informations sont en effet très peu abordées dans la littérature. L'étude « Impacts environnementaux de la gestion biologique des substrats » avait d'ailleurs également fait ressortir ce constat, pour la plupart des filières de traitement biologique. Ceci explique le fait que cette étude ait été peu citée, bien qu'elle semblait à priori constituer une source majeure d'informations.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

On a donc procédé par extrapolation ou comparaison pour combler les lacunes. Ces choix, rappelés ci-dessous, peuvent être critiquables et les données qui en sont issues devront être validées ou remplacées dans les prochaines versions du calculateur :

- En l'absence de données disponibles dans les sources exploitées, certaines données de composition ont été déterminées à dire d'experts : les potentiels méthanogènes des biodéchets et des substrats verts, la teneur azotée des fientes de volailles. Par ailleurs, la teneur azotée des graisses de STEP a été utilisée pour les huiles et graisses de restauration en l'absence d'informations sur ce substrat.
- Il n'a pas toujours été possible de disposer de facteurs d'émission spécifiques pour chacun des postes d'émissions et chacun des substrats choisis. Par conséquent, dans certains cas des extrapolations directes ont été faites (application du même FE) : d'un type de substrat à un autre (exemple : digestion anaérobie des déjections animales avec extrapolation aux autres substrats).
  Dans d'autres cas, l'extrapolation a nécessité un recalcul des facteurs d'émission : extrapolation d'un substrat à un autre par conversion du FE d'origine en utilisant les potentiels méthanogènes spécifiques aux substrats (exemple : épandage des boues de STEP industrielles et collectives), ou extrapolation en tenant compte des émissions aux postes précédents par un calcul par bilan matière (exemple : épandage dans la filière de digestion anaérobie ; épandage des graisses de STEP dans la filière de référence).
  Enfin, parfois, en raison d'indisponibilité dans la littérature, il a fallu procéder par comparaison des niveaux d'émission entre la filière de référence et la filière de digestion anaérobie (facteur d'émission du lisier brut utilisé pour l'estimation du facteur d'émission du post-stockage du digestat, avec ensuite extrapolation aux autres substrats).

➢ Validité des données

- Il est important d'attirer l'attention sur le fait qu'une incertitude peut exister sur les données issues des sources exploitées.
  On se rend compte en effet qu'il peut exister des confusions entre certains concepts, notamment entre production de méthane ou de biogaz d'une part et le potentiel méthanogène d'autre part, le premier étant une performance réelle mesurée dans un digesteur, le deuxième étant un maximum théorique de production et le rapport de l'un sur l'autre nous donnant le facteur d'émission.
  Les mesures de potentiels méthanogènes sont généralement réalisées à 20℃ et 1 atmosphère (conditions standards de température et de pression). Pour comparer, réaliser des calculs ou simplement compiler des potentiels méthanogènes, il faudrait qu'ils correspondent à des mesures effectuées dans les mêmes conditions opératoires. Or cette information n'est pas toujours précisée dans les publications. Ces données ont toutefois été utilisées, en l'absence parfois d'autres informations disponibles.
- Par ailleurs, le choix de certaines données pourrait être revu dans de futures versions de DIGES. Par exemple, pour les émissions de CH_4 en provenance des CSD, le facteur d'émission a été déterminé à partir d'une sélection de données issues de deux publications. Si une valeur plus appropriée, par exemple utilisée comme référence par l'Ademe, existe ou est amenée à exister, il est souhaitable de l'utiliser.
  Cette observation est valable pour toutes les données du calculateur qui devront être mises à jour en fonction de l'évolution des connaissances et de l'adoption ultérieure par l'Ademe de valeurs référence dans ses autres documents et outils.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

ANNEXES

ANNEXE 1 : Données de composition collectées pour chaque substrat et choix réalisés
ANNEXE 2 : Références bibliographiques

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

ANNEXE 1 : Données de composition collectées pour chaque substrat et choix (DIGES version1)

type de substrat	détail	MS								
		doc (1)	doc (4)	PNR	Cemagref	IMPACTS	expert	ADEME	CNB	**choix**
		en %MB (nombre de valeurs)								
déchets agricoles	fumier bovin	19,5 (1)	22 (1)	17,8 (12)		22 (nd)				**18,47**
	fumier porcin	22,5 (1)	24 (1)	22,5 (2)		24 (nd)				**23,10**
	fumier de volailles	-	41 (1)	10,25 (1)		41 (nd)	70 (4)			**64,20**
	lisier bovin	8,7 (1)	11 (1)	9,1 (12)	6,4 (23)	11 (nd)				**7,56**
	lisier porcin	5,8 (1)	6 (1)	5,7 (11)	4,45 (72)	6 (nd)				**4,66**
	fientes de volailles	13,9 (1)		20,7 (6)			25 (1)			**20,39**
déchets d'IAA	co-produits ind. P.d.t	13,6 (1)		20,7 (19)						**20,70**
	drèches de brasserie	20,2 (1)		27,9 (11)						**27,90**
	fruits et légumes	14,9 (1)		14,8 (9)						**14,80**
	co-produits viti-vinicoles	37,5 (1)		57 (3)						**57,00**
	graisse d'abattoir	32,3 (1)		25,17 (6)						**25,17**
	lactosérum	5,4 (1)		5,4 (1)						**5,40**
	boues de STEP (IAA)			7 (1)		12 (nd)				**9,50**
déchets de collectivités	biodéchets ménagers	59,1 (1)	36 (1)	- (0)			40 (1)	36,7 (1)		**36,70**
	déchets verts	50,1 (3)		48 (14)						**48,37**
	boues de STEP (coll.)	16,3 (1)	20 (1)	4,35 (2)		-			5 (2)	**5,00**
	graisses de STEP			42,13 (4)	36,00					**40,90**
	huiles, graisses restauration	42,1 (1)		50 (1)						**46,05**

type de substrat	détail	N							
		doc (4)	PNR	Cemagref	IMPACTS	expert	ADEME	CNB	**choix**
		en kgN/t brut (nombre de valeurs)							
déchets agricoles	fumier bovin	4,796 (1)	5,38 (1)		4,84 (nd)				**5,0**
	fumier porcin	6,792 (1)	9 (1)		6,72 (nd)				**7,5**
	fumier de volailles	23,6 (1)	-		23,8 (nd)	27 (4)			**25,90**
	lisier bovin	4 (1)	3,2 (2)	2,53 (23)	3,96 (nd)				**2,7**
	lisier porcin	4,998 (1)	3,48 (2)	5,34 (72)	4,98 (nd)				**5,3**
	fientes de volailles		- (0)			15 (1)			**15**
déchets d'IAA	co-produits ind. P.d.t		5,9 (5)						**5,9**
	drèches de brasserie		19 (4)						**19,00**
	fruits et légumes		5,25 (1)						**5,25**
	co-produits viti-vinicoles		23,94 (2)						**23,94**
	graisse abattoir		17,9 (2)						**17,9**
	lactosérum		0,81 (1)						**0,81**
	boues de STEP (IAA)		2,45 (1)		0,035 (nd)				**1,24**
déchets de collectivités	biodéchets ménagers	7,956 (1)	- (0)			3 (1)	6,57 (nd)		**6,6**
	déchets verts		20,4 (3						**20,40**
	boues de STEP (coll.)	9,92 (1)	- (0)		9,5 (nd)			3 (2)	**3,0**
	graisses de STEP		10,8 (1)	4,32 (1)					**4,3**
	huiles, graisses restauration								**4,3**

type de substrat	détail	MO								
		doc (1)	PNR	Cemagref	IMPACTS	expert	ADEME	CNB	DGE	**choix**
		en %MS (nombre de valeurs)								
déchets agricoles	fumier bovin	78,6 (1)	77,9 (7)		75 (nd)				70,8 (2)	**76,4**
	fumier porcin	87 (1)	86,5 (2)		75 (nd)				76,2 (1)	**82,2**
	fumier de volailles	-	75 (1)		75 (nd)	65 (4)				**68,30**
	lisier bovin	78,8 (1)	76,8 (9)	71,4 (23)	75 (nd)				53 (1)	**72,6**
	lisier porcin	76 (1)	75,3 (8)	72 (72)	75 (nd)				77,1 (2)	**72,5**
	fientes de volailles	75 (1)	75 (5)			66,6 (2)			71,45 (2)	**72,6**
déchets d'IAA	co-produits ind. P.d.t	90 (1)	84,5 (18)							**84,5**
	drèches de brasserie	81,8 (1)	83,6 (10)							**83,60**
	fruits et légumes	76,8 (1)	78,4 (8)							**78,40**
	co-produits viti-vinicoles	85,8 (1)	64,5 (3)							**64,50**
	graisse abattoir	92,5 (1)	93 (5)							**93,0**
	lactosérum	90,5 (1)	90,5 (2)							**90,5**
	boues de STEP (IAA)		88 (1)		58 (1)					**73,0**
déchets de collectivités	biodéchets ménagers	49,2 (1)	- (0)			68 (1)	82,2 (nd)			**82,2**
	déchets verts	88,6 (3)	87,4 (15)							**87,40**
	boues de STEP (coll.)	86,1 (1)	70 (1)		59,2 (nd)			67 (2)	65 (2)	**67,0**
	graisses de STEP		75 (4)	93 (1)						**78,6**
	huiles, graisses restauration	77 (1)	- (0)							**77,0**

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

type de substrat	détail	Potentiel méthanogène								
		doc (4)	expert	**choix**	PNR	Cemagref	expert	doc (4)	publi 1	**choix**
		m3/tMB			**en m3/tMO (nombre de valeurs)**					
déchets agricoles	fumier bovin				192 (10)					**192**
	fumier porcin				220 (1)					**220**
	fumier de volailles				210 (1)					**210**
	lisier bovin				206 (16)	248 (3)				**212,6**
	lisier porcin				275 (14)	299 (5)				**281,3**
	fientes de volailles				286 (8)					**286**
déchets d'IAA	co-produits ind. P.d.t				350 (28)					**350**
	drèches de brasserie				375 (11)					**375**
	fruits et légumes				320 (13)					**320**
	co-produits viti-vinicoles				430 (1)					**430**
	graisse abattoir				696 (8)					**696**
	lactosérum				607 (4)					**607**
	boues de STEP (IAA)								200-220	**210**
déchets de collectivités	biodéchets ménagers	78,12 (2)	100	**100**			331,5	258,9		**331,5**
	déchets verts		75,00	**75,00**	410 (16)		177,3			**177,3**
	boues de STEP (coll.)				260 (2)					**260**
	graisses de STEP				803,3 (3)					**803,3**
	huiles, graisses restauration				710 (2)					**710**

Note : Dans cette 2ème version de DIGES, des substrats ont été ajoutés provenant d'un document interne à l'Ademe. Par ailleurs les substrats du logiciel « Methasim » ont été inclus et disponibles pour un groupe restreint d'utilisateurs.

- doc (1) : ADEME/Christine Schubetzer - Potentiel méthanogène de différents substrats – Document - Sources : Bureau d'études IRCO Sprl, Fachverband Biogas, ADAESO, PNR Lorraine / INPL
- doc (4) : ADEME / C. Schubetzer & S.Wenisch /DDS Bilan « Effet de serre » d'un projet de méthanisation agricole - Déjections animales et co-substrats. 10/09/04
- PNR : Viard N, Drexhage M. Production indicative en biogaz et en méthane. PNR de Lorraine et TRAME, 2004 (base de données) (calcul d'une moyenne à partir des valeurs disponibles)
- Cemagref : base analyses de 1997 à 2004. Lisier porcs : 72 valeurs; Lisier bovin : 23 valeurs. Pour graisses : Royer Cécile, Traitement biologique aérobie des graisses (Mémoire d'étude, Cemagref. 1998. Confidentiel)
- IMPACTS : Cemagref / INRA / CReeD / Anjou Recherche / Ecobilan / Orval. Impacts environnementaux de la gestion biologique des substrats Bilan des connaissances. ADEME. 2005
- expert (à dire d'): pour les déjections animales : ITAVI, ITP, institut de l'élevage, y compris leur ouvrage commun "Fertiliser avec les engrais de ferme", 2001; pour les biodéchets : Cemagref Equipe Ouvrages de stockage de substrats; pour les substrats verts : Ademe (S. WENISCH)
- ADEME : La composition des ordure ménagères en France Données et références, 1999
- CNB : Comité National Boues, 2001
- DGE : Working Group on Organic Matter and Biodiversity - Task Group 4 on Exogenous Organic Matter -2004
- publi 1 : P Pouech, R Coudure, CE Marcato - Intérêt de la co-digestion pour la valorisation des lisiers et le traitement de substrats fermentescibles à l'échelle d'un territoire, Journées de la Recherche porcine 2005, 37, 39-44

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

ANNEXE 2 : Références bibliographiques

- ADEME, Facteurs d'émission de dioxyde de carbone pour les combustibles Les chiffres Ademe à utiliser. 8 avril 2005
- ADEME, La composition des ordures ménagères en France. Données et références. Janv. 1999
- ADEME-RTE, Note de cadrage sur le contenu CO2 du kWh d'usage en France. 18 octobre 2007
- ADEME. Outil de calcul des émissions dans l'air de CH_4, CO_2, SOx, NOx issues des centres de stockage de substrats ménagers et assimilés, 14/03/2003
- ADEME/Christine Schubetzer - Potentiel méthanogène de différents substrats – Document - Sources : Bureau d'études IRCO Sprl, Fachverband Biogas, ADAESO, PNR Lorraine / INPL
- ADEME / C. Schubetzer & S.Wenisch /DDS Bilan « Effet de serre » d'un projet de méthanisation agricole - Déjections animales et co-substrats. 10/09/04
- Amon B. & al. Methane, nitrous oxide and ammonia emissions during storage and after application of dairy cattle slurry and influence of slurry treatment. 2005
- Amon B., V. Kryvoruchto, T. Amon, S.Zechmeister-Bollenstem. Methane, nitrous oxide and ammonia emissions during storage and after application of dairy cattle slurry and influence of slurry treatment. Greenhouse gas Emissions from agriculture Mitigation options and strategies, 90-95, 2004.
- BIPE, rapport sur le traitement des graisses (extrait). ADEME 2004
- Cabinet Merlin / EREP. Réalisation d'un référentiel technique et économique d'unités de traitement de substrats organiques par méthanisation avec et sans valorisation du biogaz. ADEME. 2003
- Cemagref / INRA / CReeD / Anjou Recherche / Ecobilan / Orval. Impacts environnementaux de la gestion biologique des substrats Bilan des connaissances. ADEME. 2005
- Clemens J., H.Trimbon, B. Amon, V.Kryvoruchko, P.Weiland. Greenhouse gas mitigation by anaerobic digestion. Greenhouse gas emissions from agriculture Mitigation options and strategies, 96-100, 2004.
- Clemens, J; Huschka, A. The effect of biological oxygen demand of cattle slurry and soil moisture on nitrous oxide emissions. NUTRIENT CYCLING IN AGROECOSYSTEMS, 59, 193-198, 2001.
- CM International. Evaluation des quantités actuelles et futures de sous-produits épandus sur les sols agricoles provenant des industries agroalimentaires. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement. Avril 2002
- Comité national des boues. Les boues d'épuration municipales et leur utilisation en agriculture. ADEME. 2001
- El-Fadel M, Findikakis AN, Leckie JO. Estimating and enhancing methane yield from municipal solid waste. Hazardous Waste & Hazardous materials Vol 13: 309-331, 1996
- Gac A, Béline F, Bioteau T, Flux de gaz à effet de serre (CH_4, N_2O) et d'ammoniac (NH_3) liés à la gestion des déjections animales : Synthèse bibliographique et élaboration d'une base de données. Cemagref. Ademe, 2005

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

- Barlaz MA, Ham RK, Schaefer DM. Methane production from municipal refuse : a review of enhancement techniques and microbial dynamics. Critical Reviews in Environmental Control Volume 19, Issue 6, 557-584, 1990
- Institut de l'élevage, ITAVI, ITCF, ITP. Fertiliser avec les engrais de ferme, 2001
- Köster JR, Cardenas L, Bol R, Senbayram M, Butler M, Dittert K. Effect of biogas waste and mineral ammonium amendment on nitrous oxide emissions
- Moletta R, Cansell F. Méthanisation des substrats organiques Etude bibliographique. RECORD n°01-0408/1A. Février 2003
- Petitjean Stéphane. Utilisation des substrats en agriculture. Le courrier de l'environnement n°28, INRA, 1996
- P Pouech, R Coudure, CE Marcato, Intérêt de la co-digestion pour la valorisation des lisiers et le traitement de substrats fermentescibles à l'échelle d'un territoire, Journées de la Recherche porcine 2005, 37, 39-44
- Royer Cécile. Traitement biologique aérobie des graisses. Mémoire. Cemagref. Juin 1998. Confidentiel
- Solagro. La digestion anaérobie des boues urbaines. 2001
- Vedrenne Fabien. Compréhension des processus responsables des émissions de méthane issues des déjections animales liquides en vue d'une maîtrise de ces émissions. Cemagref. Ademe. En cours
- Viard Nathalie, Drexhage Michael. Production indicative en biogaz et en méthane (base de données) Parc Naturel Régional de Lorraine et TRAME, 2004
- Working Group on Organic Matter and Biodiversity. Task Group 4 on Exogenous Organic Matter. Commission Européenne. Mai 2004

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref