



HAL
open science

Approche aux différentes échelles pour la mise au point d'outils intégrés d'aide au développement de projets de méthanisation

Julien Tolo

► **To cite this version:**

Julien Tolo. Approche aux différentes échelles pour la mise au point d'outils intégrés d'aide au développement de projets de méthanisation. Mécanique [physics]. Université de Bordeaux, 2014. Français. NNT : 2014BORD0124 . tel-01696593v2

HAL Id: tel-01696593

<https://theses.hal.science/tel-01696593v2>

Submitted on 30 Jan 2018

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.

THÈSE PRÉSENTÉE
POUR OBTENIR LE GRADE DE
DOCTEUR DE
L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

ÉCOLE DOCTORALE
SPÉCIALITÉ

Par Julien TOLO

**APPROCHE AUX DIFFÉRENTES ÉCHELLES POUR LA
MISE AU POINT D'OUTILS INTÉGRÉS D'AIDE AU
DEVELOPPEMENT DE PROJETS DE METHANISATION**

Sous la direction de : Jean-Rodolphe PUIGGALI
(co-directeur : Jean-François BONNET)

Soutenue le 8 avril 2014

Membres du jury :

M. RENAUDIN, Jean-Pierre
M. FROELICH, Daniel
M. MARIAS, Frédéric
M. COUZY, Sébastien

Professeur
Professeur
Professeur
Directeur

Université de Bordeaux
ENSAM, Chambéry
ENSGTI, Pau
METHANEO

Président
rapporteur
rapporteur
invité

Titre : Approche aux différentes échelles pour la mise au point d'outils intégrés d'aide au développement de projets de méthanisation

Résumé : La digestion anaérobie est un processus biologique de transformation de la matière organique permettant la production d'énergie sous forme de biogaz et de fertilisant sous forme de digestat. C'est une filière émergente en France, dont les objectifs de développement sont ambitieux. Le développement d'une filière industrielle sur l'ensemble du territoire Français nécessite la mise en œuvre d'outils d'aide à la décision.

Dans le cadre de cette Thèse nous proposons d'évaluer le potentiel de développement de la méthanisation collective, territoriale et agricole par injection du biogaz dans les réseaux de gaz naturel. Les travaux de recherche portent sur trois axes : (1) l'évaluation du potentiel de mobilisation de biomasse d'origine agricole ; (2) la conception et l'étude de la viabilité économique de « modèle type » d'usine de méthanisation ; (3) l'évaluation de la performance technico-économique d'une exploitation agricole ayant recours à la méthanisation dans but d'accroître son autonomie face aux énergies fossiles et aux engrais chimiques.

Sur le premier volet, nous avons réalisé une étude cartographique des gisements agricoles mobilisables. Nous avons localisé et quantifié les quantités de coproduits de cultures et d'effluents d'élevage présent sur le territoire Français. Nous avons mis en évidence que le potentiel de mobilisation de biomasse agricole est de l'ordre de 57 millions de tonnes de matière sèche. Ceci correspond à une production énergétique maximale de l'ordre de 158 TWh/an.

Sur le deuxième volet, nous avons conçu des « modèles types » d'usines de méthanisation de différentes tailles, dont le biogaz est valorisé en biométhane par injection dans le réseau. Pour chacun des « modèles types » nous avons comparé la viabilité technico-économiques des modèles selon différentes « recettes » de biomasse. L'évaluation met en avant que pour chaque « modèle type », il existe un nombre limité de « recettes » permettant à chacun d'entre eux de trouver un équilibre technico-économique.

Sur le troisième volet, nous nous sommes intéressés à l'autonomie azote et carburant que pourrait atteindre une exploitation agricole en méthanisant des cultures énergétiques dédiées de légumineuse. L'évaluation a été menée sur des fermes présentant des configurations différentes d'assolement et de rendement. Nous avons mis en évidence les conditions nécessaires pour que chaque configuration de ferme puisse atteindre l'autonomie. Il en ressort que dans certaines conditions, une exploitation « autonome » présente des marges brutes supérieures à celle d'une exploitation conventionnelle.

Mots clés : Méthanisation, digestion anaérobie, biogaz, biométhane, injection réseau, biomasse, coproduits, digestat, luzerne.

Title : Approach at various scales for the biogas plant development

Abstract : Anaerobic digestion is a biological process of transformation of organic matter allowing the production of energy in the form of biogas and fertilizer in the form of digestate. It is an emerging sector in France, whose development objectives are ambitious. The development of an industrial sector throughout the French territory requires the implementation of decision support tools.

As part of this thesis, we propose to evaluate the development potential of collective, territorial and agricultural methanation by injecting biogas into natural gas networks. Research work focuses on three axes: (1) the evaluation of the biomass mobilization potential of agricultural origin; (2) the design and study of the economic viability of a "typical model" of methanation plant; (3) the evaluation of the technical and economic performance of a farm using methanation in order to increase its autonomy in the face of fossil fuels and chemical fertilizers.

We first carried out a cartographic study of mobilizable agricultural deposits. The quantities of co-products of crops and livestock effluents present on the French territory were located and quantified. Thus, we have shown that the potential for mobilization of agricultural biomass is of the order of 57 million tons of dry matter. This corresponds to a maximum energy production of about 158 TWh / year.

And second, we have designed "model models" of biogas plants of different sizes, whose biogas is valorized in biomethane by injection into the network. For each of the "standard models" we compared the techno-economic viability of the models according to different "recipes" of biomass. The evaluation points out that for each "standard model" there is a limited number of "recipes" allowing each of them to find a techno-economic balance.

Finally, we focused on the nitrogen and fuel autonomy that an agricultural operation could achieve by methanising dedicated energy crops of legumes. The assessment was conducted on farms with different rotational and yield configurations. We have highlighted the conditions necessary for each farm configuration to achieve autonomy. It shows that under certain conditions, an "autonomous" farm has gross margins higher than that of a conventional farm.

Keywords : Biogas plant, anaerobic digestion, biogas, biomethan, gas grids, biomass, coproducts, digestate, lucerne.

Unité de recherche

[I2M - Institut de mécanique et d'ingénierie (CNRS UMR 5295), Département du TREFLE, Université de Bordeaux]

TABLES DES MATIERES

TABLES DES MATIERES	1
TABLE DES FIGURES.....	4
TABLE DES ANNEXES.....	9
INTRODUCTION	10
CHAPITRE 1 :	14
La situation de la méthanisation en France	14
1.1. Le processus de méthanisation	14
1.1.1. Histoire de la digestion anaérobie.....	14
1.1.2. Le processus biologique	15
1.1.3. Mise en place de la digestion anaérobie au sein de digesteurs industriels	19
1.2. La méthanisation collective.....	21
1.2.1. La Méthanisation Collective Territoriale et Agricole.....	21
1.2.2. Réglementation et soutien de la méthanisation	25
CHAPITRE 2 :	28
L'évaluation des gisements mobilisables et de la production de biogaz à différentes échelles.....	28
2.1. Introduction à l'évaluation à différentes échelles	28
2.1.1. Champ de l'évaluation.....	28
2.1.2. Méthodologie d'évaluation des gisements et de la production biogaz	30
2.2. Biomasse mobilisable et production de biogaz issue des élevages	34
2.2.1. Les déjections des bovins à lait	34
2.2.2. Les déjections de bovins à viande	36
2.2.3. Les déjections de porcins	38
2.2.4. Les déjections des équidés.....	40
2.2.5. Les déjections des caprins	42
2.2.6. Les déjections des ovins	44
2.2.7. Les déjections de volailles	45
2.2.8. Synthèse des déjections animales.....	47

2.3. Biomasse mobilisable et production de biogaz issue des coproduits de culture	50
2.3.1. Les pailles et menues-pailles de céréales.....	50
2.3.2. Les pailles et menues pailles de colza	53
2.3.3. Les cannes et rafles de maïs	55
2.3.4. Les cannes et capitules de tournesol	57
2.3.5. Les coproduits de la vigne	59
2.3.6. Synthèse des coproduits agricoles	60
2.4. Evaluation du potentiel de mobilisation de biomasse et biogaz à différentes échelles	63
2.4.1. Intérêt d'une évaluation à différentes échelles	63
2.4.2. Echelle Nationale.....	63
2.4.3. Echelle régionale	65
2.4.4. Echelle cantonale.....	66
2.5. Perspectives et potentiel de la biomasse agricole	66
2.6. Outils produits et application Methaneo	67
CHAPITRE 3 :	69
L'évaluation technico-économique d'unités de méthanisation « type ».....	69
3.1. Introduction à la notion de « modèles type »	69
3.2. Construction des « modèles type ».....	70
3.2.1. Description technique	70
3.2.2. Méthodologie d'évaluation.....	73
3.3. Evaluation du modèle « type » injection réseau Distribution.....	78
3.3.1. Caractéristique spécifique du modèle « type » injection réseau de Distribution.....	78
3.3.2. Modèle « type » injection réseau distribution 20 000 T	79
3.3.3. Modèle « type » réseau distribution 40 000 T	85
3.4. Evaluation du modèle « type » en injection sur le réseau de Transport	90
3.4.1. Caractéristique spécifique du modèle « type » en injection sur le réseau de Transport .	90
.....	90
3.4.2. Modèles « type » 20 000 et 40 000 T en injection sur le réseau de transport	91
3.5. Evaluation du modèle « type » en injection sur le réseau avec transport du biométhane ..	91
3.5.1. Caractéristique spécifiques du modèle « type » injection avec transport du	91
biométhane	91
3.5.2. Modèles « type » 20 000 et 40 000 T en injection avec transport du biométhane	92

3.6. Commentaires et perspectives.....	93
CHAPITRE 4 :	96
La méthanisation, un outil technologique permettant d’atteindre l’autonomie	96
4.1. Mise en contexte de la réflexion sur l’autonomie d’une exploitation	96
4.1.1. La dépendance de l’agriculture	96
4.1.2. La méthanisation collective comme outil d’autonomie pour les exploitations agricoles.	97
4.1.3. Choix de la légumineuse pour les cultures dédiées	100
4.2. Evaluation de l’autonomie Azote et Carburant.....	101
4.3. Autonomie azote	103
4.3.1. Le besoin d’azote à substituer.....	103
4.3.2. Les conséquences du choix de la légumineuse	105
4.3.3. Estimations des surfaces nécessaires pour atteindre l’autonomie.....	106
4.4. Autonomie carburant	109
4.4.1. Les besoins en carburant d’une exploitation	109
4.5. Comportement des modèles d’évaluation au sein d’un modèle « type autonome »	110
4.5.1. Définition du modèle « type autonome »	110
4.5.2. Paramètres de l’évaluation	111
4.6. Evaluation du modèle monoculture de maïs	112
4.6.1. Configuration d’une ferme avec un rendement grain élevé et fourniture du sol faible...	112
4.6.2. Configuration d’une ferme avec un rendement grain faible et une fourniture du sol élevée	118
4.7. Evaluation du modèle avec rotation colza-blé-orge	125
4.7.1. Configuration d’une ferme avec un rendement de grain élevé et une fourniture du sol faible	125
4.7.2. Configuration d’une ferme avec un rendement en grain faible et une fourniture du sol élevée	130
4.8. Comparaison des modèles de fermes et mise en œuvre de l’autonomie	135
CHAPITRE V :	137
Synthèse et perspectives.....	137
5.1. Evolution du contexte durant les travaux	137

5.2. Synthèse des résultats.....	138
5.3. Perspectives.....	143
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	145
ANNEXES.....	150

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Organisation de la réflexion des travaux et de la construction des outils	12
Figure 2 : Les étapes de la digestion anaérobie (Grossin 2011).....	16
Figure 3 : Principe de la méthanisation (source Methaneo).....	17
Figure 4 : Le modèle d'Unité de Méthanisation Collective Territoriale et Agricole (UMCTA) (<i>source Methaneo</i>).....	22
Figure 5: Carte des gisements d'élevage de Vaches Laitières (TMS par département)	36
Figure 6: Carte des gisements d'élevage de Bovins à Viande (TMS par département)	38
Figure 7: Carte des gisements d'élevage porcins (TMS par département)	40
Figure 8: Carte des gisements d'élevage Equins (TMS par département)	42
Figure 9: Carte des gisements d'élevage Caprins (TMS par département).....	43
Figure 10: Carte des gisements d'élevage Ovins (TMS par département)	45
Figure 11: Carte des gisements d'élevage de Volailles (TMS par département)	47
Figure 12 : Carte de production des effluents d'élevage (TMS par département)	48
Figure 13: Répartition de la production de matière sèche selon la typologie de production des effluents	48
Figure 14: Carte des gisements de toutes les pailles de céréales (TMS par département)	51
Figure 15: Carte des gisements des pailles de céréales à paille hors besoin d'élevage (TMS par département)	52
Figure 16: Carte des gisements de menues-pailles de céréales (TMS par département).....	52
Figure 17: Carte des gisements de coproduits du colza (TMS par département).....	54

Figure 18: Carte des gisements de coproduits de cannes de maïs (TMS par département)	56
Figure 19: Carte des gisements de coproduits de rafles de maïs (TMS par département).....	56
Figure 20: Carte des gisements de coproduits du Tournesol (TMS par département).....	58
Figure 21: Carte des gisements de coproduits de la vigne (TMS par département).....	60
Figure 22 : Carte de production des coproduits de cultures (TMS par région).....	61
Figure 23 : Répartition de la production de matière sèche selon la typologie des coproduits	61
Figure 24: Répartition du potentiel de mobilisation de biomasse par type de production (TMS)	64
Figure 25 : Synthèse globale de la production et de la répartition des biomasses d'origine agricoles	65
Figure 26 : Production de biogaz selon l'approvisionnement mono-produit d'un modèle type 20 000 T en injection sur le réseau de distribution.....	79
Figure 27 : Coût spécifique de mobilisation selon l'approvisionnement mono-produit d'un modèle type 20 000 T en injection sur le réseau de distribution.....	80
Figure 28 : Excédent brut d'exploitation selon l'approvisionnement mono-produit d'un modèle type 20 000 T injection réseau distribution	80
Figure 29 : Viabilité des modèles « type » 20 000 T en injection sur le réseau de distribution selon l'approvisionnement mono-produit.....	81
Figure 30 : Production de biogaz selon l'approvisionnement en co-digestion d'un modèle type 20 000 T en injection sur le réseau de distribution.....	82
Figure 31 : Coût spécifique de mobilisation selon l'approvisionnement en co-digestion d'un modèle type 20 000 T en injection sur le réseau de distribution.....	82
Figure 32 : Excédent brut d'exploitation selon l'approvisionnement en co-digestion d'un modèle type 20 000 T en injection sur le réseau de distribution.....	83
Figure 33 : Viabilité des modèles « type » 20 000 T en injection sur le réseau de distribution selon l'approvisionnement en co-digestion.....	83
Figure 34 : Indice de performance des modèles « type » 20 000 T en injection sur le réseau de distribution selon l'approvisionnement	84
Figure 35 : Production de biogaz selon l'approvisionnement mono-produit d'un modèle type 40 000 T en injection sur le réseau de distribution.....	85
Figure 36 : Coût spécifique de mobilisation selon l'approvisionnement mono-produit d'un modèle type 40 000 T en injection sur le réseau de distribution.....	86
Figure 37 : Excédent brut d'exploitation selon l'approvisionnement mono-produit d'un modèle type 40 000 T en injection sur le réseau de distribution.....	86

Figure 38 : Viabilité des modèles « type » 40 000 T en injection sur le réseau de distribution selon l'approvisionnement mono-produit.....	86
Figure 39 : Production de biogaz selon l'approvisionnement en co-digestion d'un modèle type 40 000 T en injection sur le réseau de distribution.....	87
Figure 40 : Coût spécifique de mobilisation selon l'approvisionnement en co-digestion d'un modèle type 40 000 T en injection sur le réseau de distribution.....	88
Figure 41 : Excédent brut d'exploitation selon l'approvisionnement en co-digestion d'un modèle type 40 000 T en injection sur le réseau de distribution.....	88
Figure 42 : Indice de performance des modèles « type » 40 000 T en injection sur le réseau de distribution selon l'approvisionnement	89
Figure 43 : Mise en place de l'injection sur le réseau avec transport de biométhane comprimé à 200 bar	92
Figure 44 : Mise en place d'un système autonome au travers d'un projet de méthanisation	98
Figure 45 : Surface de culture dédiée nécessaire pour l'autonomie azote et carburant.....	113
Figure 46 : Coûts de production de l'exploitation selon le scénario d'autonomie	114
Figure 47 : Evaluation de la performance économique de l'exploitation selon le degré d'autonomie choisi.....	115
Figure 48 : Comparaison de la marge brute de différents scénarios d'autonomie selon l'évolution du prix du grain.....	116
Figure 49 : Evolution de la marge brute des différents scénarios d'autonomie sur une base de prix constatés (période 1998 - 2012)	117
Figure 50 : Marge brute moyenne sur 15 ans des différents scénarios d'autonomie sur une base de prix constatés (1998 - 2012).....	118
Figure 51 : Surface de culture dédiée nécessaire pour l'autonomie en azote et en carburant.....	119
Figure 52 : Coûts de production des cultures selon le scénario d'autonomie	119
Figure 53 : Evaluation de la performance économique de l'exploitation selon le degré d'autonomie choisi.....	120
Figure 54 : Comparaison de la marge brute des différents scénarios d'autonomie selon l'évolution du prix du grain.....	122
Figure 55 : Evolution de la marge brute des différents scénarios d'autonomie sur une base de prix constatés (période 1998 - 2012)	123
Figure 56 : Marge brute moyenne sur 15 ans pour les différents scénarios d'autonomie sur une base de prix constatés (1998 - 2012).....	124

Figure 57 : Surface de culture dédiée nécessaire pour l'autonomie en azote et en carburant.....	125
Figure 58 : Coûts de production des cultures selon le scénario d'autonomie	126
Figure 59 : Evaluation de la performance économique de l'exploitation selon le degré d'autonomie choisi.....	127
Figure 60 : Comparaison de la marge brute des différents scénarios d'autonomie selon l'évolution du prix du grain.....	128
Figure 61 : Evolution de la marge brute des différents scénarios d'autonomie sur une base de prix constatés (période 1998 - 2012)	129
Figure 62 : Marge brute moyenne sur 15 ans dans les différents scénarios d'autonomie sur une base de prix constatés (1998 - 2012).....	130
Figure 63 : Surface de culture dédiée nécessaire pour l'autonomie en azote et en carburant.....	130
Figure 64 : Coûts de production des cultures selon le scénario d'autonomie	131
Figure 65 : Evaluation de la performance économique de l'exploitation selon le degré d'autonomie choisi.....	132
Figure 66 : Comparaison de la marge brute des différents scénarios d'autonomie selon l'évolution du prix du grain.....	133
Figure 67 : Evolution de la marge brute des différents scénarios d'autonomie sur une base de prix constatés (période 1998 - 2012)	134
Figure 68 : Marge brute moyenne sur 15 ans des différents scénarios d'autonomie sur une base de prix constatés (1998 - 2012).....	135
Figure 69 : Cartographie des cantons permettant le développement de modèles « type », selon le taux de mobilisation de la biomasse.	141
Figure 70 : Devenir de la matière organique dans le sol (APESA, P Pouech)	150
Figure 72 : Approche simplifiée du devenir de la matière organique issue d'une canne de maïs après méthanisation	151
Figure 73 : Survie des agents pathogènes des plantes et des graines de mauvaises herbes pendant la digestion anaérobie - Essai Suisse (Engeli, Edelmann, Fuchs and Rottermann)	155
Figure 74 : Temps de séjour et température de digestion nécessaires à la dégradation des adventices par méthanisation	156
Figure 75 : Photo des essais de récolte de menues paille à la ferme de Grignon (juillet 2008)	162
Figure 76 : Exemple de résultats des essais sur la récupération de coproduits du maïs (METHANEO, GRCETA).....	162

Figure 77 : Résultats des essais de mobilisation de rafles et cannes de maïs (METHANEO et GRCETA)	163
Figure 78 : Outil d'évaluation du potentiel biomasse et biogaz à l'échelle cantonale	165
Figure 79 : Exemple d'évaluation quantitative à l'échelle du départementale (département de l'Yonne)	167
Figure 81 : Organisation et localisation du réseau de gaz naturel en France (Comité de la Régulation de l'énergie)	178
Figure 82 : Exemple d'étude GrDF pour laquelle le débit d'injection est supérieur aux consommations gaz durant la période de l'été	179
Figure 83 : Exemple d'étude GrDF avec un débit d'injection inférieur aux consommations de gaz durant les mois d'été	180
Figure 84 : Exemple d'un rack biométhane containérisé chargé sur un camion porteur (ALE 08, 2009)	187
Figure 85 : Exemple d'un rack biométhane mobile tracté par un véhicule (ALE 08, 2009)	187
Figure 86 : Caractéristiques et capacités de stockage des racks biométhane selon les équipementiers (ALE 08, 2009)	188

TABLE DES ANNEXES

Annexe 1 : Maintien du potentiel humifère en méthanisation	150
Annexe 2 : Résultats des essais de fertilisation de digestat sur Tiper Méthanisation	152
Annexe 3 : Intérêts sanitaires de la méthanisation.....	155
Annexe 4 : Trame des enquêtes territoriales.....	157
Annexe 5 : Synthèse des temps de séjour et répartition de production d'effluents par animaux.....	159
Annexe 6 : Caractéristiques et potentiel de production de biogaz des effluents d'élevage	161
Annexe 7 : Résultats des essais de mobilisation de coproduits.....	162
Annexe 8 : Exemple des outils et études de gisements produits en interne pour Methaneo.....	164
Annexe 9 : Exemple d'implantation standard d'un « modèle type » 20 000T GrDF.....	171
Annexe 10 : Spécification technique du biométhane et de l'injection réseau	172
Annexe 11 : Exemple de dimensionnement d'un « modèle type » 20 000 T GrDF	173
Annexe 12 : Exemple d'un bilan Diges d'un « modèle type » 20 000 T GrDF	176
Annexe 13 : Localisation des réseaux de distribution et transport de gaz naturel en France	178
Annexe 14 : Exemple d'étude de faisabilité d'injection réseau	179
Annexe 15 : Synthèse des résultats des scénarios pour les modèles « type » en injection réseau sur le réseau de distribution	181
Annexe 16 : Caractéristiques techniques des racks de transport de biométhane	187
Annexe 17 : Données prises en compte dans l'évaluation de l'autonomie	189
Annexe 18 : Evaluation de l'autonomie avec un mélange vesce/triticales	193

INTRODUCTION

La digestion anaérobie conduit, par l'action de micro-organismes à la production de biogaz, qui est un gaz énergétique pouvant être valorisé (La Farge, 1995). La production du biogaz se décline à partir de ressources variées : le biogaz de centre d'enfouissement techniques, la méthanisation d'ordures ménagères, la digestion des boues de stations d'épuration, la méthanisation de résidus et déchets agricoles.

La méthanisation est une technologie connue en France depuis de nombreuses années et déployée à l'échelle industrielle pour des applications de traitements des effluents industriels et des boues de station d'épuration depuis la première moitié du XX^{ème} siècle. C'est à partir de 2006, avec la parution des premiers tarifs de rachat électriques pour la valorisation de biogaz que l'on peut parler de développement d'une filière de méthanisation en France. Depuis cette date, la méthanisation proprement dite compte parmi les énergies renouvelables en tant que filière de production énergétique et n'est plus cantonnée à une simple solution de traitement des déchets. Il existe en France 481 sites de production de biogaz, produisant environ 7 000 GWh/an de biogaz dont 60% sont valorisés (Ernst et Young, 2010).

La méthanisation en France, en cours de démarrage et de structuration, bénéficie de ces premières références, aussi bien sur les projets de boues de stations d'épuration, de centres d'enfouissements techniques, de déchets ménagers ou encore sur les projets agricoles. Malgré l'émergence de cette filière, et un potentiel de développement considéré comme important, la France est très en retard vis-à-vis de ses confrères Européens, notamment l'Allemagne qui compte plus de 4500 installations (ADEME, 2011).

Le secteur agricole est le plus propice au développement de la méthanisation en France et pourrait nous permettre de combler notre retard dans ce domaine. En effet, la production agricole Française est la plus importante d'Europe et représente un gisement mobilisable très significatif. La méthanisation agricole recouvre à la fois la méthanisation dite « à la ferme », la méthanisation collective et dans une certaine mesure la méthanisation des déchets agroalimentaires (Solagro). Le modèle de méthanisation « à la Française » se cherche ; on constate sur le territoire l'existence de modèles qui cohabitent souvent, s'opposent parfois. Un besoin de structuration se fait sentir, nécessitant une analyse globale des différentes filières ainsi qu'une évaluation de leurs potentiels de

développements respectifs. Ceci permettrait de proposer à terme un modèle et une filière de méthanisation adaptés aux enjeux et caractéristiques de nos territoires.

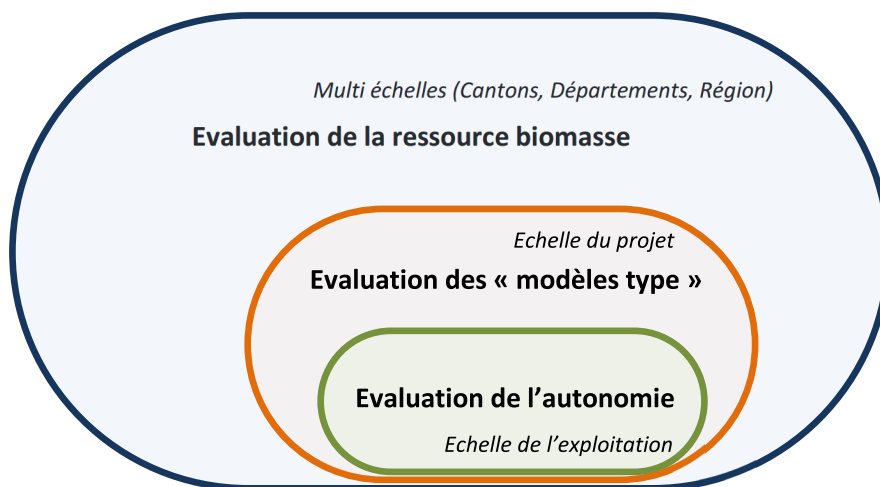
En 2010, suite à un stage de fin d'étude au sein la société Methaneo, spécialisée dans le développement de projets de méthanisation Collectifs Territoriaux et Agricoles (UMCTA), j'ai souhaité poursuivre les réflexions initiées durant six mois par un projet de thèse consistant à évaluer le potentiel de développement de la méthanisation en France. C'est pourquoi j'ai construit autour d'un dispositif CIFRE le sujet de recherche, « approche aux différentes échelles pour la mise au point d'outils intégrés d'aide au développement de projets de méthanisation » en m'appuyant sur les compétences du laboratoire du TREFLE (I2M) de l'Université de Bordeaux ainsi que sur l'expertise de la société Methaneo.

La société Methaneo, créée en 2007, travaille exclusivement sur la mise en œuvre de projets de méthanisation collectifs dont les biomasses entrantes sont d'origine agricole. Methaneo assure le développement, le financement et l'exploitation de ces projets collectifs dont elle est actionnaire. Ces travaux de recherche s'inscrivent dans le prolongement de la stratégie de l'entreprise, en lui permettant d'étayer son positionnement et ses perspectives de développement tout en se dotant d'outils d'aide à la décision.

La problématique s'est articulée autour de la complémentarité laboratoire/entreprise, en mêlant les aspects académiques d'une problématique de recherche aux questionnements pragmatiques d'une entreprise en développement. Cette complémentarité entre le laboratoire du TREFLE, intervenant dans les problématiques énergétiques et l'analyse de filière, et la société Methaneo spécialisée dans le développement et le financement de projets collectifs et agricoles de méthanisation m'a mené à choisir un sujet de recherches traitant des aspects de filière, de potentiel d'évaluation, et de conditions d'émergence.

Du fait de la vocation très applicative de la démarche, le cheminement de la réflexion s'est construit autour d'outils. Chaque outil a été élaboré et articulé selon un modèle de méthanisation précis, celui de la Méthanisation Collective, Territoriale et Agricole.

Figure 1 : Organisation de la réflexion des travaux et de la construction des outils



Les travaux s'organisent autour de trois outils permettant une évaluation en quatre étapes à différentes échelles (Figure 1):

- 1 : Evaluation du potentiel et localisation de la ressource biomasse (outil 1)
- 2 : Evaluation des « modèles type » (outil 2)
- 3 : Evaluation de l'autonomie (outil 3)
- 4 : l'évaluation du potentiel de développement des modèles « type » sur l'ensemble des territoires (utilisation complémentaires des outils 1, 2 et 3).

En premier lieu les travaux vont traiter de façon successive les questionnements liés aux deux premiers outils. L'outil n°1 a pour objectif de localiser et de quantifier les gisements agricoles mobilisables sur l'ensemble du territoire. La spécificité de cette évaluation réside d'une part dans la prise en compte de l'ensemble des gisements agricoles mobilisables, en particulier d'évaluer le potentiel de mobilisation de produits non valorisés tels que les coproduits de cultures. D'autre part, l'évaluation des gisements selon les spécificités territoriales des pratiques agricoles. Enfin l'évaluation prendra en compte une analyse multi-échelle permettant de déterminer les zones, territoires, qui recèlent de gisements réellement mobilisables et les proportions dans lesquelles ceci est possible.

L'outil n°2 a pour objectif de définir des modèles « type » reproductibles, c'est-à-dire de construire et de définir plusieurs modèles qui soient techniquement et économiquement viables selon la nature de la valorisation du biogaz et le type d'intrants agricoles dans le contexte réglementaire en vigueur.

Il s'agit de déterminer s'il existe des tailles critiques (quantité de biomasse, production énergétique, etc.) pour la mise en œuvre de projets de méthanisation Collectifs et Agricoles.

Par la suite les travaux de recherche viseront à évaluer l'interaction de ces deux outils (interactions 1-2), c'est-à-dire à évaluer le degré d'émergence de modèles « type » à différentes échelles sur l'ensemble du territoire. L'objectif est de localiser les territoires regroupant l'ensemble des caractéristiques (pratiques locales, biomasse, etc) permettant l'émergence d'un modèle « type » et de quantifier la part de biomasse mobilisable selon ces modèles pour la méthanisation. Suite à cela, l'analyse portera sur l'outil n°3 qui permet l'évaluation de l'autonomie que peut atteindre un exploitant agricole à travers la méthanisation des effluents ou coproduits issus de son exploitation. Le degré d'autonomie évalué ici porte sur les besoins énergétiques et agronomiques (fourniture d'azote) de l'exploitation agricole. Nous évaluerons ensuite les interactions entre l'outil n°1 et l'outil n°3 (interactions 1-3) qui permettront de localiser et de caractériser le degré d'autonomie que peuvent atteindre les territoires selon leurs spécificités locales. Puis nous évaluerons les interactions entre l'outil n°2 et l'outil n°3 (interactions 2-3) dont l'objectif est d'évaluer le degré d'autonomie d'une exploitation au sein d'un modèle « type » et les conditions permettant à ce modèle d'être techniquement et économiquement viable.

Enfin l'analyse des outils se terminera par l'évaluation des interactions entre les trois outils (interactions 1-2-3) dont l'objectif est de quantifier et de localiser l'émergence possible de projets « type » autonomes, techniquement et économiquement viables.

L'ensemble des évaluations sera menée en intégrant des indicateurs destinés à une hiérarchisation des résultats pour chacun des outils. Les indicateurs seront d'ordres différents selon les outils : énergétiques, environnementaux, indicateurs de performance, etc.

Les objectifs de ces travaux portent, d'une part, sur la définition et la création d'une méthodologie multi-échelles et multicritères afin de quantifier le potentiel de mobilisation de biomasse sur un territoire, et, d'autre part, sur la définition et la caractérisation de modèles « type » reproductibles adaptés au contexte multifactoriel et territorial qui caractérise l'ensemble des territoires Français. Il s'agit d'adapter une démarche développée au laboratoire I2M pour l'étude de problèmes énergétique et environnementaux aux différentes échelles, par systèmes-type L'originalité de ces travaux porte sur l'analyse transverse d'une compilation de briques, aussi bien technologique, environnementales que sociétales. La finalité des travaux est l'identification et la caractérisation d'un ou de plusieurs modèles, vertueux et reproductibles de mise en œuvre de projets Collectifs, Territoriaux et Agricoles de méthanisation.

CHAPITRE 1 :

La situation de la méthanisation en France

1.1. Le processus de méthanisation

1.1.1. Histoire de la digestion anaérobie

La digestion anaérobie ou méthanisation est un processus naturel biologique de dégradation de la matière organique en gaz carbonique et méthane par des micro-organismes en absence d'oxygène : on parle de dégradation anaérobie. Ce processus se retrouve dans de nombreux écosystèmes naturels (sols, sédiments, rizières,...) et dans les tubes digestifs d'animaux, en particulier les ruminants (Braumann et coll., 2008). On trouve les premières traces d'utilisation du biogaz pour chauffer les eaux des bains en Assyrie au 10^{ème} siècle avant Jésus Christ. Jan Baptista Van Helmont démontre au 17^{ème} siècle que la décomposition de la matière organique produit un gaz inflammable. En 1776, Alessandro Volta remarque la présence d'un gaz émis par les vases en putréfaction d'un marais et démontre qu'il s'agit d'un gaz combustible qu'il appellera par la suite «gaz des marais». Il mettra en évidence la relation directe entre quantité de matière organique décomposée et quantité de gaz produit.

Ce phénomène sera étudié dès le début du 19^{ème} siècle (Adler, 2009) et fera par la suite, l'objet de nombreuses études en Europe. En 1808, Sir Humphry Davy prouve que du méthane est présent dans les gaz produits lors de la décomposition de lisiers. Au milieu du 19^{ème} siècle, Pasteur montre que l'origine de ce gaz est une fermentation d'origine bactérienne. La première installation industrielle a été réalisée en 1859 à Bombay en Inde (Meynell, 1976). Une unité industrielle sur une station d'épuration est également mise en œuvre en 1895 à Exeter en Grande Bretagne ; le biogaz y est utilisé pour l'éclairage public. Les mécanismes biologiques à l'origine de la production de biogaz seront décrits dans le détail par Buswell dans les années 1930.

La méthanisation en tant que technologie d'épuration des eaux usées, telle que nous la connaissons aujourd'hui, sera mise en œuvre sur la station d'épuration de Lawrence aux Etats Unis d'Amérique, puis à Birmingham en Angleterre en 1906 (Couturier, 2004). Dès 1913, une station d'épuration en Allemagne va mettre en pratique le chauffage et le brassage des digesteurs, ainsi que la production d'électricité grâce au gaz de digestion. C'est en 1920, que la première station d'épuration en Allemagne livre son surplus de gaz au réseau municipal de gaz. Dans les années 1940, on observe que l'ajout de résidus gras augmente la production de biogaz.

Le procédé connaît un fort développement lors de la seconde guerre mondiale, pour suppléer le manque de carburants. Il retombe dans l'oubli dans les années cinquante et soixante avec l'arrivée de sources énergétiques fossiles moins coûteuses et plus simples d'utilisation. Les divers chocs pétroliers relancent la recherche de solutions alternatives aux énergies fossiles et l'activité du biogaz permettant le développement de fermenteurs dans le domaine agricole. Au début des années quatre-vingt, la France s'intéresse à la méthanisation de lisier ; une centaine d'installations environ sera créée. Dans les années quatre-vingt dix, la co-digestion de lisier et résidus végétaux se développe en Allemagne (méthanisation « à la ferme »).

Les contraintes environnementales, le progrès technologique des procédés de méthanisation et la prise de conscience de la raréfaction des énergies fossiles donnent un nouvel attrait à ce mode de traitement des déchets organiques, en proposant aujourd'hui à travers le monde, non seulement une technologie de traitement et de dépollution mais également une technologie de production d'énergies renouvelables.

1.1.2. Le processus biologique

- La digestion anaérobie

La digestion anaérobie conduit, par l'action de micro-organismes, à la transformation des molécules organiques en dioxyde de carbone et en méthane. Cette transformation fait intervenir successivement quatre populations microbiennes. Les processus de dégradation mis en jeu sont complexes et les différentes populations de micro-organismes travaillent en série (Farquat et Rovers 1973, Barlaz, Ham *et al.* 1990). Ce processus de dégradation se déroule en quatre étapes (hydrolyse, acidogénèse, acétogénèse, méthanogénèse) (Figure 2) bien connues et décrites dans la littérature (Addou, 2009) (Moletta 2008) (Görisch et Helm 2008) (Damien, 2008) (La Farge 1995).

L'étape d'hydrolyse est la première étape qui permet, sous l'effet de bactéries hydrolytiques, la transformation de la matière organique complexe en matière organique simple et soluble. Lors de l'acidogénèse, les populations bactériennes présentes lors de cette étape convertissent par fermentation les composés organiques simples de l'hydrolyse en alcools, acides gras volatils (AGV) et azote amoniacal. L'acétogénèse correspond à l'étape durant laquelle les molécules d'AGV sont scindées afin d'être transformées en acétate, en dioxyde de carbone et en hydrogène.

Enfin, le processus de digestion anaérobie se termine par l'étape de méthanogénèse conduisant à la formation de méthane et de dioxyde de carbone par deux voies métaboliques principales (acétoclaste et hydrogénotrophe). Il est généralement admis que 65 à 70% du méthane provient de

la dégradation de l'acétate et que les 30-35% restant proviennent de la transformation de l'hydrogène et du dioxyde de carbone (Thauer, Jungermann *et al.* ; Tholozan 1988 ; Pavlostathis et Giraldo-Gomez 1991 ; El-Fadel, Findikakis *et al.* 1996 ; Conrad 1999).

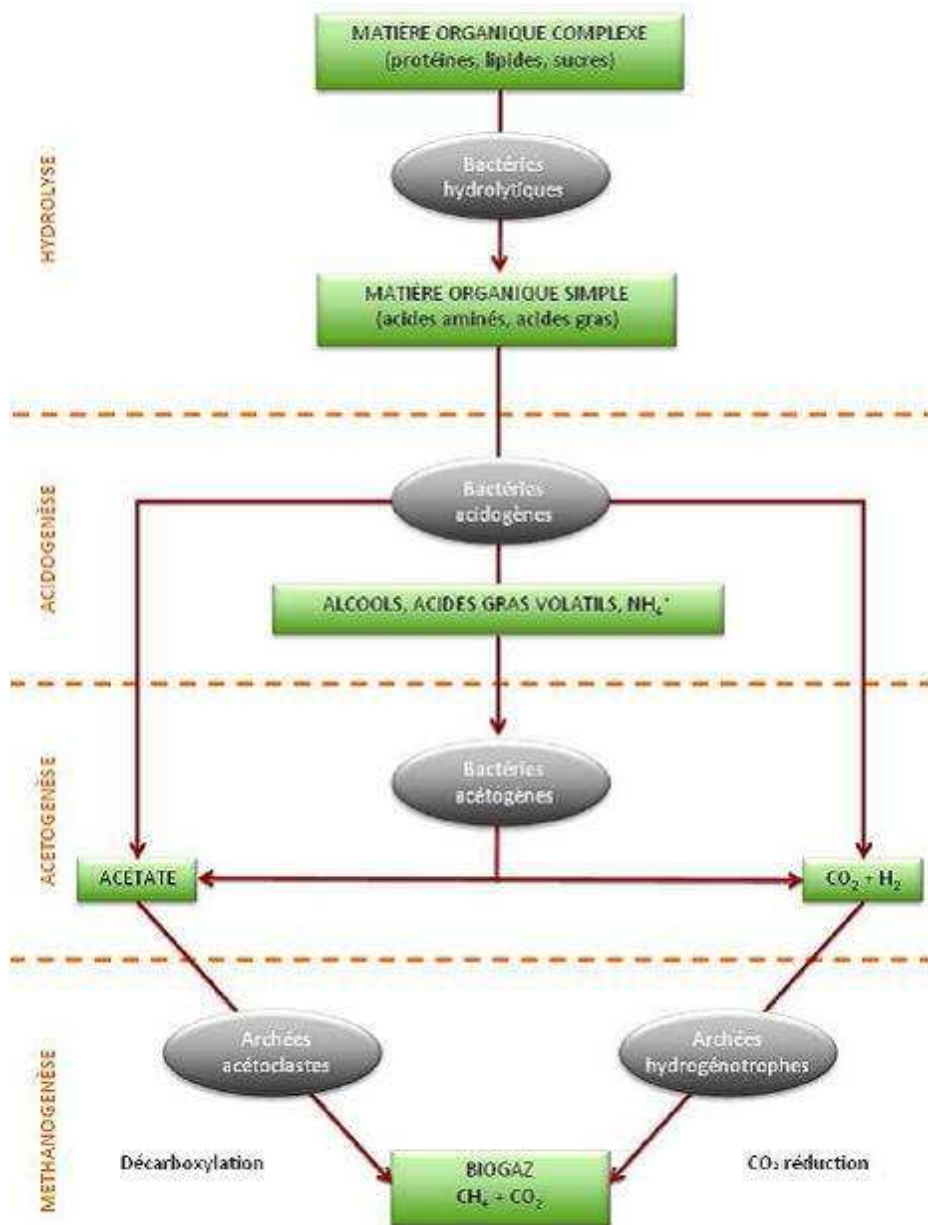
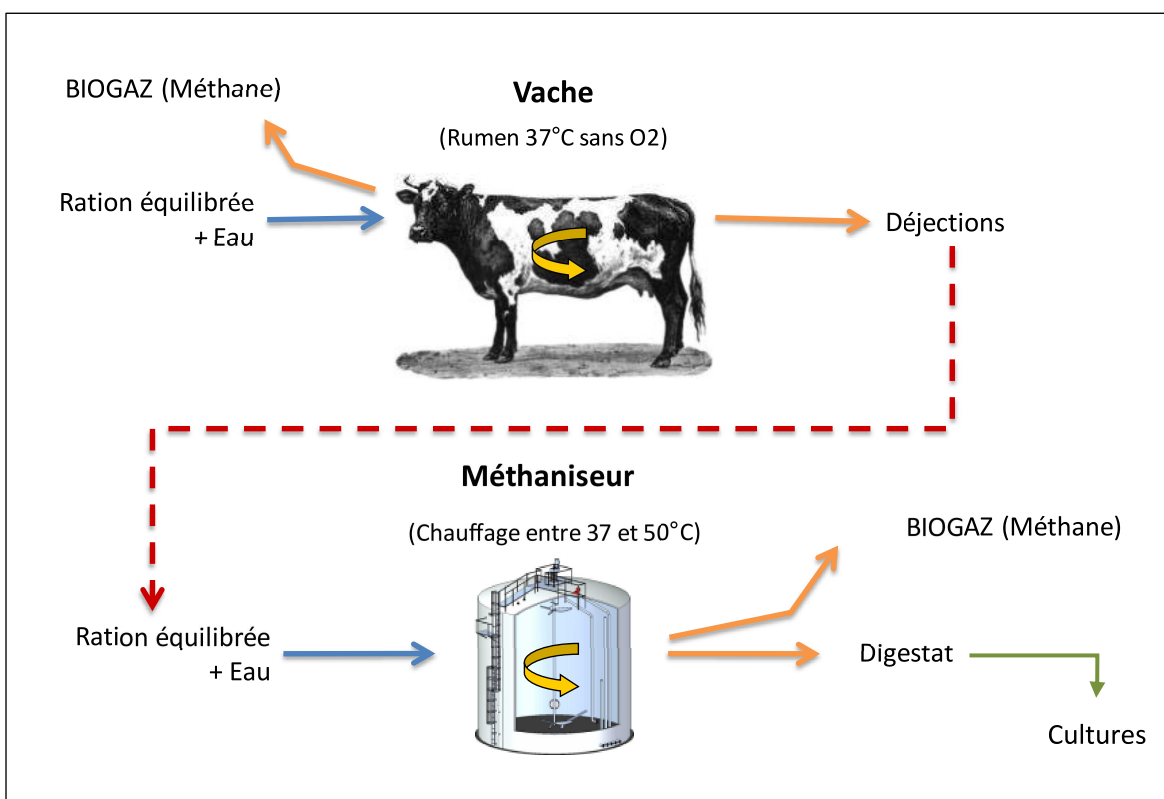


Figure 2 : Les étapes de la digestion anaérobie (Grossin 2011)

- La méthanisation

La digestion anaérobie est une réaction naturelle qui peut être reproduite de façon contrôlée au sein d'un méthaniseur ou digesteur : on parle alors plutôt de méthanisation. Cette réaction peut être comparée à celle que l'on retrouve au niveau de l'appareil digestif des ruminants (Figure 3), un apport d'une ration équilibrée (matière organique complexe + eau) au sein du rumen (en condition étanche, anaérobie, brassée et chauffée) permet la mise en place des populations bactériennes nécessaires à la digestion anaérobie. Cette réaction aboutit à la production de biogaz (méthane et dioxyde de carbone) ainsi qu'à des fertilisants sous forme de déjections animales. Un méthaniseur est un outil technologique permettant de reproduire en conditions contrôlées les étapes de digestion anaérobie décrites précédemment, aboutissant également à la production de biogaz et de résidus liquides ou pâteux fertilisants appelés digestats.

Figure 3 : Principe de la méthanisation (source Methaneo)



La transformation par méthanisation de la matière organique au sein de digesteurs présente de nombreux avantages tels que la réduction de la charge organique, la réduction des impacts environnementaux, la réduction des odeurs et des risques pathogènes ainsi qu'un bilan énergétique favorable grâce aux débouchés possibles de valorisation du biogaz (Addou, 2009).

Après méthanisation, le digestat va contenir la fraction non dégradée de la matière organique initiale et conserver la grande majorité des matières minérales, notamment l'azote. La matière organique non dégradée dans un réacteur de méthanisation sera composée d'éléments ramifiés et complexes (type lignines) et permet de maintenir le potentiel humifère des sols (ADEME, 2011 ; Moletta, 2008) (Annexe 1).

La digestion anaérobie est un procédé conservatif pour les éléments n'entrant pas dans la composition du biogaz. Ce procédé permet donc la préservation des éléments fertilisants majeurs (l'azote, le phosphore et le potassium), et des oligo-éléments dans le digestat brut. Le digestat présente un intérêt agronomique certain pour la fertilisation des sols. Il peut être épandu (via un plan d'épandage) ou également pré-composté. Dans ce cas, il aura après maturation des propriétés agronomiques assez proche de celles d'un compost (Buffière, Carrere *et al.*, 2007).

Pour ce qui est des qualités fertilisantes au sens strict lorsque le digestat est épandu tel quel, les principaux changements qui s'opèrent lors de la méthanisation sont observables sur l'azote, notamment sa forme chimique. A l'issue de la méthanisation, l'azote sera principalement sous forme minérale (45-75 % d'ammonium), rapidement exploitable par les végétaux. Les 25 – 55 % restants sont sous forme organique. Toutefois, le risque de pertes gazeuses de cet azote sous forme ammoniacale est très important (jusqu'à près de 70 % de la quantité de NH_4^+ épandue, si les conditions et quantités d'épandage ne sont pas optimales (ADEME, 2011).

Le digestat peut être épandu sous différentes formes : en tant que digestat brut, ou après une séparation de phase permettant de valoriser une phase solide composée principalement de fibres solides, d'azote organique et de phosphore, et une phase liquide contenant la majeure partie de l'azote ammoniacal. Les deux fractions peuvent alors être utilisées en fonction des besoins des plantes et permettre une meilleure gestion des éléments nutritifs, de sorte que le risque de perte d'éléments nutritifs ou de surfertilisation peut être évité. De nombreuses études ont mis en évidence l'intérêt du digestat dans la fertilisation des cultures (Féménias, 2008 ; Toine Bakx *et al.*, 2009). Des essais mis en place avec la Chambre d'Agriculture des Deux Sèvres dans le cadre du projet Tiper Méthanisation confirment par l'expérimentation les informations recueillies dans la littérature (Methaneo, 2012) (Annexe 2). Le digestat présente également un certain nombre d'intérêts sanitaires, en particulier un abattement très important des molécules odorantes des produits méthanisés (Pain B.F *et al.* 1990) ainsi que la destruction des adventices et pathogènes (Marache, 1974 ; Solagro, 2002) contenus dans les biomasses digérées (Annexe 3).

1.1.3. Mise en place de la digestion anaérobie au sein de digesteurs industriels

- Contrôle de la digestion anaérobie

Afin d'avoir un déroulement optimal de la digestion anaérobie au sein de digesteurs, plusieurs paramètres doivent être contrôlés. La littérature s'accorde sur le besoin d'un suivi continu de ces paramètres pour maintenir la stabilité du processus et des qualités et quantités de biogaz et de digestat produits (Demuyne *et al.*, 1984 ; La Farge, 1995 ; Sabonnadière, 2007 ; Moletta, 2008 ; Frédéric et Lugardon, 2007).

La température affecte la croissance et l'activité enzymatique des bactéries méthanogènes. Ces micro-organismes sont capables de se développer dans différents régimes de température (Keller *et al.*, 2002), le régime Psychrophile (4-15°C), Mésophile (20-40°C) et Thermophile (45-70°C).

Le pH optimum pour la méthanogénèse se situe entre 6 et 8 (Ehrig, 1983). Une acidification du digesteur se traduit généralement par une augmentation des AGV et influe directement sur les différents échanges acide-base qui se déroulent dans le méthaniseur, entraînant une inhibition des bactéries.

Le rapport C/N doit atteindre une valeur suffisante pour la croissance de la flore bactérienne, qui a besoin d'évoluer dans un milieu avec des teneurs en carbone (DCO), azote (N) et phosphore (P) dans les proportions suivantes 400/5/1 (Wens, Vercauteren *et al.*, 2001).

La concentration en ions peut potentiellement inhiber la méthanogénèse, comme le phosphate, le sodium, le potassium, le calcium ou encore l'ammonium (Yuen, Styles *et al.*, 1995). Des valeurs de concentration inhibitrices sont données pour l'azote amoniacale dans la littérature, allant de 1,7 à 14 g.L⁻¹ d'azote amoniacal total dans le digesteur.

L'homogénéisation des substrats est un paramètre important pour le maintien de la stabilité du processus. Il permet en effet de maintenir les surfaces d'échange entre matière et bactéries, et d'éviter les forts gradients de températures. L'homogénéité peut être assurée de différentes manières selon les technologies employées (brassage mécanique, recirculation du substrat, etc...).

- Les filières et les technologies de la méthanisation

Il est difficile de donner une description unique d'une installation de méthanisation. En effet, la conception de ces installations est totalement différente selon la nature des intrants à traiter. La méthanisation au sens large englobe à la fois les filières de transformation ainsi que les technologies.

Par filière de méthanisation, on entend ici, toute succession d'étapes ou de procédés aboutissant à la production de biogaz. La définition d'une filière requiert une connaissance précise de l'enchaînement des étapes, de la production des ressources jusqu'à la valorisation finale des produits et sous-produits (Almansour, 2011).

Les filières dites de méthanisation peuvent être distinguées selon plusieurs critères de classification (Almansour, 2011 ; Grossin 2011). On distinguera en premier lieu les filières en fonction des ressources méthanisées et des secteurs d'activité : filières valorisant des déchets agricoles (effluents d'élevage, coproduits de cultures, cultures dédiées), filières traitant les boues de stations d'épuration, filières des déchets ménagers, et enfin filières des déchets des industries agroalimentaires.

Les filières de méthanisation peuvent également être définies selon le type de procédés. Les méthaniseurs peuvent fonctionner selon différents types d'alimentations, soit en régime semi continu avec une ou plusieurs alimentations du digesteur dans la journée, soit de façon discontinue avec une seule alimentation en biomasse durant toute la durée du processus de dégradation anaérobie de cette biomasse (Moletta, 2008). Certaines filières sont caractérisées selon le type de réacteurs. On trouve de façon générale deux types de réacteurs, les réacteurs dit « mélangés » ou les réacteurs dit « pistons ». Dans les réacteurs dits « mélangés », la biomasse est en constante agitation au sein des digesteurs permettant de mélanger la biomasse fraîche avec celle en cours de dégradation. Dans les réacteurs dits « pistons », la matière entrante se déplace au cours du temps de l'entrée à la sortie du digesteur sans avoir été mélangée avec la matière en cours de dégradation (Moletta 2008). Le taux d'humidité au sein des digesteurs est également une façon de caractériser les filières de méthanisation. Il est établi de façon arbitraire dans la littérature qu'entre de 5% et 20% de matière sèche, il s'agit de digestion en voie dite « humide » alors qu'entre 20% et 50% de matière sèche, il s'agit de digestion en voie dite « sèche » (Moletta, 2008).

Enfin, les filières de méthanisation peuvent être caractérisées selon les différents modes de valorisation du biogaz (Sarbonnadière, 2007).

- La valorisation du biogaz

Le biogaz est principalement constitué de méthane (CH_4) et de gaz carbonique (CO_2). On trouve également un certain nombre de gaz minoritaires au sein du biogaz, l'hydrogène (H_2), le sulfure d'hydrogène (H_2S) et l'ammoniac (NH_3). Le méthane contenu dans le biogaz est un gaz énergétique, dont le pouvoir calorifique inférieur (PCI) à 0°C et à pression atmosphérique est de 9,94 kWh/m³. Le

biogaz a un PCI proportionnel à la quantité de méthane contenu dans celui-ci (Buffière, Carrere *et al.*, 2007).

Le biogaz peut être valorisé de différentes façons : en premier lieu par combustion pour produire de la chaleur, en deuxième lieu par cogénération : le biogaz est brûlé dans un moteur qui produit à la fois de l'énergie sous forme de chaleur et sous forme d'électricité (exemple du projet UMCTA Tiper à Thouars en France), en troisième lieu, le biogaz peut être épuré pour atteindre une qualité proche de celle du gaz naturel et être valorisé en tant que carburant : le Bio-GNV (exemple du projet d'Ordures Ménagères à Lille, ou du bioréacteur de Tryfil à Gaillac en France). Enfin, depuis peu, le biogaz épuré en biométhane peut être injecté sur le réseau de gaz naturel (Exemple du projet d'Ordures Ménagères à Forbach ou encore celui de Bioénergie de la Brie en France).

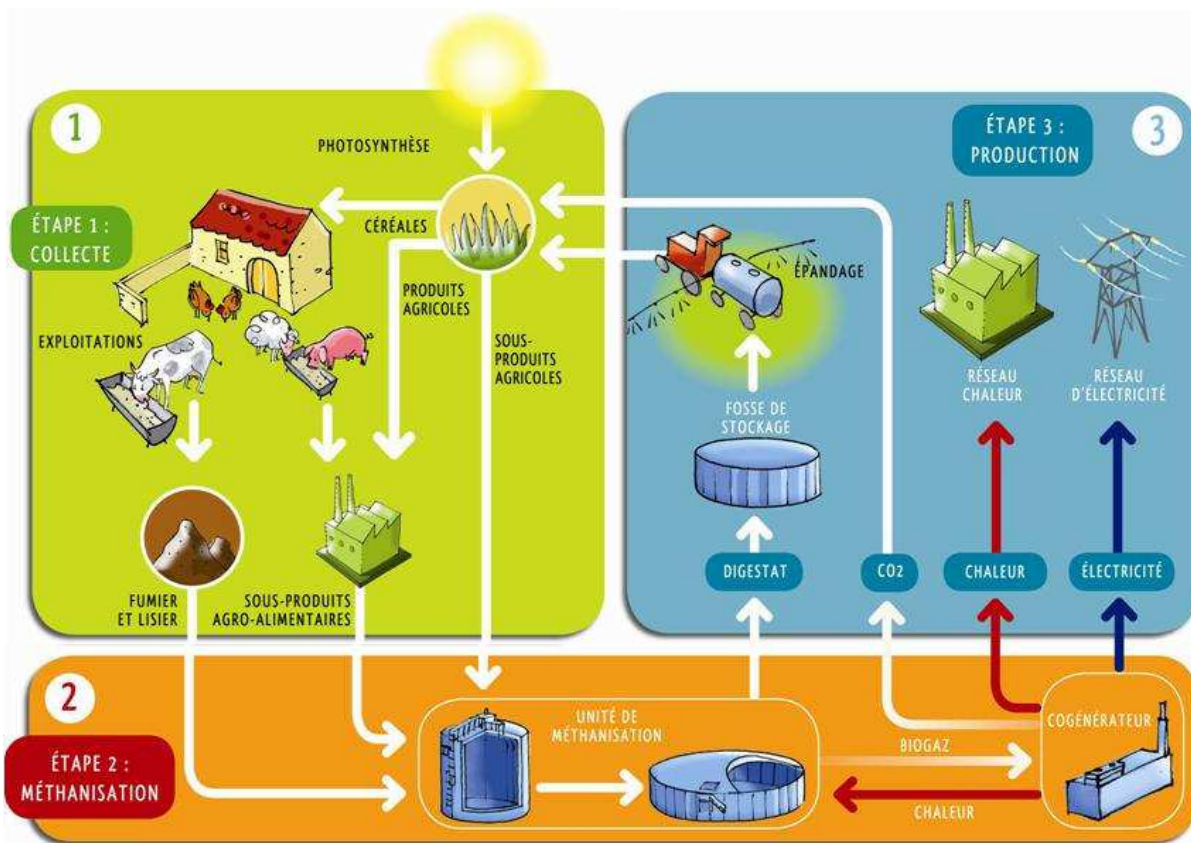
1.2. La méthanisation collective

1.2.1. La Méthanisation Collective Territoriale et Agricole

Methaneo a développé un modèle particulier de projet de méthanisation : l'Unité de Méthanisation Collective, Territoriale et Agricole (UMCTA), (Figure 4).

- **Unité de Méthanisation**, un digesteur anaérobie de biomasse qui a pour vocation de produire d'une part des fertilisants agricoles et d'autre part des énergies renouvelables (électrique et thermique, biométhane injecté sur les réseaux),
- **Collective**, cette unité appartient, en partie et s'ils le souhaitent, aux partenaires locaux (agriculteurs, industriels locaux...),
- **Territoriale**, l'UMCTA intègre dans un même projet les trois composantes d'un territoire que sont les hommes, la terre agricole et les activités économiques,
- **Agricole**, l'ensemble des biomasses valorisées au sein du digesteur sont d'origines agricoles, effluents d'élevages et/ou coproduits de cultures ou issues de la transformation de produits agricoles (déchets IAA, issues de silos, etc...).

Figure 4 : Le modèle d'Unité de Méthanisation Collective Territoriale et Agricole (UMCTA) (source Methaneo)



- Étape 1 : collecte

Sur un territoire donné, la biomasse est collectée sur un rayon de 10 à 15 km en moyenne afin d'être valorisée par méthanisation. L'origine principale de cette biomasse est agricole : fumier/lisier, résidus de cultures. Le complément est réalisé avec des déchets d'origine agroalimentaire. Les projets de méthanisation UMCTA privilégient l'apport de biomasse pérenne (fumiers et lisiers) qui sont souvent mal valorisés sur le territoire.

- Étape 2 : méthanisation

La biomasse collectée est digérée dans l'unité de méthanisation. Une étape de méthanisation en condition mésophile assure la dégradation de la matière organique et la production de biogaz. La valorisation du biogaz se fait soit par l'intermédiaire d'un moteur de cogénération permettant la production d'électricité et de chaleur d'origine renouvelable, soit par l'intermédiaire d'un épurateur permettant d'assurer la production de biométhane.

- Etape3 : production

Lorsque le biogaz est valorisé par cogénération, l'électricité est revendue à EDF ; la chaleur quant à elle, est valorisée sous forme d'eau chaude et de vapeur auprès d'industriels locaux. Une partie de la chaleur est également valorisée en autoconsommation. Lorsqu'il y a production de biométhane, il est soit revendu à un fournisseur de gaz et injecté sur le réseau, soit valorisé en tant que Bio-GNV. La biomasse digérée (digestat) est restituée aux agriculteurs afin de former une boucle agronomique durable.

Le modèle UMCTA est avant tout un modèle sachant s'adapter au territoire en développant les solutions techniques agronomiques et thermiques les plus appropriées. Le développement d'un projet UMCTA est associé aux valeurs environnementales, agronomiques et sociétales dont dépendra la pérennité.

L'objectif premier du projet est agronomique. La biomasse digérée est restituée aux agriculteurs qui l'ont fournie. Il convient donc d'associer les agriculteurs au projet et de leur permettre de retourner à leur terre ce qui a été prélevé à leur terre. Chaque apport de biomasse agricole de la part d'un agriculteur doit être compensé par le retour sur ses terres d'une quantité de digestat d'une valeur fertilisante égale ou supérieure. Le projet doit s'inscrire dans une boucle agronomique intégrant le non-appauvrissement des sols et leur non-contamination par des matières exogènes. Les déchets susceptibles d'être traités dans les installations sont tous les déchets, produits, et sous produits organiques :

- valorisables en agriculture après méthanisation,
- présentant un intérêt pour le bon fonctionnement de la méthanisation,
- ne contenant aucun produit toxique ou nuisible pour l'agriculture,
- admis dans ce type d'installation par la réglementation des installations classées.

Ces produits et déchets proviennent principalement d'agriculteurs, de collectivités, et d'entreprises agro-alimentaires, adhérents au projet le plus souvent à travers une participation dans une association dédiée.

Tous les déchets n'ayant pas de valeur agronomique après traitement, ou susceptibles de nuire à la qualité agronomique du digestat ou à son innocuité, sont refusés. Il s'agit notamment des ordures ménagères, des boues de station d'épuration urbaines, des déchets d'activités de soins, etc. L'UMCTA est un modèle qui permet de garantir la pérennité et la stabilité des projets de

méthanisation, condition essentielle du développement de cette filière. Une UMCTA repose sur le regroupement des partenaires territoriaux autour d'un projet commun.

L'unité géographique d'un Projet d'UMCTA est le « Territoire », au sein de laquelle les habitants ont le sentiment d'appartenir à une même communauté de vie et d'intérêt. Le développement du Projet d'UMCTA repose sur la fédération des énergies des acteurs principaux de ce Territoire.

Ainsi tous les partenaires potentiels du projet (industries ou agriculteurs apporteurs de biomasse, agriculteurs consommateurs de fertilisants, industries consommatrices d'énergie thermique, ...) sont, dans un premier temps, largement informés des enjeux d'un tel projet et des bénéfices que leur Territoire pourra en tirer. Ces bénéfices sont de nature environnementale, agronomique, sociétale et économique.

Dans un deuxième temps, les partenaires locaux du projet sont invités à se regrouper, d'abord en association (pas nécessairement), puis au sein d'une société, qui deviendra, *in fine*, un actionnaire majeur (de 20 à 50%) du Projet d'UMCTA.

Enfin, la valorisation de ces gisements ne doit pas déstabiliser les modes de valorisation actuels de ces biomasses. Aujourd'hui, le seul mode de valorisation des effluents d'élevage est la fertilisation, de même pour les coproduits de cultures qui sont aujourd'hui enfouis pour amender les sols. L'ensemble du digestat produit sera restitué aux agriculteurs, leur permettant de maintenir la fertilisation de leurs terres tout en produisant de l'énergie.

Methaneo a développé et financé le premier projet d'UMCTA en France, Tiper Méthanisation (www.info-tiper.fr). Il s'agit d'un projet de cogénération d'une puissance installée de 2MW électriques valorisant 80 000 T/an de biomasse. Le procédé en place est une digestion en voie humide avec deux digesteurs en régime thermophile et un post digesteur en régime mésophile (source Methaneo).

Le modèle UMCTA se veut partenarial, ancré sur son territoire et porte des valeurs dépassant les simples aspects énergétiques et environnementaux de la méthanisation. L'un des objectifs de ces travaux de recherche est d'évaluer la pertinence de ce modèle et de ses capacités de déploiement à l'échelle du territoire aux travers des diverses évaluations, multicritères et multi-échelles.

1.2.2. Réglementation et soutien de la méthanisation

Le développement d'unités de méthanisation est encadré par des dispositifs réglementaires Européens et Français rattachés aux réglementations relatives au traitement des déchets, au biogaz, ou à la méthanisation (ADEME, 2010).

- Réglementation ICPE

L'activité de méthanisation est soumise à la réglementation des Installations Classées pour le Protection de l'Environnement (ICPE) 2780-1. Il existe trois régimes distincts : la déclaration, l'enregistrement et l'autorisation. Chacun de ces régimes présentent des caractéristiques spécifiques.

- Le phasage des demandes de permis de construire et d'autorisation d'exploiter

La construction d'une unité de méthanisation nécessite la rédaction et le dépôt d'un permis de construire. Cette démarche est conjointe à la demande d'autorisation d'exploiter.

- La demande d'agrément sanitaire dans le cas d'utilisation de sous-produits animaux

En règle générale l'agrément sanitaire au titre du règlement (CE) n° 1774/2002 est requis pour les installations de compostage ou de méthanisation utilisant comme matière première, seule ou en mélange, des sous produits animaux de catégorie 2 ou de catégorie 3.

- Encadrement de la valorisation du digestat

Le digestat est considéré comme un déchet et sa valorisation (digestat brut, solide ou liquide) est soumise à un plan d'épandage. Pour sortir de la catégorie de déchets, plusieurs voies sont possibles, soit la normalisation soit l'homologation. Il est prévu à terme qu'une législation spécifique soit créée pour le digestat.

- Cadre tarifaire

La réglementation Française s'est structurée autour de deux tarifs de rachat obligatoire : le premier pour la production d'électricité, le second pour la réinjection de biogaz dans les réseaux de gaz de ville. La structuration des tarifs a été construite, dans les deux cas, autour d'un modèle « français », qui se veut vertueux, aussi bien d'un point de vue énergétique, environnemental que sociétal. Selon les filières de méthanisation, des tarifs de base différents ont été établis. Un certain nombre de primes ont été instaurées, pour chaque filière, afin de maximiser l'efficacité énergétique ou encore de favoriser la valorisation d'une typologie d'entrants. Les caractéristiques de la législation française

incitent à une valorisation énergétique maximale, favorisent la valorisation d'effluents d'élevage et de coproduits de cultures. Les cultures dédiées ne sont pas encouragées au travers de primes spécifiques comme cela peut être le cas dans certains pays Européens. Le cadre tarifaire est un élément déterminant pour la structuration de la filière et oriente la typologie des modèles de méthanisation qui se développent sur le territoire.

- *Cadre réglementaire de la cogénération :*

Réévalué en Avril 2011, le tarif de cogénération permet de toucher entre 11,19 et 21,4 cts€/kWh_{électriques} produits selon les différentes filières (méthanisation agricole, méthanisation de déchets industriels ou de déchets ménagers). Pour chacune d'entre elles, le tarif est structuré de la même manière : un tarif de base par filière et une succession de primes pouvant s'additionner. Une prime aux entrants, favorisant la valorisation d'effluents d'élevage et une prime à l'efficacité énergétique favorisant les projets dont l'utilisation de chaleur permet une substitution sincère d'énergie fossile.

La réévaluation des tarifs met en avant la promotion des installations agricoles de petite puissance et impose une efficacité énergétique accrue. Ce positionnement très clair à travers la structuration des tarifs sera déterminant dans la typologie des modèles qui permettront aux projets de cogénération de voir le jour.

- *Cadre réglementaire de l'injection réseau :*

Mis en place en novembre 2011, le tarif d'injection réseau permet une valorisation économique de 6,4 à 12,4 cts€ /kWh_{primaire} injecté selon les filières. Pour chacune d'entre elles, le tarif est structuré de la même manière : un tarif de base par filière et une prime aux entrants selon leur nature.

Les tarifs d'injection réseau sont accompagnés d'une réglementation permettant une traçabilité de l'utilisation du biométhane injecté à travers la mise en place de Certificats de Garanties d'Origine (CGO). Ces certificats ouvrent la possibilité pour les utilisateurs finaux d'attester qu'ils consomment non pas du gaz naturel mais bien du gaz biométhane d'origine renouvelable. Les conséquences possibles de la mise en place de ce mécanisme sont la diminution de l'empreinte carbone d'industriels qui consommeront demain du biométhane en remplacement de gaz naturel, ou encore la possibilité de faire rouler des véhicules au biométhane carburant 100% renouvelable en remplacement du GNV fossile.

La mise en place des tarifs d'injection ouvre de nouvelles possibilités. En premier lieu, ils permettent l'émergence de nouveaux projets en ouvrant la possibilité de se raccorder sur des réseaux existants.

Mais cette réglementation ouvre également la possibilité de valoriser d'une façon « virtuelle » l'utilisation de biogaz, ce qui représente une avancée par rapport à la législation qui existait jusque là.

Les tarifs ont été réalisés pour que l'ensemble des installations par filière, petites ou grandes, individuelles ou collectives, trouvent une rentabilité économique. La structuration des primes aux intrants privilégie cependant la méthanisation agricole.

La France dispose aujourd'hui d'un dispositif complet d'accompagnement et de soutien de la filière, structurée sur l'ensemble des domaines d'intervention de l'état à différents niveaux d'intervention. Des modifications, ajustements et évolutions réglementaires auront lieu au fur et à mesure de l'émergence des projets et des modèles de méthanisation qui verront le jour. L'un des objectifs de ces travaux, dans le cadre d'une compréhension globale et multi-échelle est d'anticiper l'émergence de modèles viables et les évolutions possibles et nécessaires de la législation pour favoriser le développement de la méthanisation.

- Soutien des pouvoirs publics

La France a su se doter de mécanismes de soutien et d'accompagnement pour les porteurs de projets et professionnels de la filière. Au delà de la mise en œuvre de tarifs de rachat, des mécanismes de subventions et d'aides au développement existent. La méthanisation est ainsi soutenue par les pouvoirs publics (l'Ademe, Conseil Général, Région et fonds Européens) qui à travers leurs expertises peuvent accorder des subventions pour des projets jugés innovants, exemplaires ou nécessaires au territoire. Des aides au développement ainsi qu'à la construction peuvent également être accordées, selon les cas, par les mêmes organismes. Il n'y a pas de cadre national définissant un montant d'aide par projet. Une harmonisation est organisée au niveau de l'Ademe, mais chaque Région garde la maîtrise du niveau de soutien qu'elle accorde à la méthanisation. Les niveaux d'aides peuvent aller jusqu'à 50% du montant total du projet sur l'assiette éligible ; le projet TIPER Méthanisation a par exemple reçu un montant global de 18% de subvention (Ademe, Région, Europe) (source : Methaneo). Certaines régions très motrices pour le développement de la méthanisation sur leurs territoires ont créé des structures dédiées ou des guichets uniques pour soutenir les projets. C'est notamment le cas de la Région Poitou Charente, Bretagne Pays de la Loire, Midi-Pyrénées ou encore Aquitaine avec un programme dédié nommé METHAQTION. Les aides de ce type n'ont pas vocation à perdurer dans le temps, elles permettent d'accompagner les premières références nationales et disparaîtront à terme lorsque l'équilibre de la filière sera en place (tarifs de rachat ajustés, prix de construction au niveau des standards européens,...).

CHAPITRE 2 :

L'évaluation des gisements mobilisables et de la production de biogaz à différentes échelles

2.1. Introduction à l'évaluation à différentes échelles

2.1.1. Champ de l'évaluation

La question de l'évaluation du potentiel de mobilisation de biomasse au sein d'un territoire est au cœur des problématiques liées à l'ensemble des projets bioénergie. En effet, tout projet basé sur la valorisation de biomasse est soumis, à un moment ou un autre, à la problématique de pérennité du gisement. Cette problématique complexe recouvre de nombreux champs de questionnements, tels que la localisation du gisement, sa quantification, son degré de renouvellement dans le temps, ou encore son taux de mobilisation.

Des travaux ont déjà été menés dans ce sens, en particulier sur les ressources permettant de produire des biocarburants de première génération (Ademe, Février 2011), afin d'évaluer d'une part la quantité de biomasse mobilisable à l'échelle nationale et d'autre part la pérennité de la ressource. C'est notamment le cas de la paille qui a fait l'objet en France de plusieurs publications (Coopénergie, 2007) pour des usages en bioénergie (combustion, carburant de 2nd génération).

A l'échelle nationale on constate que pour les filières matures, principalement celle du biocarburant de première génération et du bois énergie, la littérature scientifique et les références ne manquent pas. A l'inverse, pour les filières en pleine émergence, la lisibilité sur la typologie des ressources et sur leur pérennité manquent encore de références. On trouve de nombreuses études réalisées sur des périmètres d'évaluation différents (échelle géographique, types d'intrants), qui se complètent et se recoupent, mais aucune qui fasse une synthèse globale sur l'ensemble des gisements agricoles. On peut citer par exemple, des études traitant de la production d'effluents d'élevage à l'échelle nationale [Biomasse Normandie, Septembre 2012], mais qui n'abordent pas l'aspect production de biogaz. On trouve également des études sur le potentiel de production de biogaz à partir d'une évaluation multi-déchets (effluents d'élevage, ordures ménagères, boues de station d'épuration, déchets agroindustriels) à l'échelle départementale (Chambre d'Agriculture de Haute Marne, 2008), voire régionale (Energivie, 2004). L'étude la plus complète à l'échelle nationale sur le potentiel biogaz (AFGNV, Ademe, Atee Club Biogaz, GDF Suez, IFP, 2008) prend en compte une typologie d'intrants beaucoup plus large (déchets de l'agriculture et agroalimentaire, de la sylviculture et microalgues).

Par ailleurs, un travail précédent, en particulier sur les coproduits de cultures, notamment sur les coproduits de maïs en Gironde a fourni une première évaluation au niveau national et départemental, sans cependant prendre en compte explicitement les contraintes d'approvisionnement à l'échelle locale (Almansour, 2011).

L'objectif du présent travail de recherche porte sur l'identification et la mobilisation de nouvelles biomasses qui ne seraient pas valorisées, ou encore de biomasses pour lesquelles une valorisation par méthanisation ne changerait pas l'usage actuel de leur valorisation. Les travaux portent sur l'évaluation de l'ensemble des gisements agricoles, qu'ils soient d'origine animale (fumier, lisier) ou végétale (coproduits et déchets de culture), afin de déterminer le potentiel de chaque production et d'identifier les gisements les plus pertinents pour des usages en méthanisation. Il s'agit de réaliser une synthèse exhaustive des productions, d'identifier leur localisation et d'extrapoler par territoire le potentiel de mobilisation et potentiel biogaz issus de ces gisements. Au-delà de l'évaluation et de la comparaison de potentiel entre les différents gisements, l'évaluation s'attachera également à caractériser et à comparer ce potentiel à différentes échelles.

Plusieurs raisons expliquent le choix d'évaluer spécifiquement le gisement agricole. Il s'agit d'une part d'un gisement pour lequel persistent un certain nombre d'inconnues sur le potentiel de mobilisation. Ce manque d'informations concerne notamment les coproduits de culture (coûts de mobilisation, organisation des récoltes, machinisme, etc...). D'autre part, il s'agit d'un gisement pérenne, n'étant pas soumis à des concurrences d'usage. Les effluents d'élevage sont épanchés, le digestat issu de ces effluents le sera également. Les coproduits pris en compte dans cette évaluation sont aujourd'hui laissés aux champs, le digestat issu de ces produits le sera également.

Enfin, l'évaluation des gisements agricoles entre en adéquation avec le modèle UMCTA porté par METHANEO pour lequel le territoire et la mise en place de système agricole pérenne sont essentiels. Afin de développer une réflexion en accord avec ce modèle, les déchets des industries agroalimentaires et cultures énergétiques au sens des biocarburants de première génération n'ont pas été pris en compte. Plusieurs raisons expliquent ce choix. En premier lieu, pour les industries agroalimentaires, il est difficile de faire des projections à la fois sur les quantités de déchets produits et sur les possibilités de mobilisation car des filières de valorisation sont déjà en place et très concurrentielles. En second lieu, les cultures énergétiques ont été exclues de l'étude à la fois pour des raisons éthiques en accord avec le modèle UMCTA mais également parce que le sujet de cultures dédiées a déjà été très largement traité au niveau des biocarburants de 1^{ère} génération. Néanmoins, dans le chapitre 3, la question des cultures dédiées sera posée à l'échelle de l'exploitation dans un

objectif d'autonomie (production de fertilisant et biométhane carburant via la valorisation par méthanisation de légumineuse).

2.1.2. Méthodologie d'évaluation des gisements et de la production biogaz

Dans ce travail, nous cherchons à évaluer un potentiel prenant en compte des ressources multiples. Il s'agit d'une part de recenser et de localiser l'ensemble des gisements agricoles mobilisables et d'autre part de quantifier la production de biogaz selon ces différents gisements. L'évaluation s'organise selon la démarche suivante :

- Lister et compiler l'ensemble des productions agricoles sur le territoire,
- Déterminer pour l'ensemble des productions agricoles quels sont les produits, les sous-produits et les déchets induits par ces productions,
- Pour chaque flux identifié, comprendre les pratiques locales de valorisation de ces produits, coproduits, sous-produits ou déchets,
- Quantifier l'ensemble de ces flux,
- Qualifier l'intérêt de ces gisements pour la méthanisation.

Pour cette évaluation, des bases de données spécifiques ont été constituées et compilées à partir de données statistiques.

• Le Cheptel

Les données sont extraites des bases de données AGRESTE établies lors du Recensement Général Agricole (source : 2000, 2010). Elles renseignent sur le nombre d'animaux par espèce et par production à différentes échelles (Région, Département, Canton).

• La durée de stabulation

Il s'agit de déterminer le temps de séjour des animaux en bâtiment par espèce et par production. Cela nous permet de déterminer la quantité d'effluents mobilisable pour la méthanisation, le reste des effluents étant émis aux champs et non récupérable. Les données sur les périodes de stabulation sont issues d'une part d'enquêtes réalisées auprès des conseillers en élevages des différentes Chambres d'Agricultures (Annexe 4), et d'autre part des données non renseignées par les enquêtes territoriales (Biomasse Normandie, Septembre 2012). L'ensemble des données prises en compte au sein de l'évaluation est renseigné en Annexe 5. Des coefficients de stabulation ont notamment été attribués pour chacune des productions animales pour l'ensemble des départements.

- **La typologie des effluents**

Il s'agit de déterminer la proportion d'effluents qui est sous forme de lisier ou de fumier. Les effluents, vont être, selon les espèces, le type de production et de logement des animaux (logette, litière, raclage, aire paillée, caillebotis), de nature différente. Il y aura soit des effluents solides (fumiers mous, fumiers pailleux), soit des effluents liquides ou pâteux (lisiers, fientes). Les données prises en compte sont issues des enquêtes territoriales auprès des Chambres d'Agriculture ainsi que du retour d'expérience de Methaneo au niveau des zones pour lesquelles la société porte des projets. Il faut noter que les pratiques d'élevage sont en constante évolution et que les systèmes lisiers sont en progression, notamment en raison du prix de la paille et de la réglementation dont la mise aux normes des bâtiments s'accompagne de la mise en place de système « caillebotis » (effluents sous forme de lisiers). L'ensemble des données prises en compte au sein de l'évaluation sont renseignées en Annexe 6. Des coefficients de répartition entre la production d'effluents solides (fumiers) et d'effluents liquides (lisiers) ont été attribués par Département pour l'ensemble des productions animales.

- **Le tonnage des effluents**

Il s'agit de la quantité d'effluents que produit un animal par an selon le type de production animale, la typologie de l'effluent et le temps de stabulation. L'ensemble des données prises en compte au sein de l'évaluation est renseigné en Annexe 6. Pour simplifier l'évaluation, seuls deux types d'effluents ont été considérés, les fumiers et les lisiers pour lesquels des coefficients moyens ont été attribués pour chaque type de production. L'ensemble de l'évaluation est réalisée en TMS (Tonne de matière sèche) et non en TMB (Tonne de matière brute). Ceci nous permet d'avoir un indicateur de comparaison commun pour l'ensemble des biomasses. En plus d'une information quantitative, cet indicateur nous permet de comparer les biomasses sur un aspect qualitatif de production de biogaz.

- **La composition des effluents**

La composition des effluents est extrêmement variable selon les espèces, le type de production, le type de logement des animaux, les pratiques locales (très paillées, peu paillées, etc...). Les compositions prises en compte sont issues soit des enquêtes territoriales, soit des normes CORPEN. Elles nous renseignent sur les valeurs fertilisantes azote (N), phosphore (P), potasse (K) ainsi que sur le taux de matière sèche (%MS) et le taux de matière organique (%MO). L'ensemble des données prises en compte au sein de l'évaluation est renseigné en Annexe 6.

- **La Surface Agricole Utile (SAU)**

Les données extraites sont des bases de données AGRESTE établies lors du Recensement Général Agricole (source : 2000, 2010), et renseignent sur la SAU par type de production à différentes échelles (Région, Département, Canton).

- **Le rendement de coproduits par hectare (RCH)**

Il s'agit de la quantité de matière que l'on peut mobiliser par hectare et par type de production. Ces données sont issues d'une série d'expérimentations menées par METHANEO depuis 5 ans. Les données sur les coproduits de céréales à paille, du colza, du tournesol et de marc de raisins proviennent d'essais réalisés pour le projet TIPER Méthanisation. Les essais sur les coproduits du maïs ont été réalisés en Gironde avec le partenariat du GRCETA (Annexe 7). Ils sont exprimés en T MB/ha, l'ensemble des données prises en compte dans l'évaluation est renseigné au sein de l'Annexe 6.

- **La composition des coproduits de culture**

La série d'expérimentations menée par METHANEO depuis cinq ans sur la récolte de coproduits a permis la réalisation d'échantillonnage. Les données prises en compte sont issues des analyses réalisées par différents laboratoires, notamment l'APESA, le LCA ou l'INRA de Narbonne, ainsi que sur les échantillons transmis par METHANEO. Elles nous renseignent sur les valeurs fertilisantes azote (N), phosphore (P), potasse (K) ainsi que sur le taux de matière sèche (%MS) et le taux de matière organique (%MO). L'ensemble des données prises en compte dans l'évaluation est renseigné au sein de l'Annexe 6.

- **La composition des déchets de culture**

Les compositions prises en compte sont soit issues des enquêtes territoriales, soit des normes CORPEN. Elles nous renseignent sur les valeurs fertilisantes azote (N), phosphore (P), potasse (K) ainsi que sur le taux de matière sèche (%MS) et le taux de matière organique (%MO).

- **Le pouvoir méthanogène de la biomasse**

Il s'agit de la quantité de méthane produite lors de la méthanisation pour chaque type de production animale ou végétale. Le pouvoir méthanogène, appelé « BMP » (Biochemical Methane Potential) est exprimé en L CH₄/ kg MO. Les données sont issues de références bibliographiques, ainsi que des données de constructeurs (Xergi, Tiper Méthanisation) ainsi que d'analyses effectuées en

laboratoire, soit par l'INRA de Narbonne soit par l'APESA, notamment pour les « BMP » de coproduits de cultures.

- **Le taux de méthane du biogaz**

Ce taux nous renseigne sur la quantité de méthane présent dans le biogaz. Ce taux peut varier en raison de nombreux paramètres (régime de digestion thermophile ou mésophile, co-digestion de substrats ou non). Dans le cadre de l'évaluation il a été considéré que toute la biomasse d'origine agricole (effluents et coproduits de culture) avait un taux de méthane de 60%.

- **Le potentiel de production de biogaz**

Il s'agit de la quantité de biogaz que produit une biomasse selon ses caractéristiques au sein d'une unité géographique précise. Ce potentiel se traduit par exemple à l'échelle cantonale de la manière suivante :

- Les effluents d'élevage

*Quantité d'animaux dans un canton * production d'effluent de cet animal par mois * temps de séjour en bâtiment de l'animal * %MO de l'effluent * %MS de l'effluent*BMP de l'effluent*taux de méthane du biogaz de l'effluent.*

- Les coproduits de culture

*SAU de la culture dans un canton * production de ce coproduits par hectare * %MO du coproduit * %MS du coproduit *BMP du coproduit *taux de méthane du biogaz du coproduit.*

2.2. Biomasse mobilisable et production de biogaz issue des élevages

2.2.1. Les déjections des bovins à lait

- Localisation des cheptels

La production laitière est très présente sur le territoire (Figure 5). En particulier dans le Grand Ouest (régions Bretagne, Pays de la Loire et Normandie), ou encore dans le Grand Est, la région Nord, et le sud du Massif Central où ces productions sont majoritaires. Certaines zones sont quant à elles très peu spécialisées en production laitière, notamment la Région Ile de France, le Centre, l'Aquitaine et le pourtour Méditerranéen (Languedoc Roussillon, PACA).

Entre 2000 et 2010, le cheptel bovin laitier a vu sa population décroître de 11% (source RGA 2000-2010).

- Effluents d'élevage mobilisables
 - Temps de séjour des animaux

La production des effluents d'élevage laitiers est très diverse à l'échelle du territoire et dépend de nombreux facteurs tels que le climat, le mode d'élevage extensif ou intensif, les pratiques locales ou encore la disponibilité de pâturage. Malgré les contrastes que l'on trouve d'une exploitation à l'autre au sein d'un même département ou d'une région à l'autre, entre des animaux qui passent l'intégralité de leur temps en bâtiment (intensif) ou à contrario, la totalité du temps aux champs. Les vaches laitières passent la majorité de leur temps en bâtiments, on constate sur l'ensemble des régions un temps de séjour à l'étable moyen de 7 mois (Annexe 5). L'évaluation des quantités de gisements mobilisables pour la méthanisation prend en compte les spécificités de chaque territoire, un coefficient étant attribué par département.

- Type d'effluents

La configuration des bâtiments, le mode de stabulation, la disponibilité et le coût de la paille entraînent une diversité très grande entre les effluents d'élevage que l'on peut trouver sur une exploitation de vaches laitières.

Dans le cadre des plans d'épandage réalisés par les Chambres d'Agriculture et des mises aux normes des exploitations, une classification détaillée des effluents a été réalisée, caractérisant différentes

formes de lisiers (des lisiers dilués aux eaux de traite jusqu'aux lisiers pailleux) et de fumier (du fumier mou au fumier très pailleux).

Dans le cadre de cette évaluation deux effluents ont été retenus, du lisier et du fumier. Un coefficient étant attribué par département pour le taux de matière sèche (%MS) à chacun des deux effluents (Annexe 6). En moyenne sur l'ensemble des départements, on trouvera des fumiers (80%) et des lisiers (20%).

- Quantité d'effluents produite

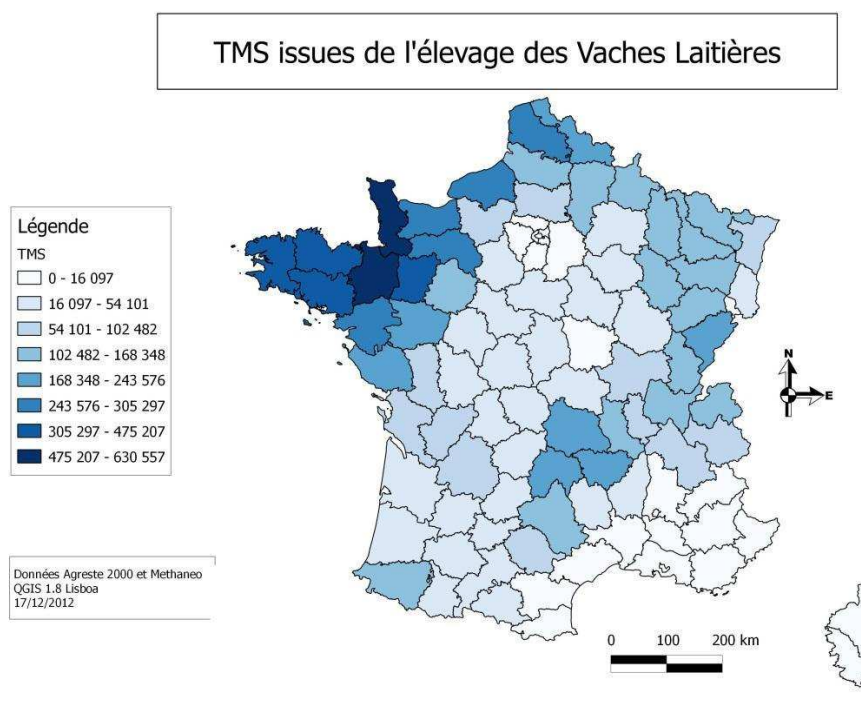
La quantité d'effluents produite va dépendre d'une part du temps de séjour des animaux en bâtiments et d'autre part de la typologie des effluents produits (fumiers, lisiers, etc..). La production d'effluents quant à elle est saisonnière, on constate par conséquent une répartition été (80%)/ hiver (20%) de production d'effluents en bâtiments.

Les quantités d'effluents produits en bâtiment ont été calculées pour une vache laitière et sa suite, les données prises en compte sont de 1 T/mois de fumiers et de 0,7 m³/mois d'effluents liquides par vache laitière.

- Effluents d'élevage mobilisables

La production d'effluents d'élevage laitier est très importante sur le territoire, il s'agit de la principale source de production d'effluents d'élevage. Elle représente 5,56 millions de tonnes de matière sèche. La majorité du tonnage en matière sèche de ces effluents est émise sous forme de fumier (92%), le reste sous forme de lisiers (8%).

Figure 5: Carte des gisements d'élevage de Vaches Laitières (TMS par département)



- Production de biogaz

Le potentiel de production annuelle de biogaz issu des effluents des élevages laitiers s'élève à $1\,826 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, soit environ 12,05 TWh. Le potentiel de production de biométhane est assuré à 94% par la production de fumier et à 6% par la production de lisier.

2.2.2. Les déjections de bovins à viande

- Localisation des cheptels

La production de viande bovine est très présente sur le territoire (Figure 6: Carte des gisements d'élevage de Bovins à Viande (TMS par département)). En particulier dans le Massif Central (régions Bourgogne, Auvergne, Limousin), ou encore dans les Pyrénées et le Grand Ouest (région Pays de la Loire notamment) où ces productions sont majoritaires. Certaines zones sont quant à elles très peu spécialisées en production de viande bovine, notamment la Région Ile de France, la région Rhône-Alpes et le pourtour Méditerranéen (Languedoc Roussillon, PACA).

Entre 2000 et 2010, le cheptel de bovin à viande a vu sa population décroître de 5% (source RGA 2000-2010).

- Effluents d'élevage mobilisables

- Temps de séjour des animaux

La production des effluents d'élevage de bovins viandes est dépendante de critères identiques à ceux décrits précédemment dans les productions de vaches laitières. On constate que les productions de bovins à viande passent la majorité de leurs temps en extérieur et en moyenne 5 mois en bâtiments.

- Type d'effluents

La configuration des bâtiments, le mode de stabulation, ainsi que les pratiques d'élevage entraînent une diversité très grande entre les effluents d'élevage que l'on peut trouver sur une exploitation de bovins à viande. En moyenne sur l'ensemble des départements, on trouve des fumiers (95%) et des lisiers (5%).

- Quantité d'effluents produite

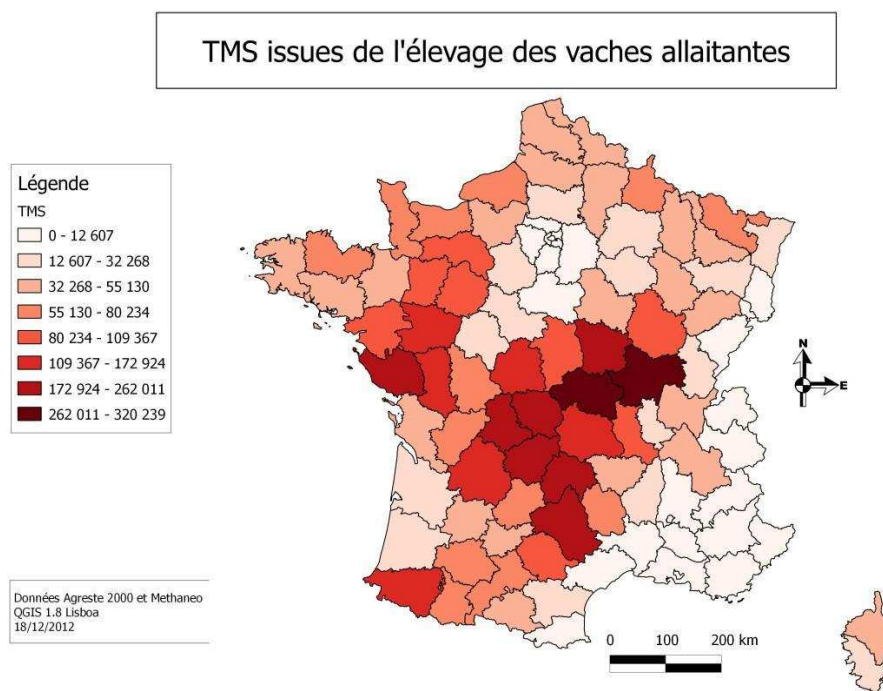
La quantité d'effluents produite est très saisonnière et dépend du temps de séjour des animaux en bâtiments, qui en l'occurrence est assez faible pour ce type de production. On constate une production d'effluents mobilisables uniquement sur les périodes d'hiver.

Les quantités d'effluents produits en bâtiment ont été calculées pour un bovin à viande et sa suite, les données prises en compte sont de 1 T/mois de fumiers et de 0,7 m³/mois d'effluents liquides par bovin à viande.

- Effluents d'élevage mobilisables

La production d'effluents d'élevage de bovins à viandes est très importante sur le territoire, il s'agit de la seconde source de production d'effluents d'élevage. Elle représente 4,44 millions de tonnes de matière sèche. La majorité du tonnage en matière sèche de ces effluents est émise sous forme de fumiers (98%), le reste sous forme de lisiers (2%).

Figure 6: Carte des gisements d'élevage de Bovins à Viande (TMS par département)



- Production de biogaz

Le potentiel de production annuelle de biogaz issu des effluents de bovins à viande s'élève à $1\,474 \times 10^6 \text{ m}^3$, soit environ de 9,73 TWh. Le potentiel de production de biométhane est assuré à 99% par la production de fumiers et à 1% par la production de lisiers.

2.2.3. Les déjections de porcins

Localisation des cheptels

La production de viande porcine est très localisée sur le territoire (Figure 7: Carte des gisements d'élevage porcins (TMS par département)). En effet, cette production est majoritairement située dans le Grand Ouest (Bretagne, Basse-Normandie, Pays-de-la-Loire), en particulier dans la région Bretagne où l'on trouve la majorité des élevages. On trouve d'autres bassins de production plus minoritaires en région Nord-Pas-de-Calais. Dans le reste du territoire, cette production est marginale.

Entre 2000 et 2010, le cheptel porcine a vu sa population décroître de 7% (source RGA 2000-2010).

- Effluents d'élevage mobilisables

- Temps de séjour des animaux

La configuration des élevages porcins est assez homogène sur l'ensemble du territoire. Il s'agit dans la majorité des cas de systèmes hors sol au sein desquels les animaux passent 100% du temps en bâtiment. Une part minimale du cheptel est élevée en système extensif (agriculture biologique, label rouge, etc...), environ 3% (source : RGA 2000).

- Type d'effluents

La configuration des bâtiments et les modes de stabulation sont très divers au sein des départements (caillebotis, sols raclés, cases collectives ou individuelles, paillées ou non, etc...). La quasi-totalité des effluents d'élevage produits, sont sous forme de lisiers, soit 100%.

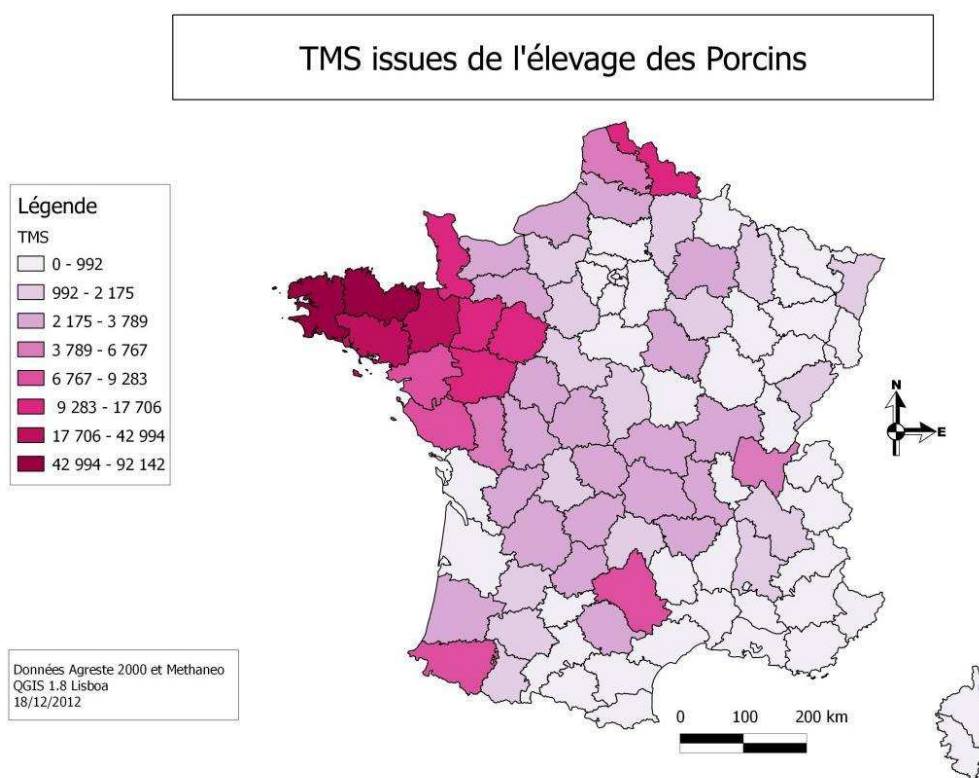
- Quantité d'effluents produite

La quantité d'effluents produite est très régulière dans la mesure où les animaux sont 12 mois par an en bâtiment. La quantité d'effluents d'élevage mobilisable est constante sur l'année. Les quantités d'effluents produits en bâtiment ont été calculées pour une truie mère et sa suite, les données prises en compte sont de 0,09 m³ d'effluents par mois et par animal.

- Effluents d'élevage mobilisables

La production d'effluents porcins est conséquente, elle représente 0,56 millions de tonnes de matière sèche.

Figure 7: Carte des gisements d'élevage porcins (TMS par département)



- Production de biogaz

Le potentiel de production annuelle de biogaz issu des élevages porcins s'élève à $203 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, soit environ 1,34 TWh. Le potentiel de production de biogaz est assuré à 100% par la production de lisiers.

2.2.4. Les déjections des équidés

- Localisation des cheptels

L'élevage équin est majoritairement situé dans le Grand Ouest (Bretagne, Basse-Normandie, Pays-de-la-Loire). On trouve d'autres zones de production plus minoritaires à l'Est du Massif Central. Dans le reste du territoire, cet élevage est présent mais peu concentré (Figure 8: Carte des gisements d'élevage Equins (TMS par département)).

Entre 2000 et 2010, le cheptel équin est resté stable (source RGA 2000-2010).

- Effluents d'élevage mobilisables

- Temps de séjour des animaux

La production des effluents d'élevage équins est dépendante de la typologie de l'élevage, des haras, des centres d'entraînement, des centres équestres. Les chevaux de course passent la majeure partie de leur temps en bâtiments quel que soit le département, ce qui n'est pas le cas des chevaux de centres équestres. On constate en moyenne que la majorité des chevaux ont un temps de séjour proche voir équivalent à celui des chevaux de course, soit 12 mois.

- Type d'effluents

La configuration des bâtiments est très homogène sur l'ensemble du territoire avec un placement en box paillés ou copeaux.

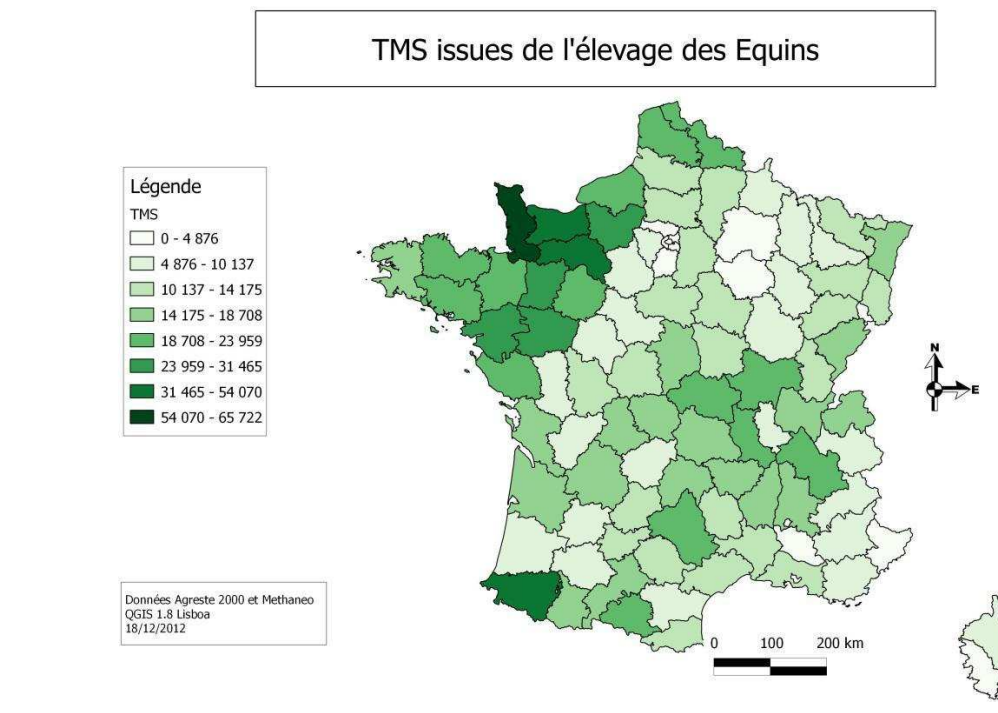
- Quantité d'effluents produite

La quantité d'effluents produite est constante dans la mesure où la majorité des chevaux passent 100% de leurs temps en box. La production d'effluents mobilisables est constante sur l'année. Les quantités d'effluents produites en bâtiments ont été calculées pour un cheval par box, les données prises en compte sont de 0,75 T/mois/cheval de fumiers.

- Effluents d'élevage mobilisables

La production d'effluents d'élevage équine est très importante sur le territoire, il s'agit de la 4ème source de production d'effluents d'élevage. Elle représente 4,04 millions de tonnes de matière sèche. La quasi-totalité du tonnage en matières sèches de ces effluents est émise sous forme de fumiers (100%).

Figure 8: Carte des gisements d'élevage Equins (TMS par département)



Production biogaz

Le potentiel de production annuelle de biogaz issu des élevages équins s'élève à $471 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, soit environ 3,11 TWh.

2.2.5. Les déjections des caprins

- Localisation des cheptels

L'élevage caprin est principalement présent au Sud de la Loire (Figure 9), tandis qu'il est absent au Nord de ce fleuve. Cet élevage est majoritaire dans les régions Poitou-Charentes, Pays-de-la-Loire et Rhône-Alpes et on peut remarquer quelques autres pôles de production plus modestes en Corse, Dordogne, Lot et Aveyron.

- Effluents d'élevage mobilisables
 - Temps de séjour des animaux

La configuration des élevages caprins est assez homogène sur l'ensemble du territoire. Il s'agit dans la majorité des cas de systèmes hors sol au sein desquels les animaux passent 100% du temps en bâtiments, hormis les zones de montagne où les animaux passent quelques mois en pâture. La moyenne des temps de séjour en bâtiments sur l'ensemble des Départements est de 11 mois.

- Type d'effluents

La configuration des bâtiments et les modes de stabulation sont assez similaires d'un département à l'autre (aires paillées). La totalité des effluents d'élevage produits sont sous forme de fumiers, soit 100%.

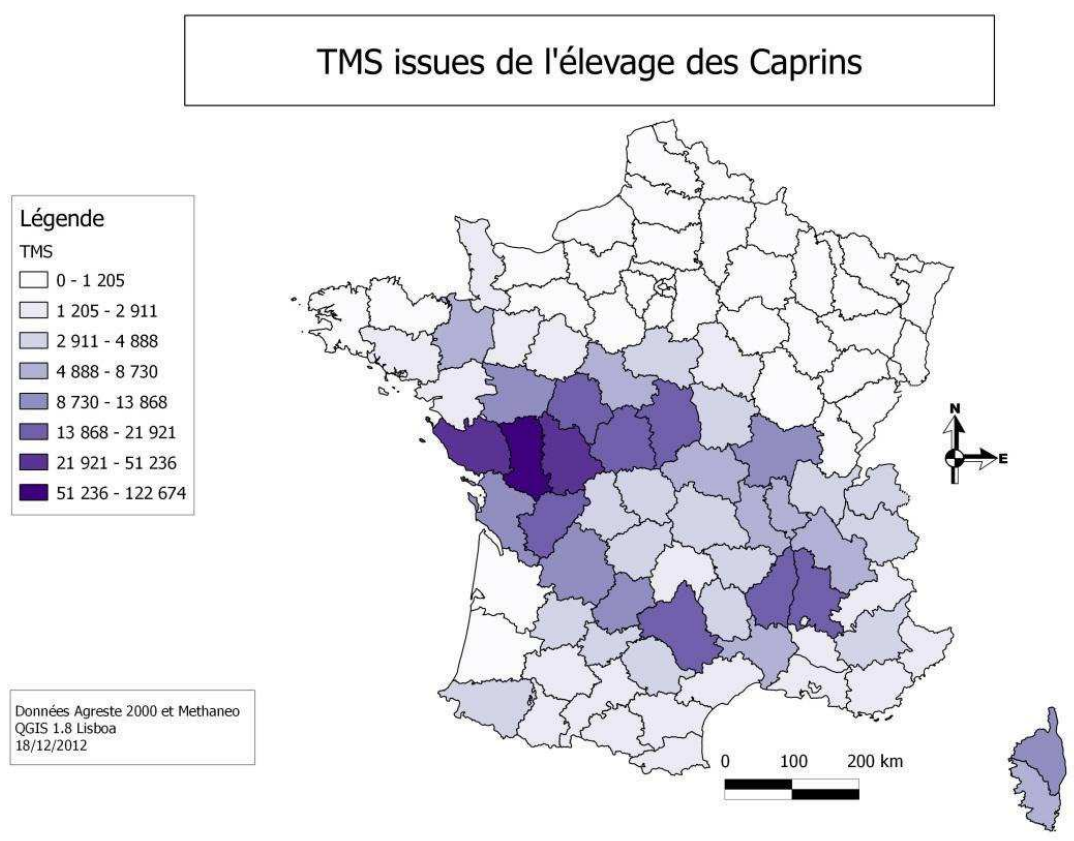
- Quantité d'effluents produite

La quantité d'effluents produite et mobilisable est très régulière dans la mesure où les animaux passent la majorité du temps en bâtiments. Les quantités d'effluents produites en bâtiment ont été calculées pour une chèvre ; les données prises en compte sont de 0,12 T/mois/animal.

- Effluents d'élevage mobilisables

La production d'effluents caprins est conséquente : elle représente 0,57 millions de tonnes de matières sèches. La totalité de ces effluents est émise sous forme de fumiers (100%).

Figure 9: Carte des gisements d'élevage Caprins (TMS par département)



2.2.6. Les déjections des ovins

Localisation des cheptels

L'élevage ovin est très réparti sur le territoire (Figure 10: Carte des gisements d'élevage Ovins (TMS par département)). En particulier dans le Massif Central, le Limousin, le Poitou-Charentes, dans l'Aveyron et les Pyrénées-Atlantiques. Certaines zones sont quant à elles très peu spécialisées, notamment les régions Ile de France et Franche-Comté.

Entre 2000 et 2010, le cheptel ovin a vu sa population décroître de 16% (source RGA 2000-2010).

- Effluents d'élevage mobilisables
 - Temps de séjour des animaux

La configuration des élevages caprins est assez homogène sur l'ensemble du territoire. Il s'agit dans la majorité des cas de systèmes extensifs au sein desquels les animaux passent peu de temps en bâtiment. La moyenne des temps de séjour sur l'ensemble des départements est de 4 mois.

- Type d'effluents

La configuration des bâtiments et les modes de stabulation sont assez similaires d'un département à l'autre (aires paillées). La totalité des effluents d'élevage produits sont sous forme de fumiers, soit 100%.

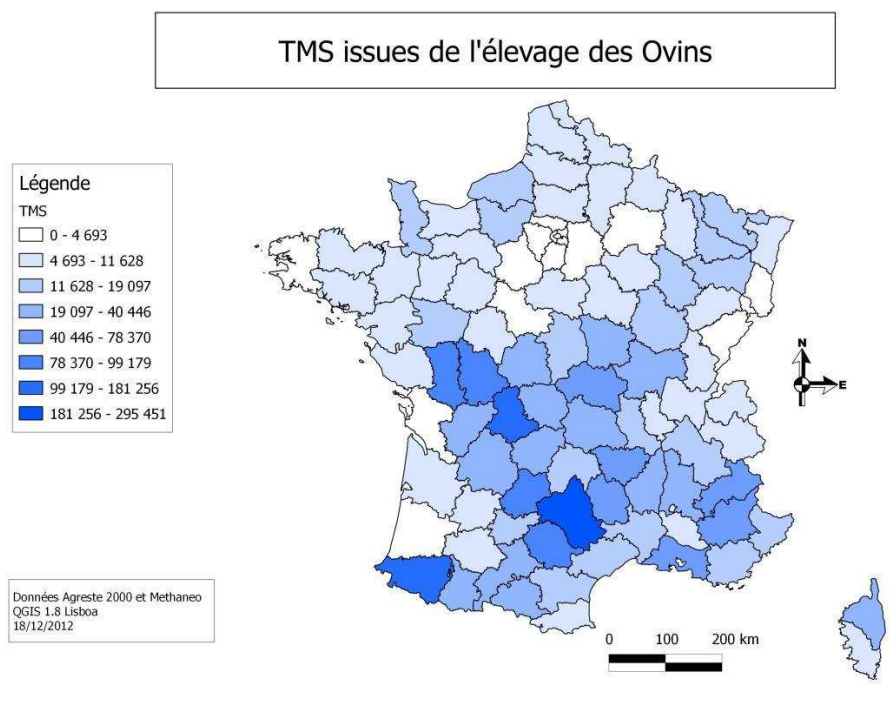
- Quantité d'effluents produite

La quantité d'effluents produite et mobilisable est très saisonnière dans la mesure où les animaux passent la majorité du temps en extérieur. Les quantités d'effluents produites en bâtiments ont été calculées pour un mouton, les données prises en compte sont de 0,12 T/mois/animal.

- Effluents d'élevage mobilisables

La production d'effluents d'ovins est conséquente, elle représente 1,42 millions de tonnes de Matière Sèche. La quasi-totalité de ces effluents est émise sous forme de fumiers (100%).

Figure 10: Carte des gisements d'élevage Ovins (TMS par département)



- Production biogaz

Le potentiel de production annuelle de biogaz issu des élevages équin s'élève à $475 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, soit environ 3,14 TWh assuré à 100% par la production de fumiers.

2.2.7. Les déjections de volailles

- Localisation des cheptels

L'aviculture est majoritairement située dans le Grand Ouest et plus particulièrement en Bretagne et Pays-de-la-Loire (Figure 11: Carte des gisements d'élevage de Volailles (TMS par département)). On peut citer également un pôle de production important en Aquitaine et Midi Pyrénées, concernant plus spécifiquement la production de volailles grasses (oies, canards). Le reste du territoire est peu spécialisé en production de volailles.

Entre 2000 et 2010, l'ensemble du cheptel avicole est constant mais on note une augmentation de 12% du cheptel de poulets de chair (source RGA 2000-2010).

- Effluents d'élevage mobilisables

- Temps de séjour des animaux

La configuration des élevages de volailles est assez homogène sur l'ensemble du territoire et par type de production. Il s'agit dans la majorité des cas de systèmes intensifs au sein desquels les animaux passent la majorité du temps en bâtiments. Certaines productions sont en systèmes extensifs mais représentent une faible partie du cheptel. La moyenne des temps de séjour sur l'ensemble des départements est de 12 mois.

- Type d'effluents

La production d'effluents dépend du système de production, des produits liquides (lisiers) issus de l'élevage des poules pondeuses et des canards, des produits pâteux à secs (fientes) issus de l'élevage des poules pondeuses, des fumiers très secs dont l'origine est l'élevage des volailles de chair (principalement poulets, dindes et pintades) et de reproduction. En moyenne sur l'ensemble des départements, on trouvera une répartition de production entre les fumiers (66%) et des lisiers (34%).

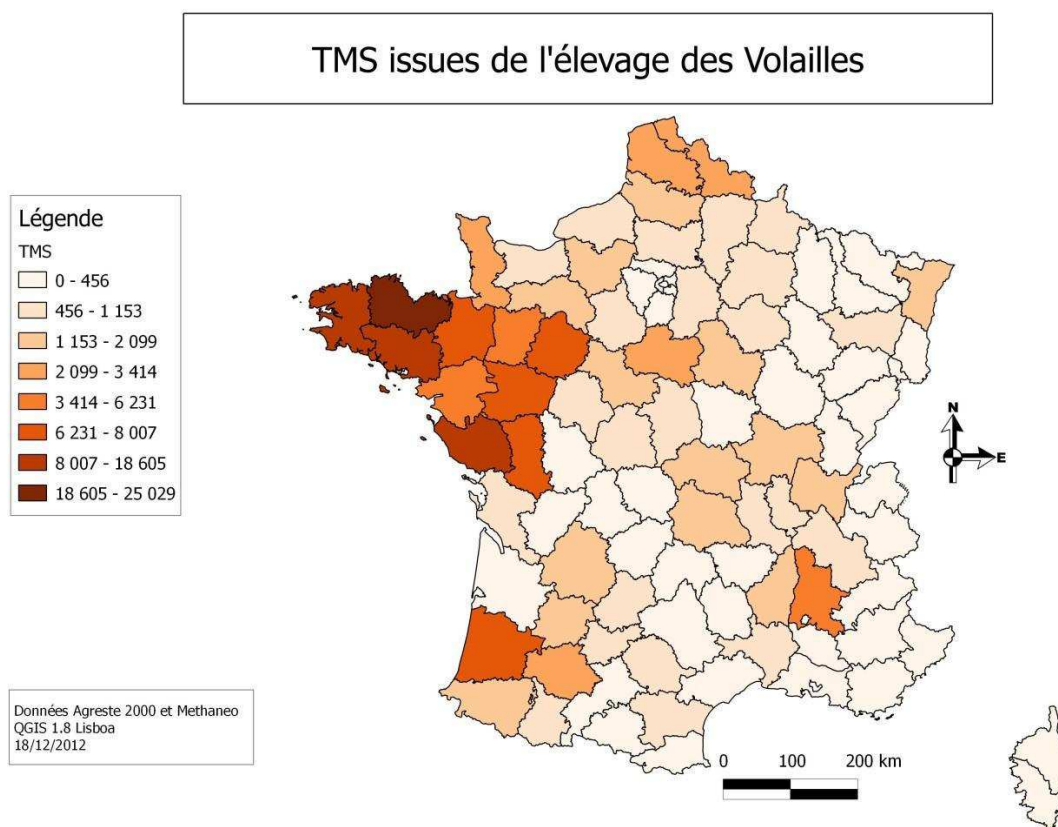
- Quantité d'effluents produite

La quantité d'effluents produite et mobilisable est peu saisonnière dans la mesure où les animaux sont la majorité du temps en bâtiment. Les quantités d'effluents produits en bâtiment ont été calculées pour une volaille. Les données prises en compte sont de 1,2 kg/mois/animal pour le fumier et 5 l/mois/animal pour les lisiers.

- Effluents d'élevage mobilisables

La production d'effluents de volailles est très conséquente, puisqu'il s'agit de la 3^{ème} source de production en France. Elle représente 2,49 millions de tonnes de matières sèches. La majorité du tonnage en matières sèches de ces effluents est émise sous forme de fumiers (73%), le reste sous forme de lisiers (27%).

Figure 11: Carte des gisements d'élevage de Volailles (TMS par département)



- Production de biogaz

Le potentiel de production annuelle de biogaz issu des élevages de volailles s'élève à $708 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, soit environ 4,68 TWh assuré à 73% par la production de fumiers à 27% par la production de lisiers.

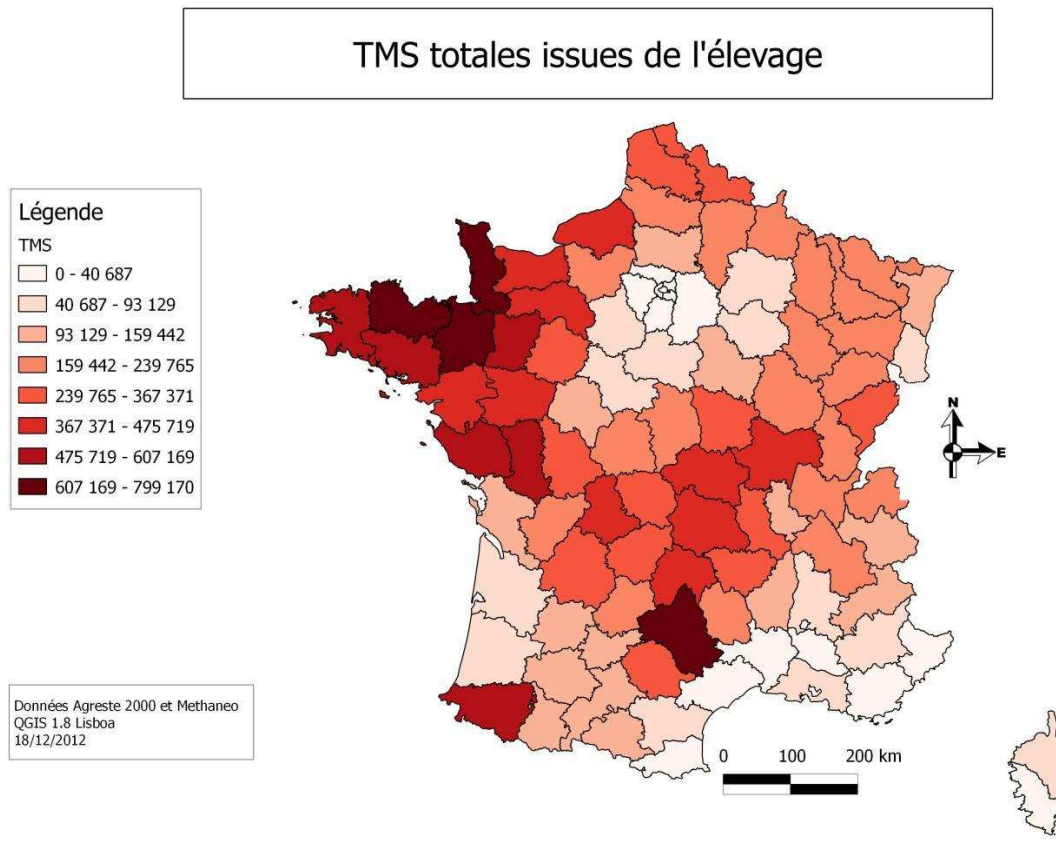
2.2.8. Synthèse des déjections animales

- Répartition de la production des effluents d'élevage en France

La production d'effluents d'élevage est présente sur l'ensemble du territoire hormis dans le Sud Est de la France, l'Île de France et les départements qui l'entourent, spécialisés en grande culture. On constate que la production de matière (en équivalent de matière sèche) n'est pas seulement liée à la densité des élevages et à leur localisation sur les territoires mais qu'elle l'est également liée à la typologie des effluents produits ainsi qu'aux pratiques locales (Figure 12 : Carte de production des effluents d'élevage). L'évaluation à travers le critère de production en TMS permet d'une part une

comparaison inter-effluents en termes de potentiel biogaz et d'autre part une comparaison avec les autres coproduits.

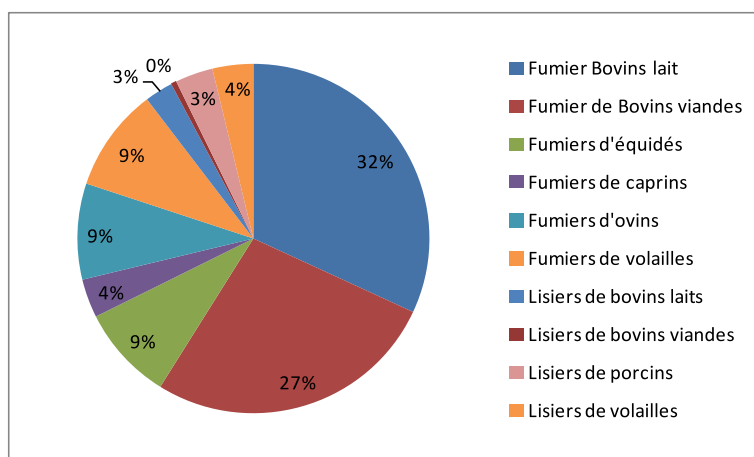
Figure 12 : Carte de production des effluents d'élevage (TMS par département)



- Proportion et typologie de production des effluents d'élevage en France

La production d'effluents est principalement assurée par les bovins (lait et viande) pour plus de 62%. Le reste étant assuré par les autres productions animales (volailles, ovines, caprines, équinés et porcines). Les effluents sont principalement produits sous forme de fumier (90%), le reste de la production étant sous forme de lisiers (10%) (Figure 13).

Figure 13: Répartition de la production de matière sèche selon la typologie de production des effluents



- Saisonnalité de production des effluents d'élevage en France

La production d'effluents d'élevage est soumise à une saisonnalité plus ou moins forte selon le type de production animale. Les zones à saisonnalité très forte, notamment les zones de montagne, présentent des caractéristiques de mise en œuvre plus complexes pour la mise en œuvre d'unités de méthanisation dans la mesure où l'approvisionnement n'est pas constant toute l'année.

La production théorique maximale de biogaz à partir des effluents d'élevage s'élève à 35 TWh (Tableau 1). Les principales régions de production suivent la répartition de production des effluents d'élevage en tonne de MS (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Tableau 1 : Synthèse nationale du potentiel de production biogaz issue des élevages

	Vaches laitières			Vaches nourrices		
	fumier	lisier	total	fumier	lisier	total
Production biogaz (Mm ³)	1 714	112	1 826	1 453	22	1 474
Production biogaz (TWh)	11,31	0,74	12,05	9,59	0,14	9,73

	Volailles (total)			Equidés (total)	Caprins (total)	Ovins (total)
	fumier	lisier	total	fumier	fumier	fumier
Production biogaz (m3)	514 122 252	194	708	471	191	475
Production biogaz (TWh)	3,39	1,29	4,68	3,11	1,27	3,14

	Porcins (total)	Total Elevage
	lisier	
Production biogaz (m3)	122	3 211
Production biogaz (TWh)	1,34	35

2.3. Biomasse mobilisable et production de biogaz issue des coproduits de culture

2.3.1. Les pailles et menues-pailles de céréales

- Localisation des surfaces

La production de céréales à paille (blé tendre, blé dur, avoine, orge, seigle, triticale) est majoritairement située au Nord de la Loire, en Picardie et Nord-Pas-de-Calais, dans le Grand Ouest et plus particulièrement en Haute-Normandie (Plaines de Caen), dans le Grand Est (Champagne-Ardenne et Lorraine), en région Centre (Plaines de la Beauce) et dans le Midi-Pyrénées (Voir Figure 14: Carte des gisements de toutes les pailles de céréales (TMS par département)).

Entre 2000 et 2010, la surface agricole utile (SAU) utilisée pour la culture de céréales à pailles a légèrement augmenté - de 3% - avec une forte croissance à 33% des surfaces en blé dur (source RGA 2000-2010).

- Coproduits mobilisables
 - Typologie des coproduits

Les coproduits des céréales à pailles sont composés de deux sous-produits, les pailles et menues pailles. La typologie et les usages de ces coproduits sont identiques, ils sont regroupés au sein d'une seule catégorie afin de faciliter l'évaluation. Les pailles et menues-pailles sont expulsées par la moissonneuse batteuse et mobilisables lors de la moisson. Les pailles ont un usage très important dans les filières animales, principalement dans le paillage des animaux mais également dans l'alimentation animale. La valorisation de menues pailles est nettement moins répandue et réservée à des usages très particuliers tels que le paillage de poulets ou encore l'alimentation des chaudières à biomasse. Les pailles et menues-pailles de céréales peuvent être mobilisées ensemble ou séparément.

- Quantité de coproduits mobilisables

La quantité de pailles et menues-pailles de céréales est liée à différents facteurs, tels que le rendement de production de la culture, mais aussi l'humidité ambiante lors de la récolte, en particulier pour les menues pailles. Les essais de mobilisation menés dans le cadre des travaux de

recherche et développement de METHANEO ont mis ne évidence un potentiel de 3 à 4 T/ha pour les pailles de céréales et de 1 à 2 T/ha pour les menues pailles.

Au niveau des quantités de coproduits mobilisables, il faut distinguer le potentiel de production de pailles du territoire et le potentiel de mobilisation en pailles qui est très significativement diminué en raison de la très forte utilisation de pailles pour les besoins de l'élevage. On constate ainsi un potentiel très important de production de pailles sur l'ensemble du territoire (Figure 14)

Alors que le potentiel de mobilisation pour des usages tels que la méthanisation est nettement plus faible, la région du Grand Ouest, très riche en production animale, est un bassin de production très important de pailles mais pour lequel il est impossible d'en modifier l'usage en d'utiliser ce gisement en méthanisation. Les pailles mobilisables sur le long terme de façon pérenne sont situées dans des régions où les céréaliers sont dans des logiques d'enfouissement de pailles et ou l'élevage ne consomme pas l'intégralité du gisement local (

Figure 15: Carte des gisements des pailles de céréales à paille hors besoin d'élevage (TMS par département)).

Figure 14: Carte des gisements de toutes les pailles de céréales (TMS par département)

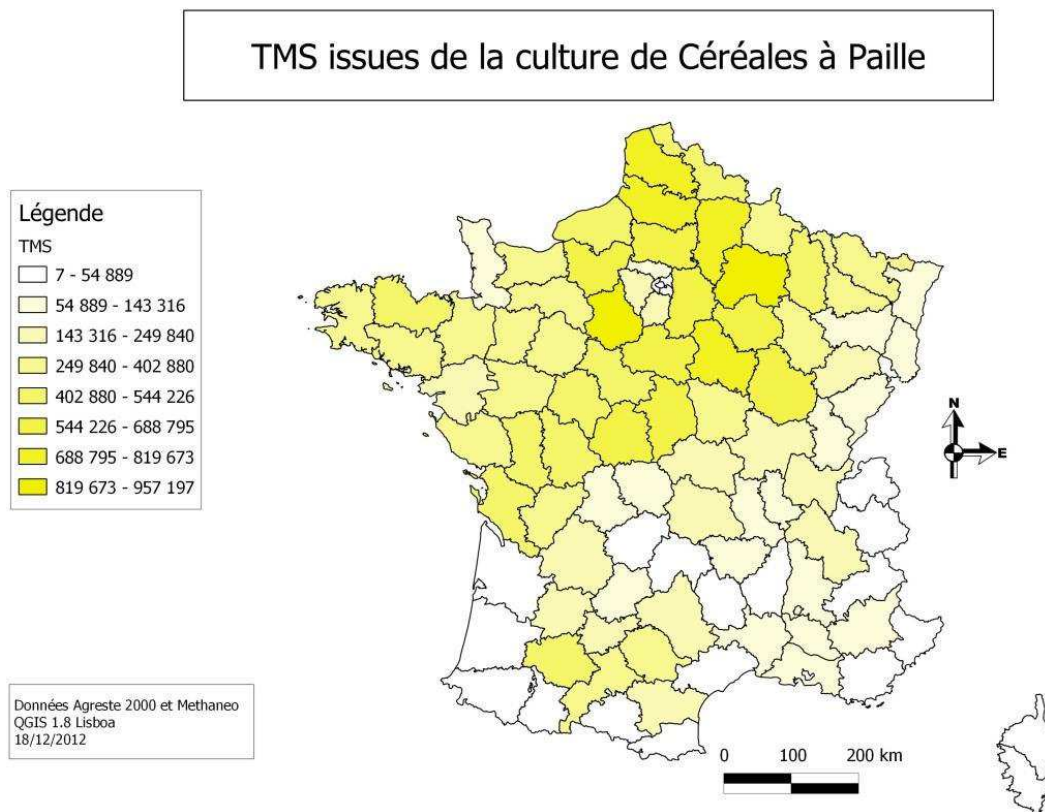
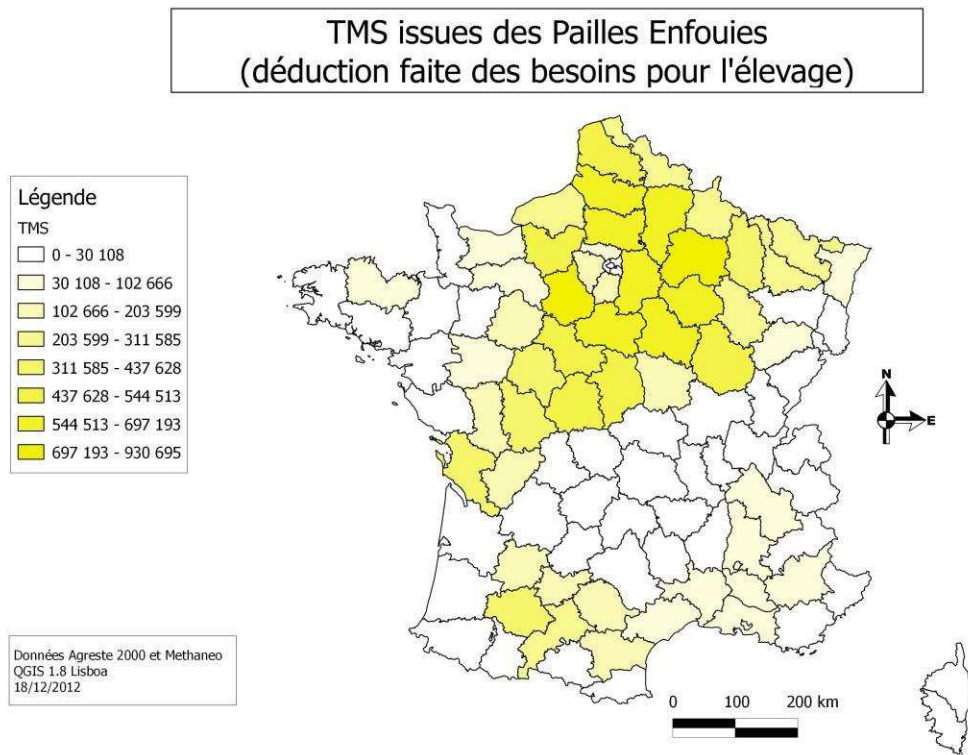
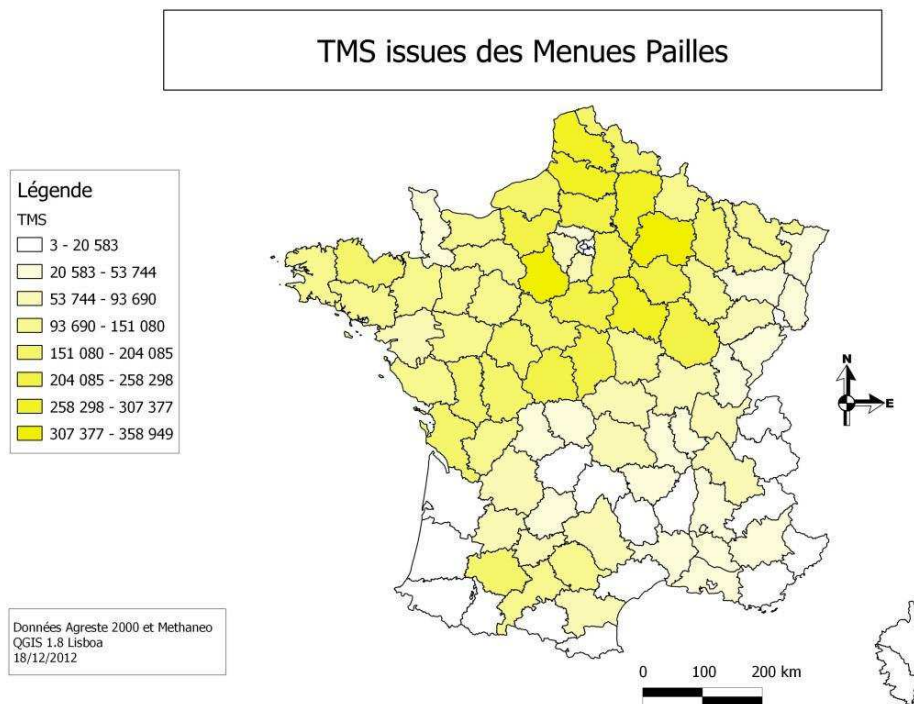


Figure 15: Carte des gisements des pailles de céréales à paille hors besoin d'élevage (TMS par département)



Les gisements de menues-pailles sont mobilisables sur l'ensemble du territoire, ce coproduit n'étant aujourd'hui pas ou peu mobilisé. En effet les usages en filière animale ne sont pas généralisés (Figure 16).

Figure 16: Carte des gisements de menues-pailles de céréales (TMS par département)



- Production de biogaz

Le potentiel de production annuelle de biogaz issu des coproduits de céréales à paille hors besoin d'élevage s'élève à $12\,363 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, soit environ 81,6 TWh. Le potentiel de production de biométhane est assuré à 65% par la mobilisation de pailles de céréales et à 25% par la mobilisation de menues-pailles de céréales.

2.3.2. Les pailles et menues pailles de colza

- Localisation des surfaces

La production de colza est majoritairement située au Nord de la Loire, avec une prépondérance en région Centre, Grand Est (Champagne-Ardenne, Lorraine), Nord de la Bourgogne et Picardie (Figure 17: Carte des gisements de coproduits du colza (TMS par département)). On peut citer également des surfaces plus modestes dans le Grand Ouest et jusqu'en Poitou-Charentes.

Entre 2000 et 2010, la SAU utilisée pour la culture de colza a augmenté de 24%, avec une forte croissance des zones où cette culture était peu présente (Aquitaine, Nord-Pas-de-Calais) (source RGA 2000-2010).

- Coproduits mobilisables
 - Typologie des coproduits

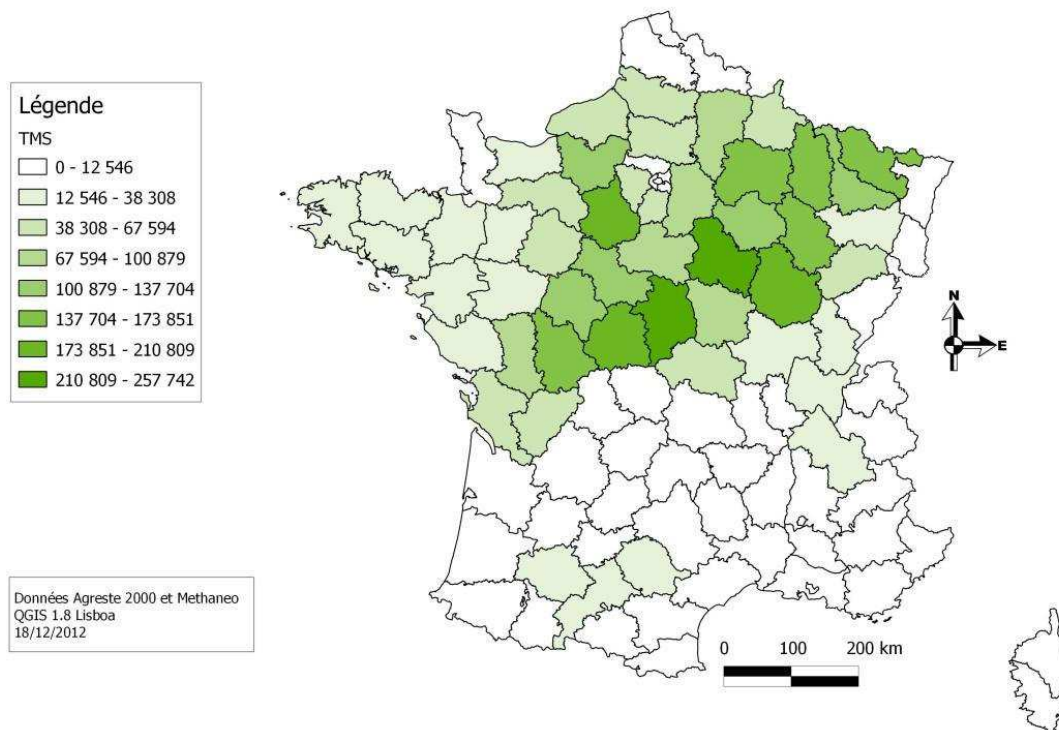
Les coproduits du colza sont composés de deux sous-produits, les pailles et menues pailles, expulsés par la moissonneuse batteuse et mobilisables lors de la moisson. Les pailles de colza sont très peu ramassées pour le paillage des animaux. Les pailles et menues pailles de colza sont majoritairement enfouies afin de restituer au sol de la matière organique et des éléments minéraux.

- Quantité de coproduits mobilisables

La quantité de pailles et menues-pailles de colza est directement liée au rendement de production de la culture. Les essais de mobilisation menés dans le cadre des travaux de recherche et développement de METHANEO ont mis en évidence un potentiel de 3 à 5 T par hectare selon les régions. La récupération des pailles et menues-pailles s'effectue de façon simultanée.

Figure 17: Carte des gisements de coproduits du colza (TMS par département)

TMS issues des pailles et menues pailles de Colza



- Production de biogaz

Le potentiel de production de biométhane s'élève à $1587 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, soit environ 10,48 TWh.

2.3.3. Les cannes et rafles de maïs

- Localisation des surfaces

La production de maïs grain est majoritairement située dans le Sud-Ouest et l'Ouest (Aquitaine, Poitou-Charentes, Pays-de-la-Loire) (Figure 18: Carte des gisements de coproduits de cannes de maïs (TMS par département))(Figure 19). On peut également citer des pôles de production en Alsace, le long du Rhône, en région Centre et en Bretagne.

Entre 2000 et 2010, la SAU utilisée pour la culture de maïs grain a diminué de 8%, principalement en Sud-Ouest (source RGA 2000-2010).

- Coproduits mobilisables

- Typologie des coproduits

Les coproduits du maïs sont mobilisables sur les variétés de maïs grain (« conso » pour la consommation animale ou « waxy » pour les amidonneries). Ils sont composés de trois parties : la canne, la rafle et les spathes de maïs. La canne correspond à la partie de la plante qui reste au sol après le passage de la moissonneuse batteuse pour la récolte du grain tandis que la rafle de maïs correspond à la partie de l'épi sur laquelle le grain est accroché. Les spathes correspondent aux feuilles protectrices recouvrant l'épi. Les pratiques actuelles de valorisation de coproduits se font par enfouissement afin de restituer au sol de la matière organique et des éléments minéraux.

- Quantité de coproduits mobilisables

La quantité de coproduits du maïs est directement liée au rendement de production de la culture. Les essais de mobilisation menés dans le cadre des travaux de recherche et développement de METHANEO ont mis en évidence un potentiel de 5 à 8 TMS par hectare selon les régions. La récupération de cannes et de rafles de maïs s'effectue de façon séparée. La production de coproduits du maïs est assurée à 61% par les cannes de maïs ; 39% par les rafles de maïs et les spathes.

Figure 18: Carte des gisements de coproduits de cannes de maïs (TMS par département)

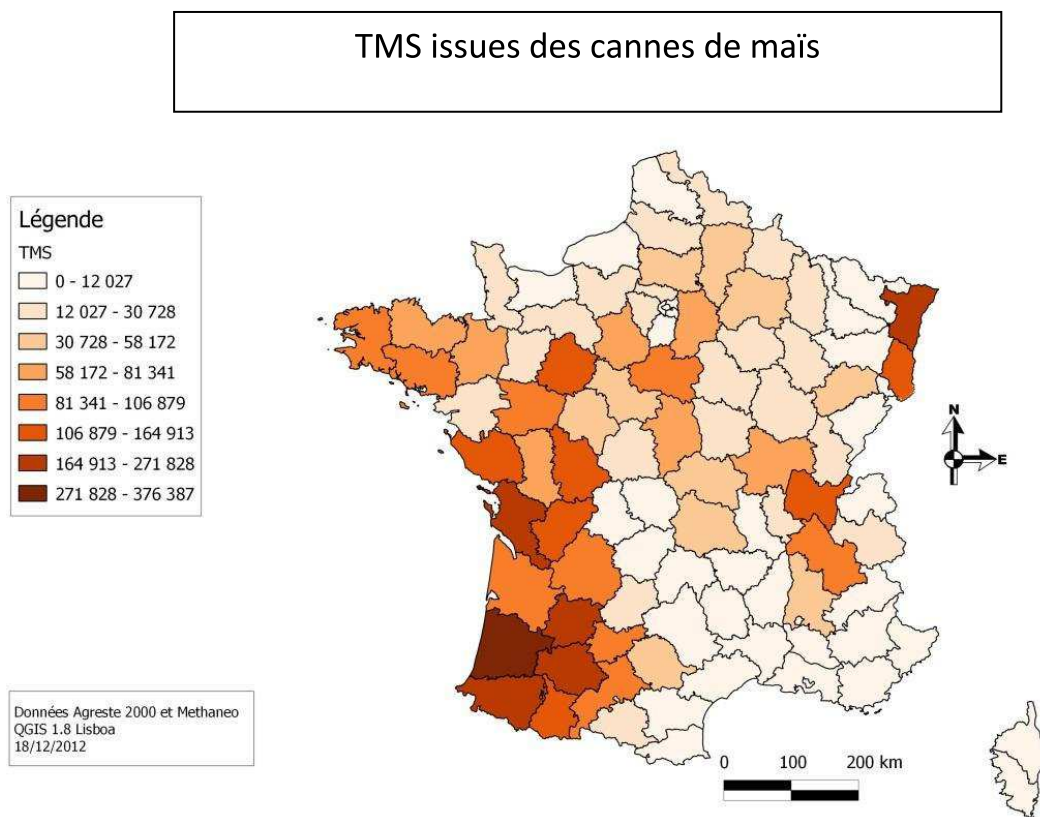
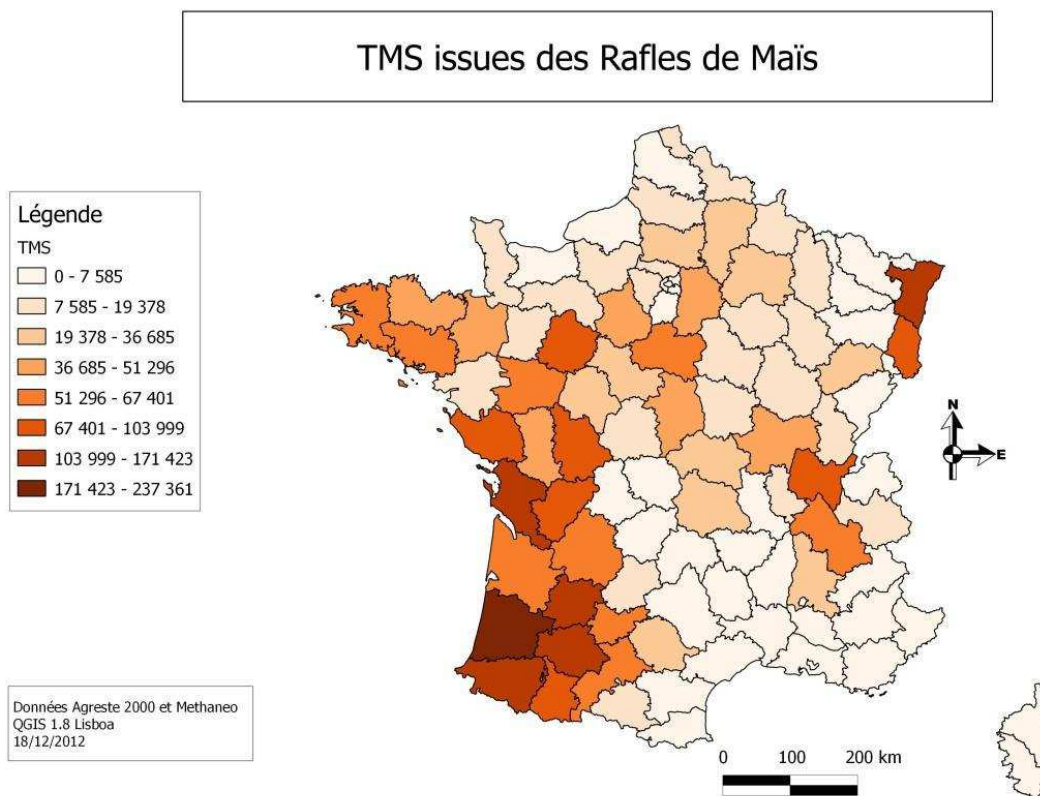


Figure 19: Carte des gisements de coproduits de rafles de maïs (TMS par département)



- Production de biogaz

Le potentiel de production annuelle de biogaz issu des coproduits du maïs s'élève à $3\,834 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, soit environ 25,31 TWh. Ce potentiel est assuré à 68% par la mobilisation de cannes de maïs et à 32% par la mobilisation de rafles de maïs et de spathes.

2.3.4. Les cannes et capitules de tournesol

- Localisation des surfaces

La production de tournesol est localisée, majoritairement en Poitou-Charentes puis le long de la Loire et de la Garonne avec de très grandes surfaces dans le Gers. Elle est très peu présente dans, le Grand Ouest, le Massif Central, le Nord-Pas-de-Calais, l'Alsace et la Lorraine (figure 20).

Entre 2000 et 2010, la SAU utilisée pour la culture de tournesol a diminué de 4% (source RGA 2000-2010).

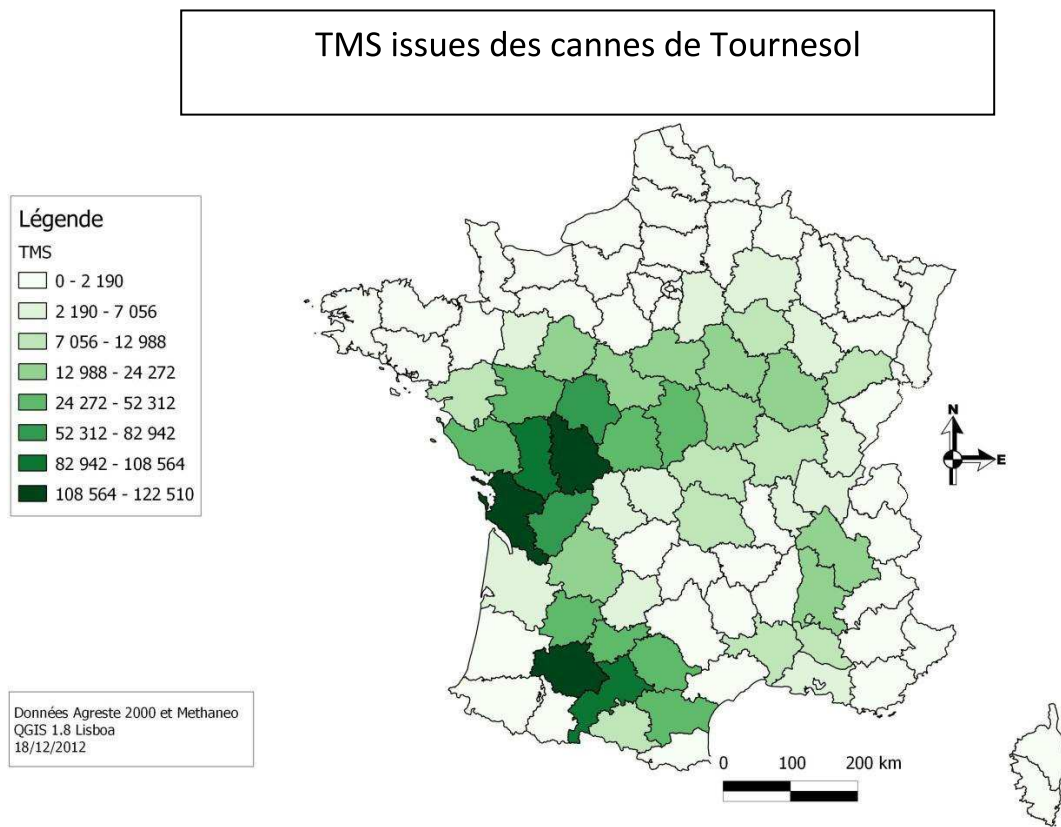
- Coproduits mobilisables
 - Typologie des coproduits

Les coproduits du tournesol sont composés de deux sous-produits, les cannes et capitules. La canne correspond à la partie de la plante qui reste au sol après le passage de la moissonneuse batteuse pour la récolte du grain tandis que le capitule correspond à la partie de la plante sur laquelle le grain est accroché. Ces coproduits sont aujourd'hui enfouis afin de retourner au sol de la matière organique et des éléments minéraux.

- Quantité de coproduits mobilisables

La quantité de cannes et capitules de tournesol est directement liée au rendement de production de la culture. Les essais de mobilisation menés dans le cadre des travaux de recherche et développement de METHANEO ont mis en évidence un potentiel de 3 à 5 T par hectare selon les Régions. La récupération des cannes et des capitules s'effectue de façon simultanée.

Figure 20: Carte des gisements de coproduits du Tournesol (TMS par département)



- Production de biogaz

Le potentiel de production annuelle de biogaz s'élève à $542 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, soit environ 3,25 TWh.

2.3.5. Les coproduits de la vigne

- Localisation des surfaces

La viticulture est particulièrement localisée, notamment en Gironde, le long de la Loire et du Rhône, en Champagne, en Alsace et ainsi que sur le pourtour Méditerranéen (

Figure 21: Carte des gisements de coproduits de la vigne (TMS par département)). Le reste du territoire est dépourvu de viticulture.

Entre 2000 et 2010, la SAU utilisée pour la viticulture a chuté de 11% (source RGA 2000-2010).

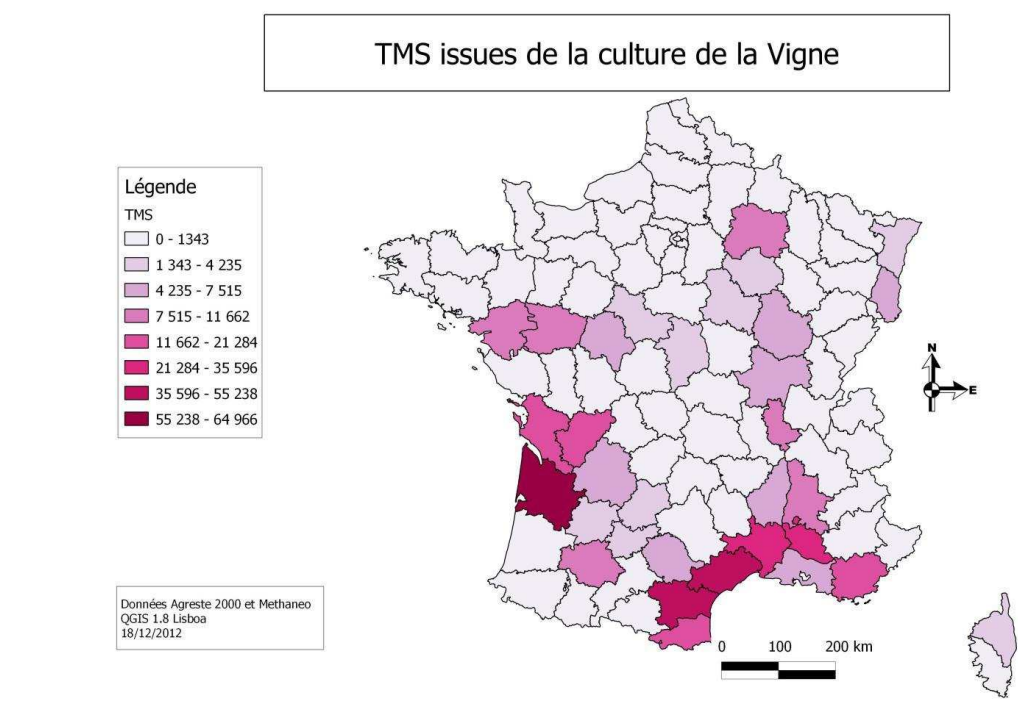
- Coproduits mobilisables
 - Typologie des coproduits

Les coproduits de la vigne correspondent aux résidus issus de la vigne après pressage pour la vinification. Il s'agit des marcs de raisins et des effluents de vinification. A l'heure actuelle les marcs de raisins non épuisés sont valorisés en distillerie où ils subissent une distillation pour la production de vins de bouche. Une fois distillés ils sont ensuite valorisés au sein de différentes filières (alimentation animale, composte, molécules d'intérêt type polyphénols). Les effluents vinicoles liquides sont éliminés au sein de stations d'épuration ou bien épandus.

- Quantité de coproduits mobilisables

Les coproduits mobilisables pris en compte portent uniquement sur les marcs de raisins, la production d'effluents vinicoles étant trop disparate à l'échelle d'un territoire et trop concentrée sur une période courte de l'année pour présenter un intérêt dans le cadre de Méthanisation Collective et Territoriale. A travers les essais réalisés par METHANEO, la quantité de marcs de raisins est estimée à 1,3 T/ha de vignes.

Figure 21: Carte des gisements de coproduits de la vigne (TMS par département)



- Production de biogaz

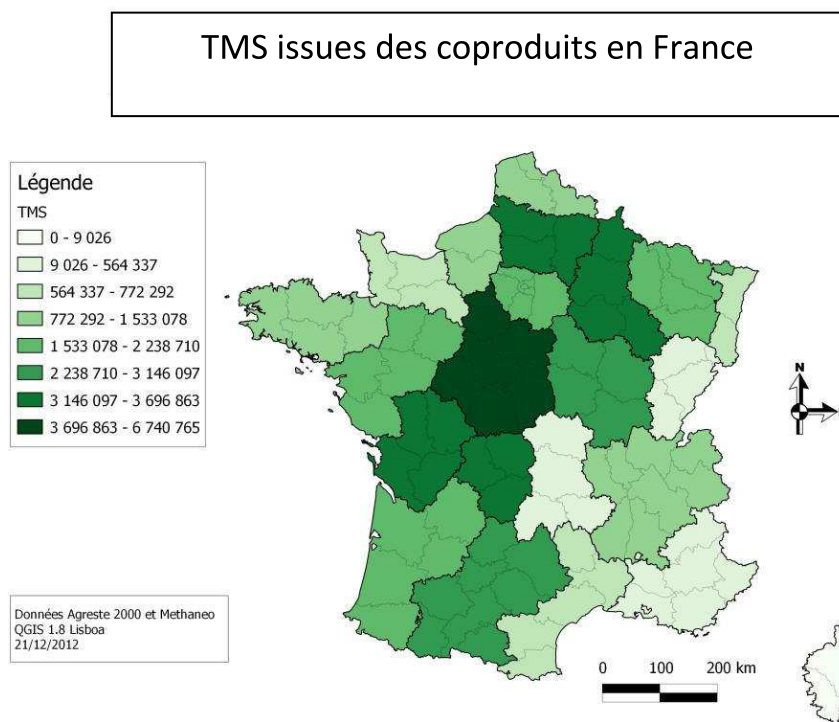
Le potentiel de production annuelle de biogaz s'élève à $138 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, soit environ 0,91 TWh.

2.3.6. Synthèse des coproduits agricoles

- Répartition de la production des coproduits agricoles

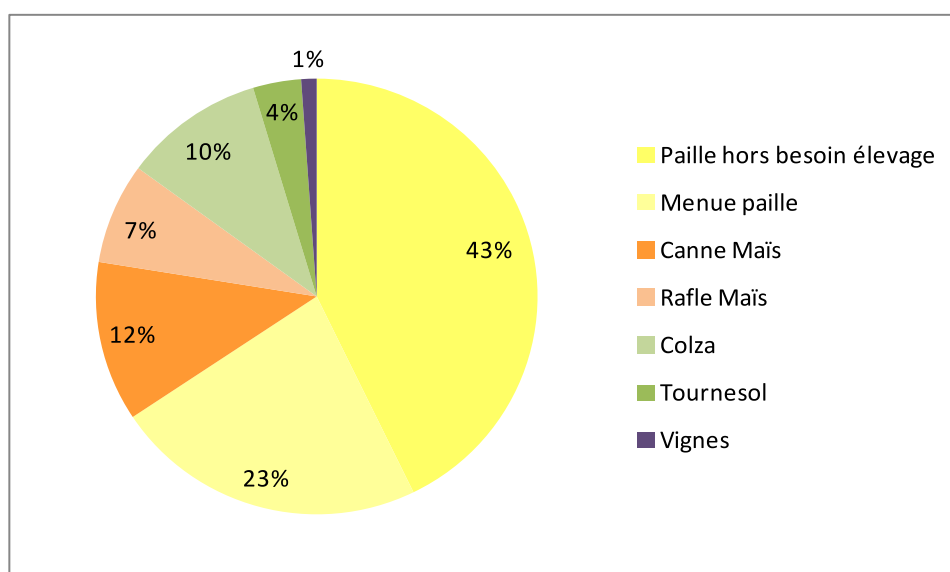
La production de coproduits agricoles en tonnes de matières sèches est présente sur l'ensemble du territoire, en particulier dans la Région Centre, Picardie, Champagne Ardennes, et Poitou Charente (Figure 22). La production de biomasse issue des coproduits agricoles est due à principalement à la spécialisation des territoires, en effet les zones de grandes cultures ont le plus grand potentiel par rapport aux zones d'élevage qui captent une partie des coproduits, en particulier les bases pour leurs productions.

Figure 22 : Carte de production des coproduits de cultures (TMS par région)



La production de coproduits sous forme de matières sèches est principalement assurée par les productions de céréales à pailles (pailles hors élevage + menues-pailles) pour plus de 66%. Le second potentiel de mobilisation est assuré pour 19% par les coproduits du maïs (cannes et rafles), le reste étant assuré par les autres productions (colza, tournesol et vigne) (Figure 23).

Figure 23 : Répartition de la production de matière sèche selon la typologie des coproduits



- Saisonnalité de la production des coproduits agricoles

Les coproduits agricoles présentent une saisonnalité de production marquée, correspondant aux périodes de récolte des différentes productions. Néanmoins, le mode de conditionnement de ces matières permet leurs stockages sur de longues périodes (bottelage ou ensilage des coproduits), permettant ainsi de rationaliser leurs mobilisations tout au long de l'année.

- Production de biogaz à partir des coproduits de cultures

Le potentiel théorique maximal de production annuelle de biogaz à partir de coproduits de cultures s'élève à $1895 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, soit environ 122 TWh (Tableau 2). Il est assuré à 67% par les coproduits issus des céréales à paille. La localisation du potentiel de production biogaz recoupe celle de la production de biomasse en tonnes de matière sèche (Figure 22 : Carte de production des coproduits de cultures (TMS par région)).

Tableau 2 : Synthèse nationale du potentiel de production biogaz des coproduits agricoles

	Tonnage paille hors besoin élevage	Menue paille	Rafle Maïs	Canne Maïs
Production biogaz (Mm3)	8 053	4 310	1 227	2 606
Production biogaz (TWh)	53,15	28,45	8,10	17,20

	Colza grain et navette	Tournesol	Vignes	Tonnage Cultures
Production biogaz (m3)	1 587	542	138	18 589
Production biogaz (TWh)	10,48	3,58	0,91	122

2.4. Evaluation du potentiel de mobilisation de biomasse et biogaz à différentes échelles

2.4.1. Intérêt d'une évaluation à différentes échelles

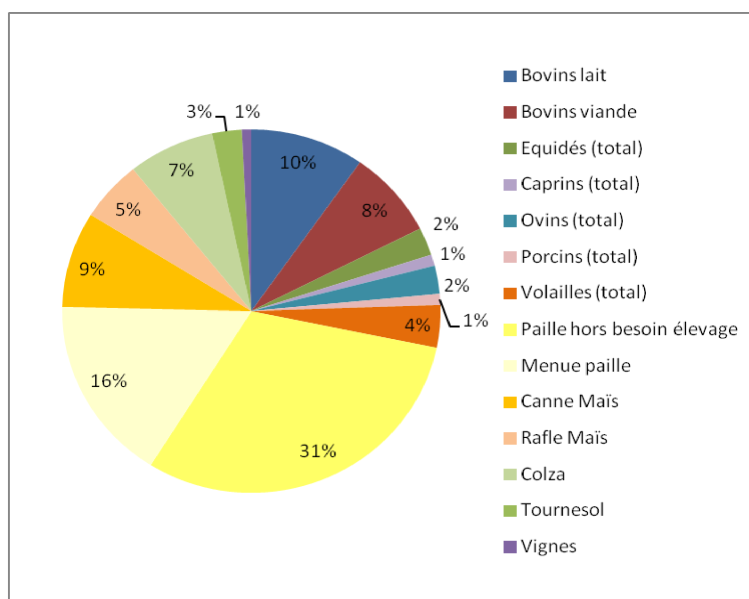
L'évaluation du potentiel de mobilisation de biomasse à différentes échelles permet à la fois de tirer des conclusions quantitatives (échelle macro) et qualitatives (échelle micro) sur le potentiel d'un territoire. L'évaluation à une échelle « macro », par exemple régionale, nous renseigne sur les spécialisations de production des territoires, dans le potentiel d'un type de biomasse par rapport à un autre ou encore du potentiel d'une région face à une autre. Cette échelle d'évaluation permet de travailler sur des perspectives, de se projeter dans le potentiel d'une biomasse ou d'une zone géographique et ainsi de réaliser des choix stratégiques. A l'inverse une évaluation à une échelle « micro » va renseigner sur la capacité d'un territoire à réunir localement l'ensemble des conditions permettant de mobiliser des gisements pour une production de biogaz suffisante. Cette échelle d'évaluation permet des projections concrètes et opérationnelles sur le potentiel d'un territoire.

2.4.2. Echelle Nationale

- Proportion et typologie de production de biomasse à l'échelle du territoire national

Le potentiel de mobilisation de biomasse d'origine agricole sur le territoire s'élève à 57 millions de TMS. Il est assuré par la mobilisation d'effluents issus des productions animales (28%) et par la mobilisation de coproduits de culture (72%). On constate que la première source du potentiel biomasse est assurée par la mobilisation de coproduits issus des céréales à pailles (paille et menues-pailles), la seconde par les productions d'effluents issus des élevages bovins (lait et viande). Enfin la troisième source de potentiel est assurée par les coproduits du maïs, le reste par l'ensemble les autres productions analysées (Figure 24: Répartition du potentiel de mobilisation de biomasse par type de production (TMS)).

Figure 24: Répartition du potentiel de mobilisation de biomasse par type de production (TMS)



- Saisonnalité de la production de biomasse à l'échelle du territoire national

La majorité des biomasses produites sur le territoire peuvent être mobilisées toute l'année et sont peu soumises aux contraintes de saisonnalité (coproduits de culture). En revanche, la biomasse issue des effluents d'élevage est sujette à une forte saisonnalité, qui n'est pas homogène sur le territoire. D'un point de vue théorique, il y a deux fois plus de biomasse pouvant être mobilisée toute l'année que de biomasse sujette à une saisonnalité ; on pourrait imaginer être capable de palier le manque de biomasse issue des effluents d'élevage par des coproduits de culture.

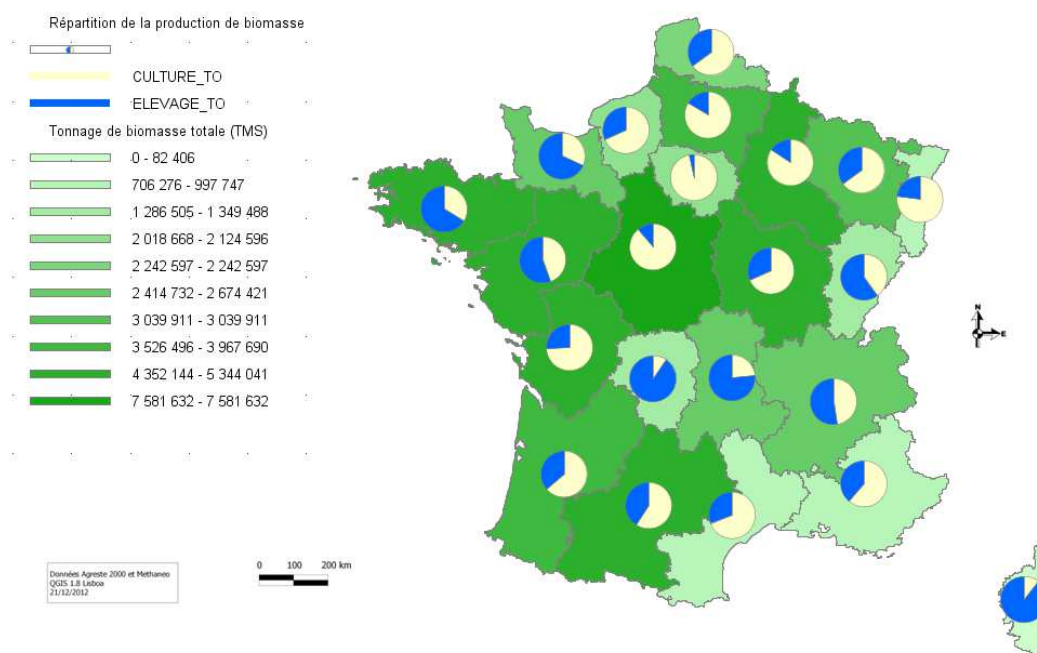
- Production de biogaz à l'échelle du territoire national

Le potentiel de production théorique maximal de biogaz à partir de l'ensemble des biomasses mobilisables s'élève à 23 940 Mm³, soit environ 158 TWh. Il est assuré à 78% par les coproduits de cultures et à 22% par les effluents issus des productions animales. La localisation du potentiel de production de biogaz recoupe celle des gisements agricoles (effluents d'élevage et coproduits de cultures) (Figure 25).

2.4.3. Echelle régionale

L'évaluation du potentiel de biomasse à l'échelle régionale permet de comprendre l'organisation des territoires et la spécialisation de ces derniers en termes de production. Sachant que certains territoires sont spécialisés dans les productions animales, alors que d'autres le sont dans les grandes cultures, il apparaît une différence à la fois sur le potentiel de ces régions, mais également sur le potentiel de mobilisation qu'elles recèlent (Figure 25). Certains territoires auront un potentiel de biomasse élevé mais soumis à une très forte saisonnalité, ce qui diminuera le potentiel réel de développement d'unités de méthanisation.

Figure 25 : Synthèse globale de la production et de la répartition des biomasses d'origine agricoles (TMS par région)



L'évaluation à cette échelle permet de formuler des considérations prospectives sur le potentiel de développement de ces territoires, d'orienter des politiques de gestion des effluents, de définir des zones d'action ou de prospections prioritaires. Mais elle ne traduit pas une réalité du terrain permettant de projeter le nombre d'installation qui pourraient voir le jour.

2.4.4. Echelle cantonale

L'évaluation à l'échelle cantonale est la plus fine réalisée dans ce travail. Cette échelle d'évaluation permet de renseigner à la fois sur des données quantitatives et surtout sur des données qualitatives. En effet une évaluation à l'échelle d'un canton ou de plusieurs cantons renseigne sur le potentiel de mobilisation de biomasse et biogaz. Mais elle permet surtout d'appréhender localement les contraintes et les possibilités réelles de mise en œuvre d'un projet à l'échelle d'un territoire. En plus de la typologie, de la localisation et de la quantité de biomasse, ce niveau d'échelle permet de nous renseigner sur la complémentarité réelle des gisements, que se soit sur la production de biogaz ou sur la gestion de saisonnalité des biomasses. En définitive, c'est la seule échelle qui nous permette de déterminer si le territoire est propice ou non à la mise en place d'un projet de méthanisation.

2.5. Perspectives et potentiel de la biomasse agricole

Le gaz naturel représente 15% du bilan énergétique national, soit 41 Mtep/an sur un total de 274 Mtep/an en 2008 (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 24 septembre 2012). Les principaux secteurs consommateurs de gaz naturel sont le secteur résidentiel (39%), l'industrie (38%), le secteur tertiaire (16%), le secteur de l'énergie (8%) et enfin l'agriculture (1%). Avec un potentiel de production annuelle sur l'ensemble du territoire de 158 TWh soit 12 Mtep, le biogaz pourrait représenter jusqu'à 29% de la consommation de gaz nationale.

De toute évidence, les gisements de biomasses agricoles représentent un potentiel très important de production énergétique sur le territoire. L'évaluation met en évidence un potentiel pouvant être assuré à 22% par les effluents d'élevage et 78% par les coproduits de cultures. On constate que même si ces gisements sont présents sur l'ensemble du pays, selon l'échelle d'évaluation certains territoires ont un potentiel de gisement beaucoup plus important que d'autres.

La question de la mobilisation de biomasse et de la production de biogaz ne s'arrête pas au potentiel d'un territoire : il s'agit également de qualifier les possibilités de mise en œuvre, d'une part à travers l'acceptation locale des projets, le souhait des agriculteurs de participer à un projet ou encore les possibilités d'implantation des usines, dépendant de nombreux facteurs tels que la disponibilité du terrain, ou encore la présence d'un débouché pour le biogaz. De ce fait la quantité de biomasse mobilisable est inférieure à la quantité de biomasse présente sur les territoires. Cela se traduit par la prise en compte de taux de mobilisation pour les effluents d'élevage et les coproduits de culture.

De plus, la méthanisation étant une filière naissante en France, son développement va suivre une progression lente qui devrait s'accélérer au fur et à mesure des réussites et concrétisations des premiers projets, permettant à l'ensemble des secteurs (agricoles, professionnels, etc) de bénéficier d'un retour d'expérience favorable à un développement conséquent de la filière. Des hypothèses raisonnables de développement de la filière et donc de mobilisation de biomasse et production de biogaz peuvent être formulées à partir de ces éléments. Un choix arbitraire de taux de mobilisation est proposé en Tableau 3, traduisant une mobilisation progressive des biomasses disponibles.

Tableau 3: Evolution du potentiel de mobilisation biomasse et production de biogaz

	2000	2015	2020	2030	2040	2050
Taux de mobilisation d'effluents d'élevage	0%	1%	10%	20%	40%	50%
Taux de mobilisation de coproduits agricoles	0%	0,1%	3%	8%	15%	20%
Energie produite (Mtep)	0,00	0,04	0,56	1,30	2,50	3,25

2.6. Outils produits et application Methaneo

La constitution d'outils pour le travail d'évaluation du potentiel de mobilisation de la biomasse et du potentiel de production de biogaz multi-échelles a donné lieu à la production d'outils pour l'usage interne de METHANEO. Ces outils interviennent dans le développement de projets aux différents stades suivants. L'illustration des outils est réalisée au sein de l'Annexe 8.

- Outil de synthèse à l'échelle nationale :

Cet outil « Excel » agrège l'ensemble des données produites à l'échelle départementale et permet d'avoir une vue d'ensemble sur les productions du département, sur ses spécificités locales et sur son positionnement à l'échelle nationale. Cet outil est utilisé par les « développeurs de projets » en amont pour caractériser la zone de prospection dans laquelle ils se trouvent.

Cet outil rassemble des informations simples mais dont l'usage sur le terrain est indispensable pour la préparation des réunions avec les exploitants agricoles :

- La typologie des productions
 - Les pratiques territoriales
 - Le potentiel de mobilisation de biomasse
-
- Outil de représentation « SIG »

L'outil de cartographie par système d'information géographique « SIG » permet une représentation graphique des territoires à différentes échelles. C'est l'outil de modélisation le plus souple permettant une synthèse simple et visuelle des éléments à présenter. Cet outil permet la réalisation d'études de gisements qui son soit destinées à des partenaires (agriculteurs, collectivités, etc..), soit destinées à illustrer des rendus, par exemple au sein de dossiers de subventions.

CHAPITRE 3 :

L'évaluation technico-économique d'unités de méthanisation « type »

3.1. Introduction à la notion de « modèles type »

L'un des principaux atouts de la méthanisation réside dans la capacité de ce procédé à traiter tous les types de biomasses fermentescibles. De nombreuses filières industrielles françaises ont eu recours à cette technologie pour le traitement de leurs effluents et la production d'énergie (laiteries, distilleries). C'est ainsi que certains travaux de recherche ont caractérisé la description de ces filières à travers une approche de d'évaluation par système « type » (Almansour, 2011) permettant d'évaluer les bilans énergétiques et environnementaux de la digestion anaérobie face à d'autres procédés de dégradation de la matière organique.

L'évaluation réalisée préalablement par filière « type » nous renseigne sur l'état de l'art des filières déjà en place et montre qu'il n'existe pas encore de modèle type spécifique à la méthanisation de produits exclusivement agricoles. Cependant, l'évaluation sur le potentiel de mobilisation de biomasse décrite dans le Chapitre 1 met en évidence une ressource de biomasse très significative. Il convient donc d'en évaluer le potentiel de développement, non seulement en termes de gisement mais également en termes industriels au travers de « modèles type ». Nous avons donc cherché au travers de cette évaluation à construire plusieurs « unités de méthanisation type » de différentes capacités de traitement, capables de digérer tout type de biomasse d'origine agricole (lisiers, fumiers, coproduits de cultures). L'évaluation porte sur l'identification de différents mélanges de biomasse possibles, permettant à « l'usine type » d'atteindre un niveau de rentabilité suffisant pour sa mise en œuvre. L'hypothèse de travail est ici d'un revenu de projet à atteindre de 10%, ce qui correspond au seuil de rentabilité du projet que demandent les banques pour leur financement. C'est du moins ce que l'on a constaté au travers du financement des deux premiers projets portés par Methaneo (source Methaneo).

L'évaluation reprend le cadre méthodologique utilisé au sein du laboratoire I2M sur des problématiques similaires (Bonnet, 1998) (Gossens et Bonnet, 2001) (Almansour, 2011). Nous avons élaboré une description technique et économique de chaque « unité de méthanisation type ». La démarche repose tout d'abord sur l'inventaire qualitatif et technique des unités « type », puis sur une analyse économique comparative des modèles selon la typologie du mix de biomasse en entrée.

L'évaluation poursuit quatre objectifs :

- 1 Description des modèles « d'unités type » retenus,
- 2 Description des systèmes et process mis en œuvre,
 - o Dimensionnement des « unités type »
 - o Descriptions des équipements
 - o Description des flux
- 3 Evaluation quantitative des unités types selon le mix d'approvisionnement,
 - o Bilan de production énergétique, bilan matière, capacité de traitement
- 4 Analyse comparative technico-économique de mise en œuvre des unités « type » ,

3.2. Construction des « modèles type »

3.2.1. Description technique

- Choix du modèle

La construction technique des « modèles type » intègre la philosophie de développement de projets portée par METHANEO à travers le modèle UCMTA décrit précédemment dans le document. Les « modèles type » évalués ici ne traitent que des biomasses d'origine agricole, aussi bien des matières liquides que solides, sans limite de taux de matières sèches des produits entrants. Le modèle « type » est un projet collectif, au sein duquel l'ensemble des agriculteurs apporteurs de biomasse sont partie prenante de l'unité de méthanisation en étant actionnaires de celle-ci. L'ensemble des coûts de transport, mobilisation de la biomasse et retour de digestat sont pris en charge par l'usine. Chaque agriculteur partenaire récupère du digestat au prorata de son apport, lui permettant de fertiliser ses terres et de s'inscrire dans une boucle agronomique durable sans modifier ses pratiques existantes. La matière est collectée sous forme de base d'échange, échange de matière contre du digestat. La matière n'est donc ni payante, ni soumise à redevance. Pour chaque « modèle type », un rayon d'approvisionnement maximal est défini en cohérence avec une logique territoriale de la mise en œuvre des projets. L'évaluation des « modèles type » prendra en compte dans son approvisionnement l'ensemble des biomasses possibles dont le potentiel de mobilisation a été évalué au sein du Chapitre 1.

- Process mis en oeuvre :

Les différents « modèles type » étudiés ont une base technologique commune qui a été définie à partir des réalisations de la société METHANEO, sur la base des unités de méthanisation collectives et territoriales développées dans le département des Deux Sèvres (TIPER, Capter).

Les « modèles type » sont constitués de différents lots de process qui sont communs et spécifiques aux projets collectifs mis en œuvre au sein du modèle UMCTA (Figure 1). Une implantation standard est présentée en Annexe 9.

- Bâtiment industriel

Le bâtiment permet le stockage et le prétraitement de l'ensemble des biomasses et du digestat. Il est conçu pour limiter au maximum les nuisances olfactives : les camions entrent intégralement dans l'enceinte close du bâtiment pour décharger la matière et charger le digestat. Un procédé complet de traitement d'odeurs est mis en place dans l'enceinte du bâtiment.

Le bâtiment principal est doté d'une fosse enterrée permettant le prétraitement de la matière. Une zone de stockage sera dédiée aux fumiers tandis que qu'une ligne d'approvisionnement de coproduits sera installée en extérieur. La fosse enterrée sera dotée d'une trappe en extérieur afin que les coproduits broyés y tombent directement. La biomasse est diluée dans la fosse puis envoyée dans un module de dosage/pesage avant méthanisation.

Le dimensionnement du bâtiment est adapté à la quantité de matière traitée.

- Préparation de la matière entrante

Les coproduits solides fibreux (fumiers) sont directement dépotés par les camions dans une zone de stockage. Les fumiers seront ensuite transférés dans une cuve de dilution.

La cuve de dilution permet :

- De réceptionner les produits liquides ou pâteux, directement par dépotage à l'intérieur du bâtiment,
- D'humidifier et de pré-hydrolyser les coproduits qui sont réceptionnés, par la ligne des produits solides à l'extérieur du bâtiment,
- D'homogénéiser l'ensemble de la biomasse afin de garantir l'alimentation des digesteurs avec un produit constant dans le temps. La fosse permet ainsi de lisser les variations de composition du mélange de biomasse valorisée au sein de l'unité de méthanisation
- De disposer d'un tampon pour une alimentation constante des digesteurs.

Une fois la biomasse diluée et homogénéisée au sein de la cuve de dilution avant introduction en méthanisation. Une partie du digestat liquide est utilisée en tant que vecteur hydraulique (recirculat), issu de la séparation de phase en sortie de méthanisation il est réincorporé en amont, permettant de diluer les matières en entrée permettant ainsi de réceptionner tout type de matières (0 à 90% de MS) et de les amener à la siccité acceptable en entrée de méthanisation (environ 15% de MS), afin d'être dans la plage hydraulique nécessaire à l'intérieur du méthaniseur (10% de MS).

La recirculation du digestat liquide entraîne une légère surconcentration en ammoniacale dans les digesteurs par rapport à une situation où l'ensemble du digestat est exporté. Cependant des modèles de simulation des flux permettent d'évaluer la composition des digestats, pour ainsi maintenir ce taux à une valeur acceptable.

Ce process de réception de la matière est commun à l'ensemble des « modèles types » étudiés, le dimensionnement du process étant adapté à la quantité de matière traitée.

- Technologie de digestion :

Le procédé retenu pour l'évaluation des « modèles type » est le procédé infiniment mélangé, c'est une technologie éprouvée que METHANEO a mise en œuvre au sein des deux premiers projets en construction de la société. Cette technologie permet de valoriser aussi bien des biomasses d'origines agricoles solides que liquides en co-digestion.

La digestion mésophile se réalise à 37-40°C. Cette température est nécessaire à la croissance de bactéries méthanogènes mésophiles présentes dans le digesteur. Le choix de cette technologie est lié à une démarche économique : contrairement à la digestion thermophile, qui nécessite une montée en température jusqu'à 55°C, la digestion mésophile utilise une quantité moindre d'énergie.

La dimension du digesteur est suffisamment importante pour permettre un temps de rétention élevé. Une digestion mésophile couplée à un temps de séjour élevé permet la mise en place d'une dégradation lente et sans à-coups limitant les risques d'inhibition dans le digesteur. La biomasse est continuellement agitée au sein des digesteurs.

Le nombre de digesteurs primaires et secondaires est adapté selon les « modèles type » en fonction de la quantité de matière entrante.

La digestion secondaire permet d'augmenter la production de biogaz et de réaliser un premier stockage du digestat. Cette phase de la méthanisation est réalisée dans un digesteur maintenu à une température approximative de 37-40°C grâce l'incorporation en continu de biomasse issu du ou des

digesteurs primaires. Une agitation est également appliquée au moyen de plusieurs agitateurs immergés.

- Rétention et valorisation du biogaz

Un stockage de biogaz est nécessaire pour assurer la régularité de fonctionnement des moteurs. La rétention du biogaz est garantie par une double couverture en PVC placée au-dessus des digesteurs. Le biogaz est collecté au niveau du dôme souple du digesteur. En sortie du digesteur, le biogaz est partiellement épuré pour éliminer les gaz corrosifs (H_2S). Il est ensuite envoyé dans une unité d'épuration afin de séparer le CH_4 du CO_2 . Le biogaz une fois épuré atteint une qualité équivalente à celle du gaz naturel. Le biométhane produit est ensuite envoyé au sein d'un poste d'injection avant d'être injecté dans le réseau. Le poste d'injection est un organe de contrôle et de sécurité pour garantir l'injection d'un biométhane et répondant aux prescriptions techniques de réinjection (Annexe 10). Le poste d'injection a pour fonction de contrôler la qualité du gaz en continu, de l'odoriser, d'assurer la régulation de la pression d'injection et le comptage de l'énergie livrée sur le réseau. Le poste d'injection est une interface dont la gestion est assurée par le gestionnaire de réseau (distribution ou transport).

L'évaluation intègre la valorisation du biogaz en biométhane dans différentes configurations de réseau (distribution et transport).

- Traitement d'air

Un dispositif de traitement de l'air vicié est mis en place au sein du bâtiment. L'air à traiter est ensuite filtré par un bio-filtre qui rejette de l'air exempt d'odeurs nuisibles.

Le traitement d'air sur le site est indispensable pour :

- assurer des conditions de travail convenables au personnel d'exploitation,
- empêcher la diffusion des odeurs vers le milieu extérieur.
-

3.2.2. Méthodologie d'évaluation

La méthodologie d'évaluation repose sur la construction de trois unités de méthanisation types dont la capacité de traitement est différente (20 000 T, 40 000 T et 80 000 T). Pour chacune de ces unités type, le biogaz est valorisé sous forme de biométhane afin d'être injecté sur le réseau de gaz naturel. Plusieurs configurations d'injection réseau ont été étudiées, selon la nature du réseau et la distance de raccordement.

Pour chacune des unités type, l'objectif est d'évaluer les possibilités de mise œuvre de l'unité selon le mix d'approvisionnement biomasse évalué. Cette évaluation repose sur une analyse multicritères, alliant des indicateurs techniques (production de biogaz, quantité de matières traitées), des indicateurs économiques (Chiffre d'Affaires, coûts d'exploitations, rentabilité) ainsi que des critères énergétiques et environnementaux (rendement global de l'installation, énergie consommée sur énergie produite).

Pour mener à bien l'évaluation, différents scénarios d'approvisionnement biomasse ont été réalisés et testés pour chaque « modèle type », l'objectif étant de déterminer les mix de biomasse viables par « modèle type ». Pour comprendre l'influence et l'impact d'une biomasse par rapport à l'autre les scénarios d'approvisionnement ont été travaillés en mono-produit et en co-digestion.

Mono-produit : chaque « modèle type » est testé avec une seule biomasse, afin de caractériser l'intérêt de chaque type de biomasse. Cela prend en compte la saisonnalité de production des gisements. Dans certains cas, l'approvisionnement de l'usine ne sera pas constant, notamment les modèles réalisés à partir de fumier.

Co-digestion : chaque « modèle type » est testé avec un approvisionnement mixte de plusieurs biomasse, permettant ainsi d'identifier les synergies entre effluents d'élevage et coproduits, aussi bien au niveau de l'apport énergétique des matières que de la complémentarité de saisonnalité des gisements. L'ensemble des simulations prend en compte un approvisionnement régulier, les coproduits de cultures venant en contre saison des fumiers soumis à une production irrégulière.

La finalité de cette analyse nous permettant d'identifier les « modèles types » viables selon le type de biomasse méthanisée et de comprendre l'influence de l'approvisionnement sur les différents paramètres faisant l'objet d'un suivi.

- Paramètres de dimensionnement de l'évaluation :

L'ensemble des paramètres techniques permettant le dimensionnement des modèles types a été réalisé à partir de l'outil de simulation développé par METHANEO. Cet outil reprend le dimensionnement de chaque équipement nécessaire au bon fonctionnement de l'unité de méthanisation selon le process et le savoir faire développés par METHANEO sur ces projets. Il a été conçu à partir d'offres de fournisseurs et du retour d'expérience des unités construites par la société. Cet outil de dimensionnement prend en compte l'ensemble des aspects réglementaires auxquels est soumise la mise en place d'unité de méthanisation en France.

- **Capacité de traitement de l'usine type.** Chaque « modèle type » a une capacité de traitement défini, avec une limite dans le tonnage brut et dans le tonnage de MS que l'usine peut traiter.
- **Taux de MS dans le digesteur.** La biomasse au sein du digesteur doit se situer aux alentours de 10% de MS. Pour ce faire, la biomasse entrante est diluée, soit avec du recirculat, soit avec l'ajout d'eau.
- **Type d'approvisionnement.** Chaque modèle type a été testé avec plusieurs scénarios d'approvisionnement. Des modèles 100% mono produit ainsi des modèles multi-produits en co-digestion.
- **Distance d'approvisionnement.** Pour chaque modèle « type », une distance d'approvisionnement moyenne a été déterminée en adéquation avec l'aspect territorial de la mise en œuvre des projets.
- Paramètres économiques de l'évaluation :

L'ensemble des paramètres technico-économiques permettant de déterminer la viabilité du projet sont pris en compte. La rentabilité du projet se base sur les calculs de l'outil de dimensionnement développé par METHANEO qui intègre tous les devis fournisseurs, le calcul des coûts de maintenance, d'exploitation, de consommables afférents au bon fonctionnement de l'usine. Le calcul de la rentabilité prend en compte l'amortissement de l'usine, le chiffre d'affaires généré par la production et la vente d'énergie (selon les tarifs de rachat en vigueur en 2013) et les coûts d'exploitation/maintenance.

- **Investissement.** Chaque modèle « type » a un coût d'investissement spécifique selon sa capacité de traitement et son type de valorisation du biogaz.
- **Coûts d'exploitation de l'usine.** L'ensemble des coûts d'exploitation de l'usine est pris en compte (consommables, main d'œuvre, énergie, maintenance, etc..). Une partie des coûts d'exploitation de l'usine est directement liée à la nature des intrants. Chaque modèle « type » étudié supporte des coûts d'exploitation qui lui sont propres.
- **Coûts de transport biomasse.** Chaque biomasse prise en compte dans l'évaluation a un coût de transport spécifique selon sa nature (densité, conditionnement, type de transport, etc ...). Chaque modèle « type » étudié présente des coûts de transport spécifique selon l'approvisionnement en biomasse.

- **Coûts de mobilisation biomasse.** Chaque biomasse prise en compte dans l'évaluation a un coût de mobilisation spécifique, selon que ce soit un effluent d'élevage ou un coproduit de cultures. Le coût de mobilisation correspond d'une part au coût d'épandage « rendu à la racine » (effluents et coproduits agricole), et d'autre part au coût des récoltes (uniquement pour les coproduits). Chaque modèle « type » étudié implique des coûts de mobilisation de biomasse qui lui sont propres.

- **Vente d'énergie.**

Le prix de vente de rachat est fonction de la production de biogaz de l'usine selon le mélange d'approvisionnement, en adéquation avec le choix de valorisation et les tarifs s'y rattachant.

Le détail des éléments pris en compte dans le dimensionnement des modèles « type » sont présentés en Annexe 11.

- Critères faisant l'objet d'un suivi :

Différents indicateurs vont à travers cette évaluation, nous permettre de déterminer si les modèles testés sont viables ou non. Ces indicateurs sont principalement liés à la performance de l'usine et traduits en ratio économique ou ratios énergétiques.

- **Quantité de matières sèches traitées dans l'usine type.** L'évaluation repose sur l'analyse de différentes biomasses au sein d'une même « usine type ». Pour caractériser l'intérêt des mix de biomasse les uns par rapport aux autres, un ratio sur la quantité de matière sèche traitée par l'usine est utilisé.
- **Production de biogaz.** De la même manière que la quantité de matière sèche, le ratio sur la production de biogaz nous permettra d'identifier les mix de biomasse les plus pertinents par « modèle type ».
- **Excédent Brut d'Exploitation sur Investissement (EBE/INV).** Ce ratio nous renseigne sur la viabilité du modèle type et sur sa reproductibilité. Ne seront retenus comme viables que les « modèles type » dont l'approvisionnement permet d'atteindre un $EBE/INV > 10\%$.

$$EBE/INV = (\text{chiffre d'Affaire} - \text{Coûts d'exploitation}) / \text{Investissement}$$

- **Ratio de valorisation biomasse.** Ce ratio spécifique a été créé autour de la performance du mix de biomasse rapporté au tonnage de matières sèches entrant dans le « modèle type ».

- **Ratio de performance énergétique.** Cet indicateur reprend la quantité d'énergie produite et valorisée par rapport à la quantité d'énergie utilisée pour la production du biogaz. L'énergie consommée prend uniquement en compte l'énergie nécessaire pour le fonctionnement de l'usine et pour le transport des matières (biomasse et digestat). Cet indicateur permet de caractériser la performance énergétique du modèle type.

$$R_E = (\text{Energie valorisée} - \text{énergie consommée}) / \text{Energie primaire produite}$$

- **Bilan CO₂.** Cet indicateur permet d'évaluer le gain environnemental associé à la mise en œuvre d'un projet collectif de méthanisation selon les différents « modèles type ». Le périmètre d'évaluation prend en compte les économies de CO₂ liées à la captation de biomasses agricoles, émettrices de GES, ainsi que la substitution d'énergie fossile, grâce au biogaz produit par rapport aux émissions de GES associées à la mobilisation des biomasses et du fonctionnement de l'usine. Cet indicateur est basé sur l'outil DIGES (Annexe 12).

Les scénarios retenus comme viables seront ceux qui atteindront un niveau de rentabilité permettant l'obtention de leur financement. Le retour d'expérience de METHANEO dans le financement de trois projets de méthanisation collectifs et territoriaux, nous oriente sur une hypothèse raisonnablement atteignable de 10% de rentabilité de projet (EBE/INV). Les scénarios présentés dans la suite du document sont représentatifs de l'ensemble des scénarios étudiés et permettent de dégager les grandes tendances de l'évaluation. Les typologies précises des mix de biomasses ne sont pas détaillées pour des raisons de confidentialité.

3.3. Evaluation du modèle « type » injection réseau Distribution

3.3.1. Caractéristique spécifique du modèle « type » injection réseau de Distribution

Le réseau de distribution est le premier réseau d'acheminement de gaz en France. Il est géré par différents opérateurs, le plus important étant GrDF avec 193 340 km de canalisations et par des Entreprises Locales de Distribution (Régaz, Gaz de Strasbourg, Electricité Gaz de Grenoble, etc.).

Le réseau de distribution, alimenté par le réseau de transport, permet d'alimenter les utilisateurs finaux (industriels, particuliers, collectivités). Le gaz circule toujours du réseau de transport vers le réseau de distribution et ne peut pas remonter à rebours les canalisations. Les possibilités de réinjection sont donc dépendantes des consommations de gaz transitant dans le tuyau (ou la boucle réseau) sur lequel le projet va se raccorder.

La gestion de l'injection est assurée par le gestionnaire de réseau de distribution qui réalise une prestation de contrôle qualité et de comptage du biométhane avant d'être injecté sur le réseau. Ce contrôle est assuré par un poste d'injection mis à disposition par le gestionnaire sous forme d'une location prenant en compte l'investissement du poste et les coûts d'exploitation associés.

L'injection sur le réseau de distribution présente un certain nombre d'avantages : un maillage important sur l'ensemble du territoire (Annexe 13), des coûts de raccordement peu élevés (de l'ordre de 100 €/m) (source methaneo), des délais et des coûts d'étude supportables, et le fait que le système de poste d'injection est à la charge du gestionnaire. Il présente également un certain nombre de contraintes, notamment la compatibilité de débit entre le débit transitant dans les réseaux en été et le débit de biométhane produit par l'unité de méthanisation. Les consommations de gaz étant limitées en été aux seules consommations des industriels, les usages domestiques étant alors faible, il est parfois impossible sur certains réseaux d'envisager la mise en œuvre d'un projet lorsque le débit injectable souhaité est supérieur au débit physique transitant dans le réseau de distribution (Annexe 14).

Données spécifiques prises en compte dans le modèle « type » injection réseau de distribution :

- Coût de raccordement pris en compte : 20 000 €
- Location du poste d'injection pris en compte : 100 000 €/an

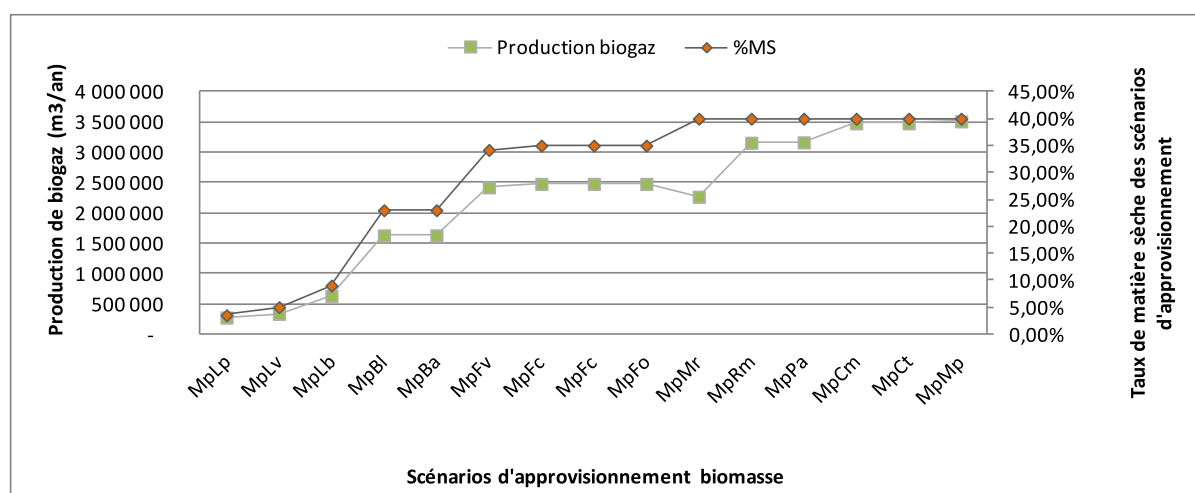
3.3.2. Modèle « type » injection réseau distribution 20 000 T

- « Modèle type » mono-produits :

L'évaluation des « modèles types » par type de biomasse démontre que l'ensemble des scénarios mono-produits ne sont pas viables au sein du modèle type de 20 000 T. Sur les quinze scénarios biomasses ayant servi à l'évaluation, deux tiers d'entre eux sont considérés comme viables et atteignent le seuil de rentabilité fixé à 10% (EBE/INV). Le détail de l'évaluation de ces scénarios présentés en Annexe 15.

La Figure 26 met en évidence que la production d'un modèle « type » 20 000 T en injection sur le réseau de distribution est dépendante de la nature des intrants. Les approvisionnements en coproduits étant plus énergétiques que ceux à base d'effluents d'élevage, un même modèle type peut, selon les biomasses, produire de 100 000 m³/an à 3 500 000 m³/an. La production de biométhane impactant directement le chiffre d'affaires du modèle type, la nature des intrants est déterminante dans la viabilité du modèle.

Figure 26 : Production de biogaz selon l'approvisionnement mono-produit d'un modèle type 20 000 T en injection sur le réseau de distribution



Les modèles « type » supportent des coûts d'exploitation plus ou moins élevés selon la nature des biomasses entrantes (Figure 27), les scénarios valorisant des coproduits agricoles (biomasse avec un coût de mobilisation élevé) présentant des coûts d'exploitation beaucoup plus élevés que ceux valorisant des effluents d'élevage. Ceci explique que les scénarios les plus énergétiques ne sont pas forcément ceux qui dégagent l'excédent brut d'exploitation le plus élevé (Figure 28). En effet la performance économique du mix de biomasse est un équilibre entre la production énergétique et

coûts de mobilisation des intrants. La Figure 29 montre que les scénarios mono-produits viables sont soit des scénarios d’approvisionnement avec des effluents d’élevage énergétiques (coûts de mobilisation faibles), soit des scénarios coproduits très énergétiques (coûts de mobilisation élevés). Enfin, on constate que les scénarios mono-produits à partir d’effluents d’élevage très saisonniers ne sont pas viables, même lorsque le potentiel énergétique est important.

Figure 27 : Coût spécifique de mobilisation selon l’approvisionnement mono-produit d’un modèle type 20 000 T en injection sur le réseau de distribution

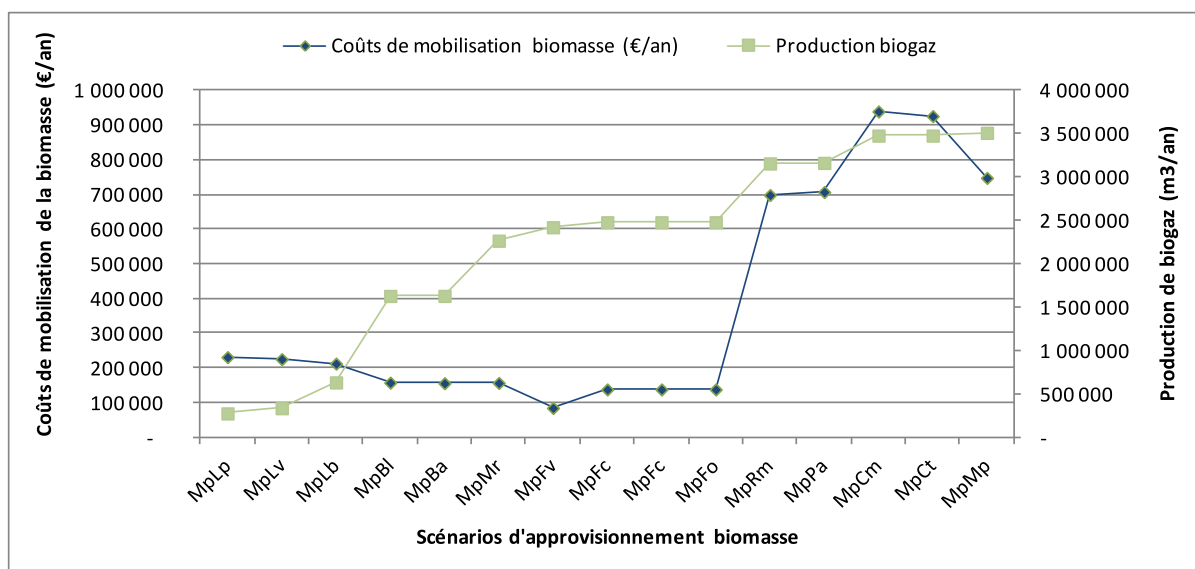


Figure 28 : Excédent brut d’exploitation selon l’approvisionnement mono-produit d’un modèle type 20 000 T injection réseau distribution

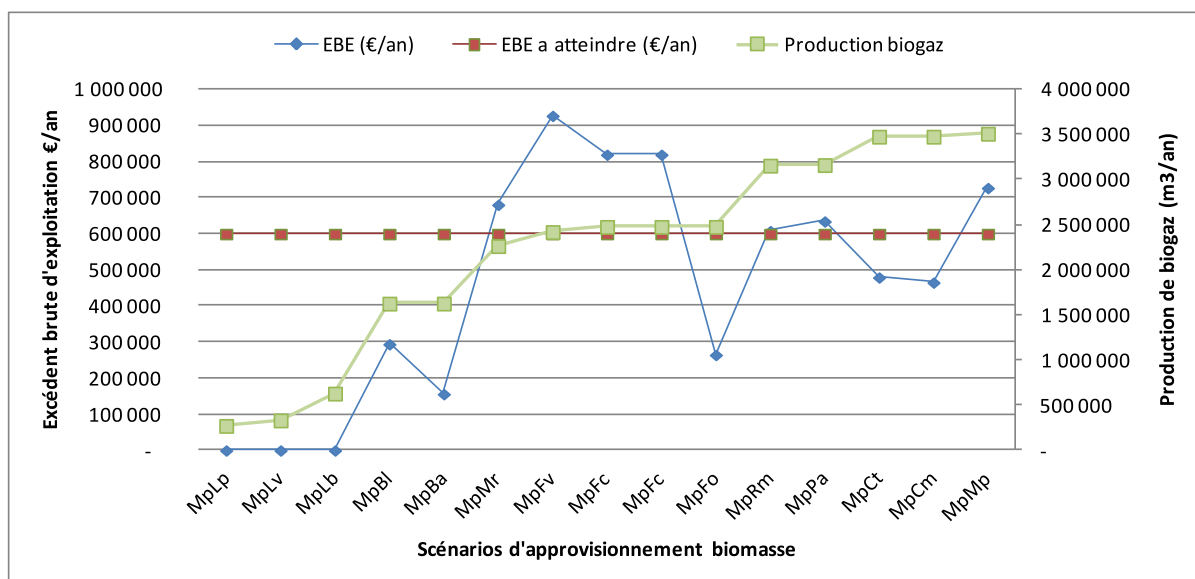
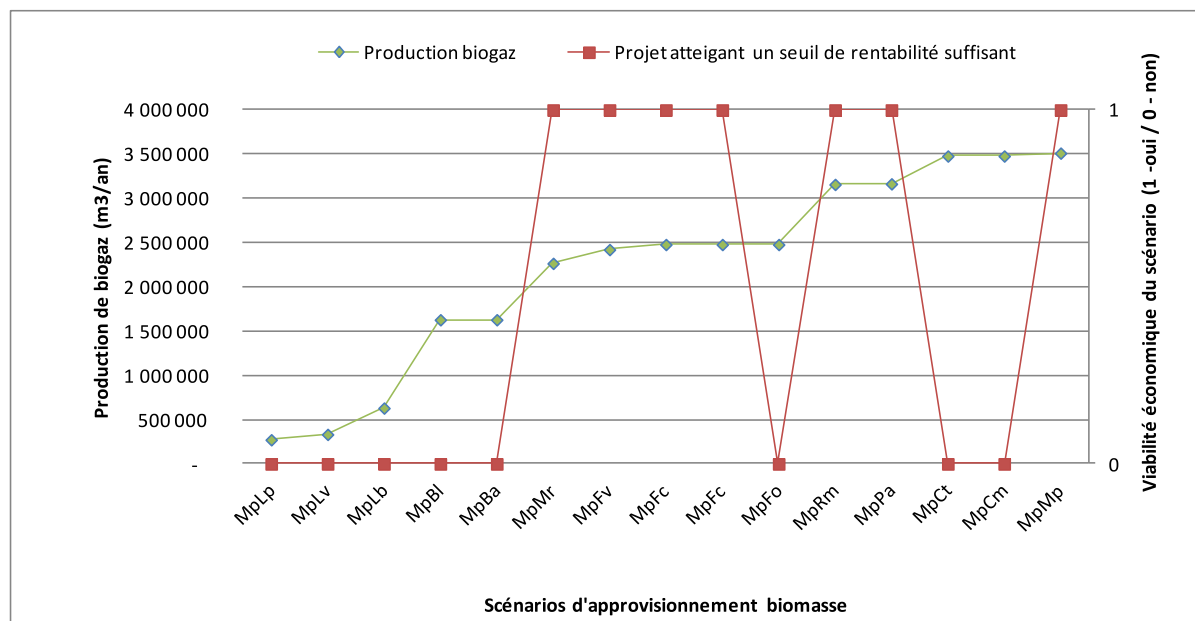


Figure 29 : Viabilité des modèles « type » 20 000 T en injection sur le réseau de distribution selon l'approvisionnement mono-produit



- « Modèle type » co-digestion :

L'évaluation du « modèle type » 20 000 T en co-digestion autorise une viabilité accrue des scénarios étudiés. Les différentes synergies entre biomasses permettent d'aboutir à des scénarios d'approvisionnement au sein desquels des biomasses auparavant non viables le deviennent en co-digestion, notamment par la complémentarité des apports saisonniers permettant de lisser la production de biogaz sur l'année. Le coût de mobilisation est souvent plus acceptable (biomasse très énergétique et coûteuse en mélange avec des biomasses moins énergétiques et beaucoup moins coûteuses).

La Figure 30 met en évidence que les approvisionnements en co-digestion permettent une production de biogaz optimisée comprise entre 2 000 et 3 500 Mm³/an. Les coûts de mobilisation restent fluctuants selon la nature du mix biomasse et favorables au scénario d'approvisionnement privilégiant la co-digestion avec des effluents d'élevage (Figure 31). L'ensemble des mix de biomasses présentés ici atteignent un excédent brut suffisant, tout en valorisant des biomasses qui n'auraient pu l'être au sein du modèle d'évaluation 20 000 T (Figure 32). En optimisant les scénarios d'approvisionnement à partir des synergies de saisonnalité ou de coûts de mobilisation, l'ensemble des scénarios présentés produisant plus de 200 000 m³/an de biogaz permettent d'atteindre un EBE/Inv suffisant (Figure 33).

Figure 30 : Production de biogaz selon l'approvisionnement en co-digestion d'un modèle type 20 000 T en injection sur le réseau de distribution

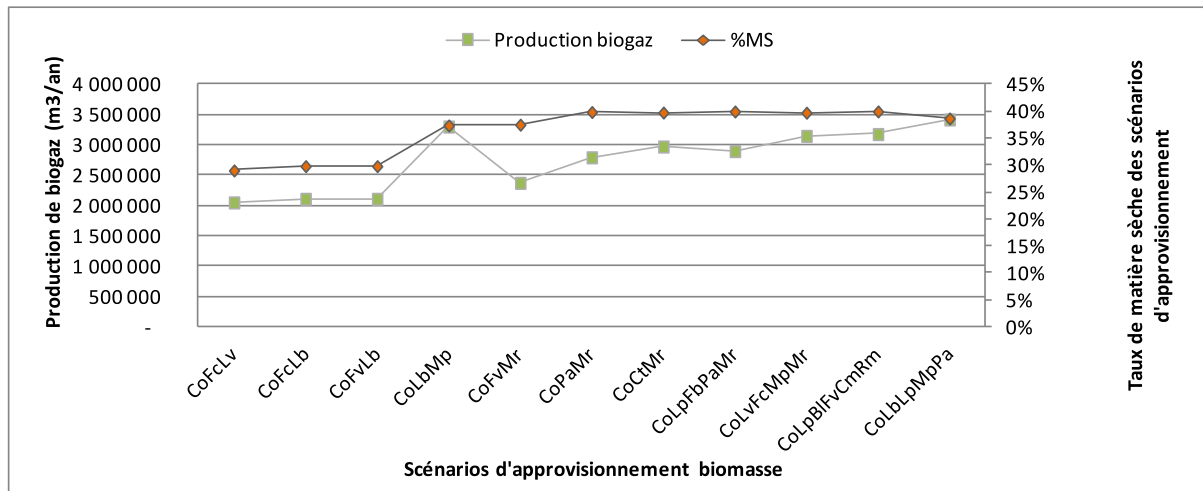


Figure 31 : Coût spécifique de mobilisation selon l'approvisionnement en co-digestion d'un modèle type 20 000 T en injection sur le réseau de distribution

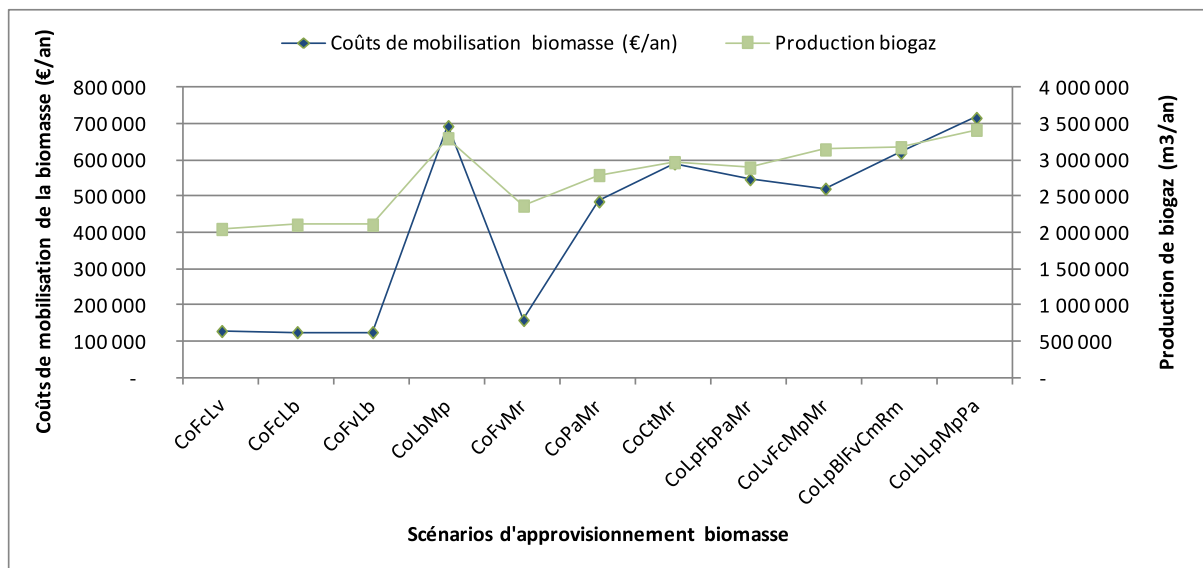


Figure 32 : Excédent brut d'exploitation selon l'approvisionnement en co-digestion d'un modèle type 20 000 T en injection sur le réseau de distribution

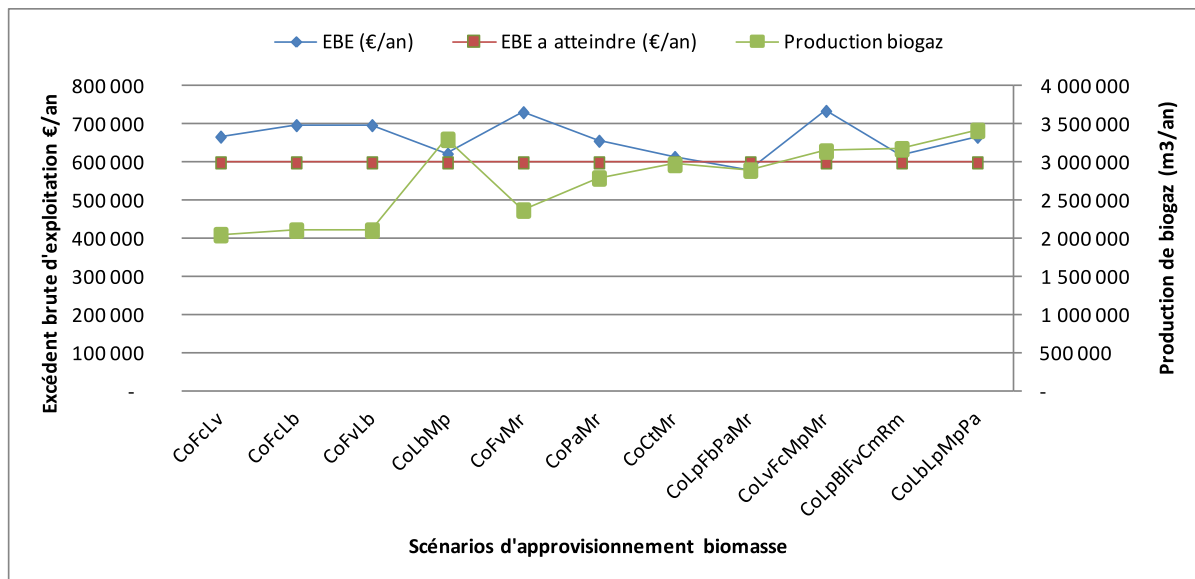
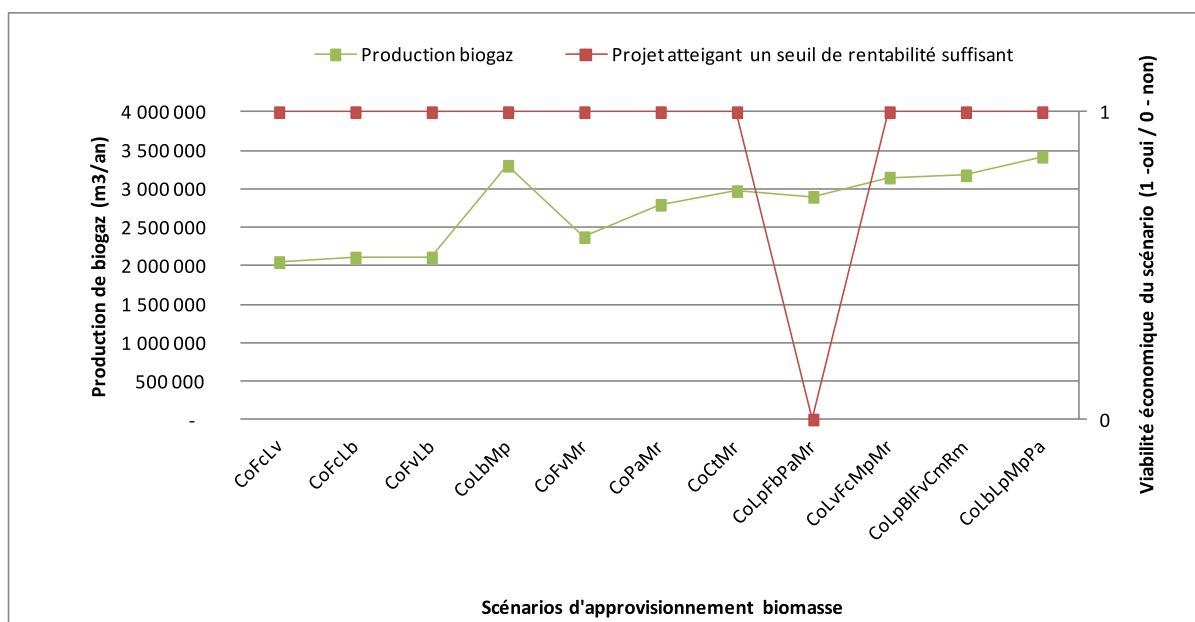


Figure 33 : Viabilité des modèles « type » 20 000 T en injection sur le réseau de distribution selon l'approvisionnement en co-digestion



L'évaluation du modèle type nous permet de définir un indice de performance du mix de biomasse de 75€/TMS de biomasse valorisée. Cet indice caractérise le revenu minimum (en €/TMS) que doit dégager en moyenne une tonne de biomasse au sein du modèle type pour lui permettre d'atteindre

le seuil que nous avons fixé d'EBE/Inv >10%. Il est spécifique pour chaque modèle « type » et calculé de la manière suivante :

$$INV_{\text{modèle « type »}} / Q^{\text{TMS}} * (EBE/Inv_{\text{cible}}),$$

Avec :

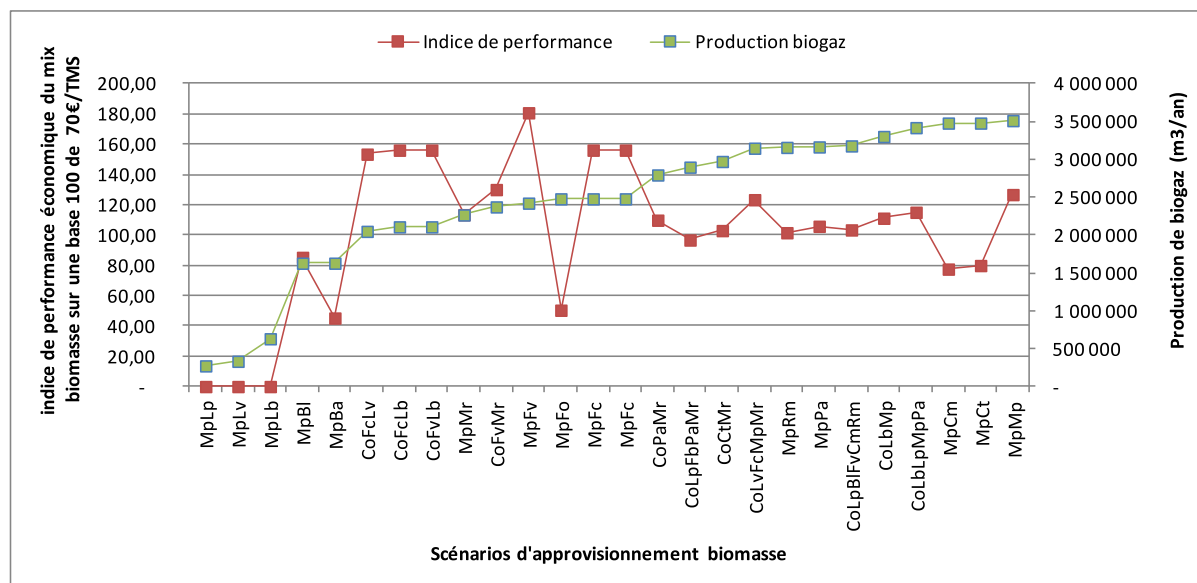
$INV_{\text{modèle « type »}}$: montant d'investissement du modèle « type » étudié

Q^{TMS} : quantité de biomasse traitée au sein du modèle « type » en TMS

EBE/Inv_{cible} : objectif de rentabilité du modèle « type » fixé, ici 10%

La Figure 34 illustre le ratio de performance dégagé par chaque scénario d'approvisionnement ramené sur une base 100 équivalente à 75 €/TMS. Comme identifiés précédemment, les scénarios présentant les meilleurs indices ne sont pas forcément ceux produisant le plus de biogaz, mais plutôt ceux bénéficiant du meilleur ratio production biogaz/coût de mobilisation. Cet indice pourra être utilisé par la suite pour comparer la performance des mix de biomasse selon les différents modèles « type ».

Figure 34 : Indice de performance des modèles « type » 20 000 T en injection sur le réseau de distribution selon l'approvisionnement



3.3.3. Modèle « type » réseau distribution 40 000 T

- « Modèle type » mono-produits :

L'évaluation des « modèles type » par type de biomasse démontre que l'ensemble des scénarios mono-produits ne sont pas viables au sein du modèle type de 40 000 T. Sur les quinze scénarios d'approvisionnement biomasse ayant servi à l'évaluation, seulement un tiers d'entre elles sont considérées comme viables et atteignent le seuil de rentabilité fixé à 10% (EBE/INV). On constate donc une configuration moins favorable que pour les scénarios 20 000T.

La Figure 35 illustre l'écart de production de biogaz au sein du modèle « type » selon la nature des intrants. Le scénario ayant la meilleure performance de production produit dix fois plus de biogaz que le scénario d'approvisionnement le moins bon (545 000 m³/an 5 500 000 m³/an). La différence de chiffre d'affaires et de coûts de mobilisation biomasse est également marquée par la nature des intrants (Figure 36). Le chiffre d'affaires progresse moins vite que le coût de mobilisation biomasse, ce qui pénalise les scénarios à base de coproduits par rapport à ceux valorisant des effluents d'élevage. L'analyse confirme que les scénarios produisant le plus de biogaz ne sont pas ceux qui dégagent l'excédent brut d'exploitation le plus important (Figure 37). Cette conclusion, déjà identifiée pour le modèle « type » 20 000 T, est encore plus marquée pour le modèle « type » 40 000T. La Figure 38 montre que les scénarios mono-produits sont nettement plus restrictifs que dans le modèle 20 000 T, en particulier pour les scénarios valorisant des coproduits pour lesquels le modèle « type » n'est plus capable de supporter leurs coûts de mobilisation. On identifie ici la limite des modèles « type » mono-produit pour lesquels il existe une taille critique au-delà de laquelle il n'est plus intéressant de valoriser des produits très énergétiques et payants.

Figure 35 : Production de biogaz selon l'approvisionnement mono-produit d'un modèle type 40 000 T en injection sur le réseau de distribution

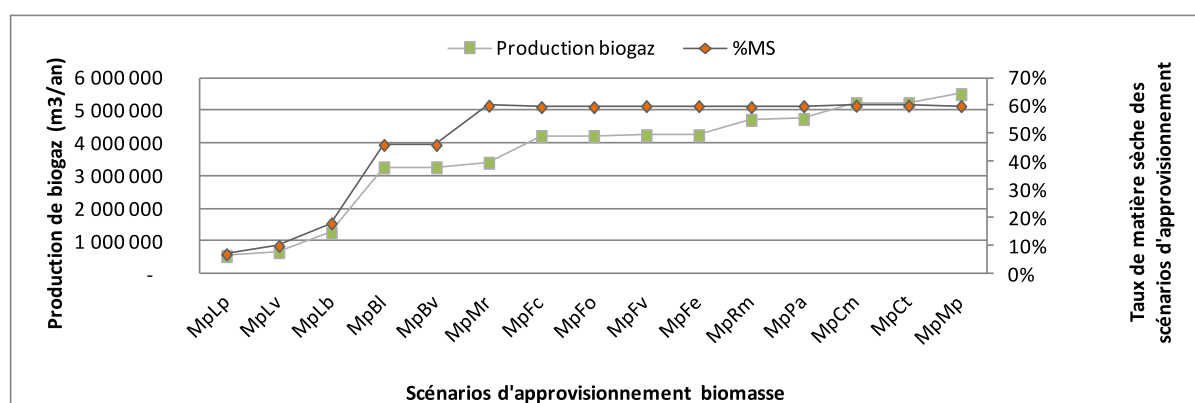


Figure 36 : Coût spécifique de mobilisation selon l'approvisionnement mono-produit d'un modèle type 40 000 T en injection sur le réseau de distribution

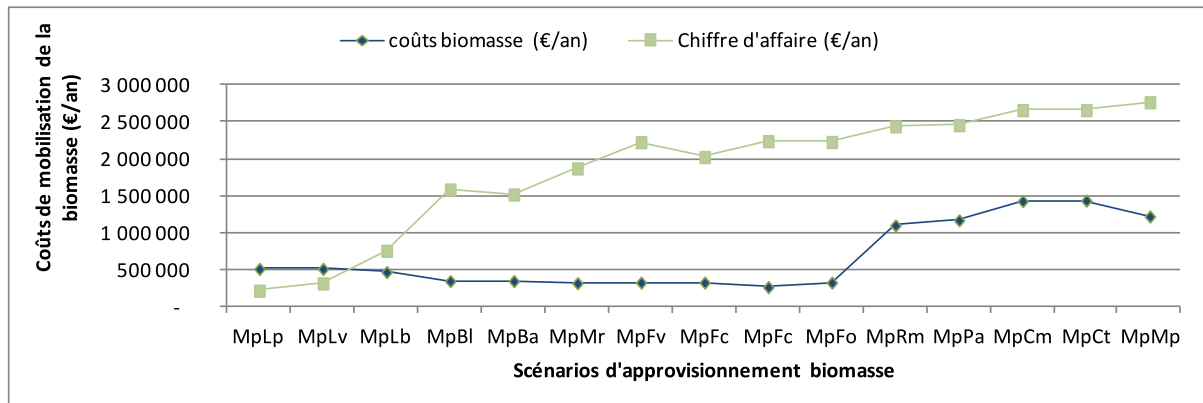


Figure 37 : Excédent brut d'exploitation selon l'approvisionnement mono-produit d'un modèle type 40 000 T en injection sur le réseau de distribution

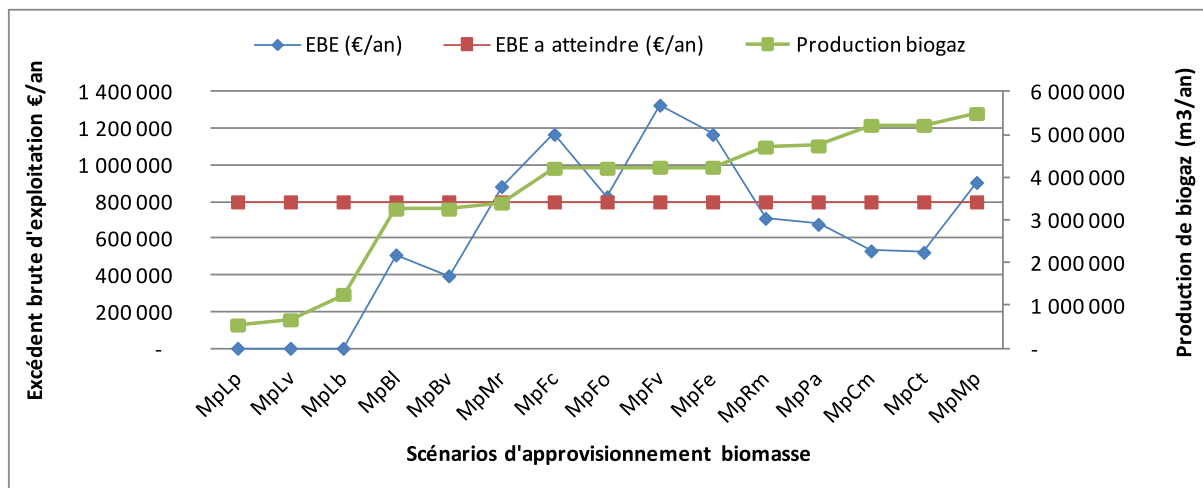
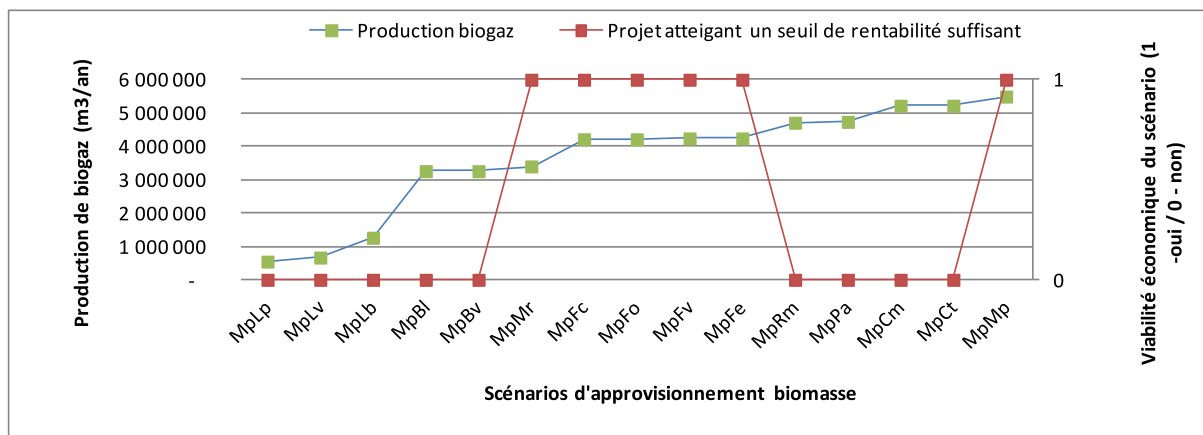


Figure 38 : Viabilité des modèles « type » 40 000 T en injection sur le réseau de distribution selon l'approvisionnement mono-produit



- « Modèle type » co-digestion :

L'évaluation du « modèles type » 40 000 T en co-digestion permet, comme pour les scénarios précédemment étudiés, d'obtenir une viabilité accrue des scénarios étudiés. La synergie entre les différentes biomasses permet d'aboutir à des mix d'approvisionnement optimisés pour rendre viable le modèle « type » de la même manière que pour les modèles « type » en co-digestion 20 000 T.

La Figure 39 illustre que la production de biogaz des mix de biomasse des différents scénarios est moins variable que pour les scénarios mono-produits, et représente une production supérieure entre 3 700 000 et 5 000 000 m³/an. Les écarts de coûts de mobilisation biomasse restent dépendants de la nature des mix de biomasses. On constate cependant une convergence entre les différents modèles étudiés dont le chiffre d'affaires est compris entre 1 800 000 € et 2 500 000 (Figure 40). La Figure 41 illustre qu'en co-digestion, l'ensemble des modèles « type » présentés dégage un excédent brut d'exploitation suffisant pour être viables.

Figure 39 : Production de biogaz selon l'approvisionnement en co-digestion d'un modèle type 40 000 T en injection sur le réseau de distribution

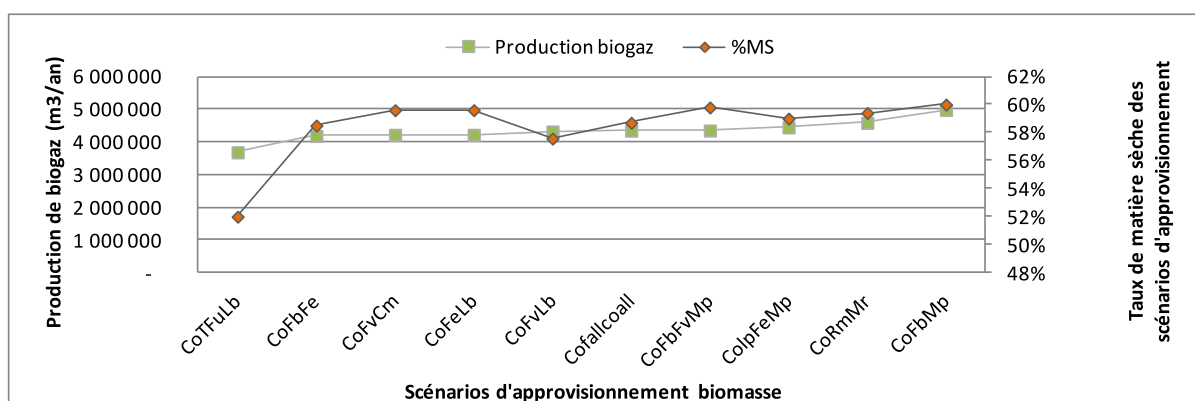


Figure 40 : Coût spécifique de mobilisation selon l'approvisionnement en co-digestion d'un modèle type 40 000 T en injection sur le réseau de distribution

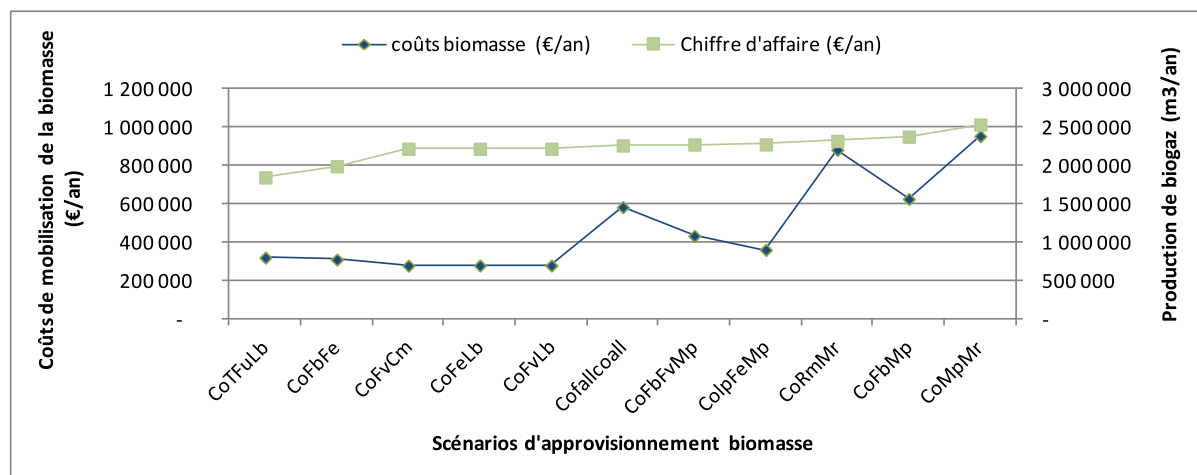
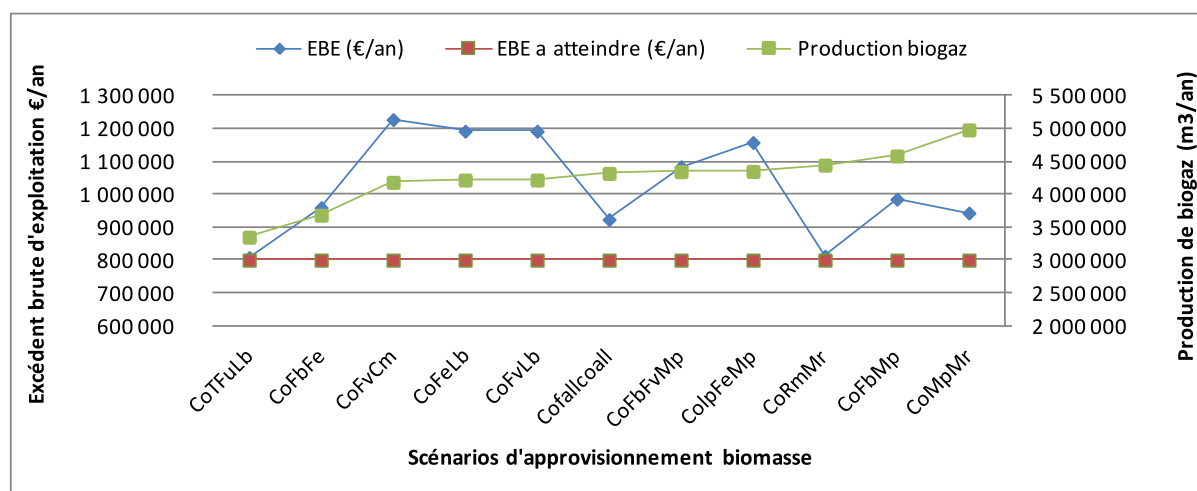
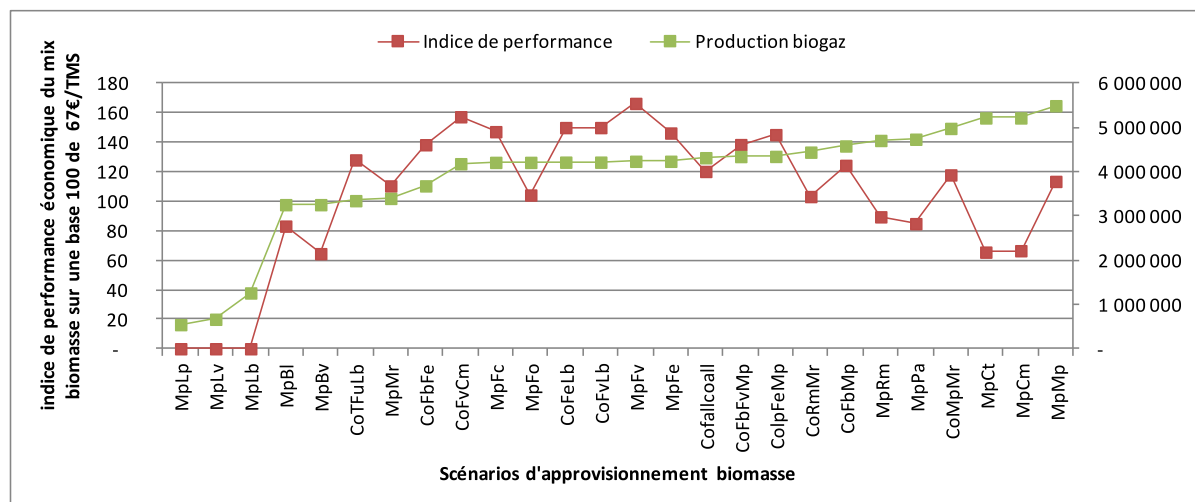


Figure 41 : Excédent brut d'exploitation selon l'approvisionnement en co-digestion d'un modèle type 40 000 T en injection sur le réseau de distribution



L'évaluation du modèle « type » nous permet de déterminer le seuil à atteindre pour l'indice de performance du mix de biomasse à 67 €/TMS (seuil de viabilité). La Figure 42 illustre l'indice de performance dégagé par chaque scénario d'approvisionnement ramené sur une base 100 de 67€/TMS. Tout comme pour les modèles « type » 20 000 T, on constate que les modèles étudiés les plus performants pour un modèle « type » 40 000 T ne sont pas les plus énergétiques.

Figure 42 : Indice de performance des modèles « type » 40 000 T en injection sur le réseau de distribution selon l'approvisionnement



La comparaison de modèles « type » de taille différente met en évidence que leur mise en place est possible quelle que soit la taille du projet, et qu'il convient de déterminer pour chaque modèle « type » le mix de biomasse permettant d'atteindre un indice de performance suffisant. **On constate que plus la capacité de l'usine est importante plus l'indice diminue pour un modèle « type » donné.** Il passe ici de 75€/TMS à 67€/TMS pour des projets de 20 000 T et 40 000 T. Concrètement, plus l'indice de performance est bas, moins le mix de biomasse a besoin d'être performant et plus le nombre de combinaisons viables possibles est important.

L'évaluation des modèles « type » a également été menée pour des projets de taille supérieure, dont le détail des résultats n'est pas présenté ici. Les résultats vont dans le sens des conclusions exposées précédemment. Pour un projet de 80 000 T de biomasse, l'indice de performance nécessaire diminue, pour s'établir à 62,5€/TMS. Cela accroît le nombre de combinaisons possibles par rapport aux précédents modèles « type » pour atteindre le seuil de viabilité. Les écarts constatés entre les modèles favorisant les biomasses à faible coût de mobilisation, en comparaison de ceux dont la biomasse présente des coûts de mobilisation élevés, sont encore plus importants.

L'évaluation des modèles « type » met en évidence que la taille du projet influe directement sur le nombre de combinaisons favorables à l'émergence d'un projet viable. **Il faut noter que même si un modèle « type » de grande capacité permet d'avoir des mix de biomasses moins restrictifs, il sera tout de même plus difficile de les mettre en œuvre dans la mesure où la quantité de biomasse totale est plus élevée et donc plus difficile à mobiliser.**

3.4. Evaluation du modèle « type » en injection sur le réseau de Transport

3.4.1. Caractéristique spécifique du modèle « type » en injection sur le réseau de Transport

Le réseau de transport correspond au réseau primaire de gaz naturel qui alimente l'ensemble du réseau de distribution. Le réseau de transport permet l'acheminement du gaz en provenance des pays étrangers ainsi que celui issu des ports méthaniers. Le réseau de transport est géré par deux opérateurs : GRT et TIGF.

La gestion de l'injection est également assurée par le gestionnaire de réseau de transport qui réalise une prestation de contrôle qualité et de comptage du biométhane avant d'être injecté sur le réseau. Le modèle économique de mise à disposition du poste d'injection sur le réseau de transport est différent de celui du réseau de distribution, puisque le poste d'injection est vendu à l'unité de méthanisation. Une prestation d'exploitation est également assurée par le gestionnaire.

L'injection sur le réseau de transport présente un certain nombre d'avantages : un maillage important sur l'ensemble du territoire (Annexe 13), ainsi que des débits transitant très importants (GRT, carte réseaux verts), favorisant la possibilité de réinjection du biogaz. Il présente également un certain nombre de contraintes, en particulier les coûts de raccordements et d'études très élevés ainsi que des contraintes administratives importantes. Le raccordement au réseau de transport étant soumis à une autorisation administrative ICPE spécifique, dont le délai d'instruction peut aller jusqu'à 24 mois.

Le raccordement sur le réseau de transport est plus contraignant que pour le réseau de distribution.

Données spécifiques prises en compte dans le modèle « type » injection réseau de transport :

- Coût de raccordement pris en compte : 200 000 €
- Vente du poste d'injection pris en compte : 700 000 €
- Coûts d'exploitation assurés par le gestionnaire : 50 000 €/an

3.4.2. Modèles « type » 20 000 et 40 000 T en injection sur le réseau de transport

Lorsqu'on compare les modèles « type » sur le réseau de distribution et sur le réseau de transport pour des capacités de traitement de biomasses équivalentes, la seule différence porte sur les coûts d'investissement et d'exploitation. Ceci se traduit pour un même approvisionnement à un amortissement du modèle « type » différent, moins favorable au modèle « type » transport.

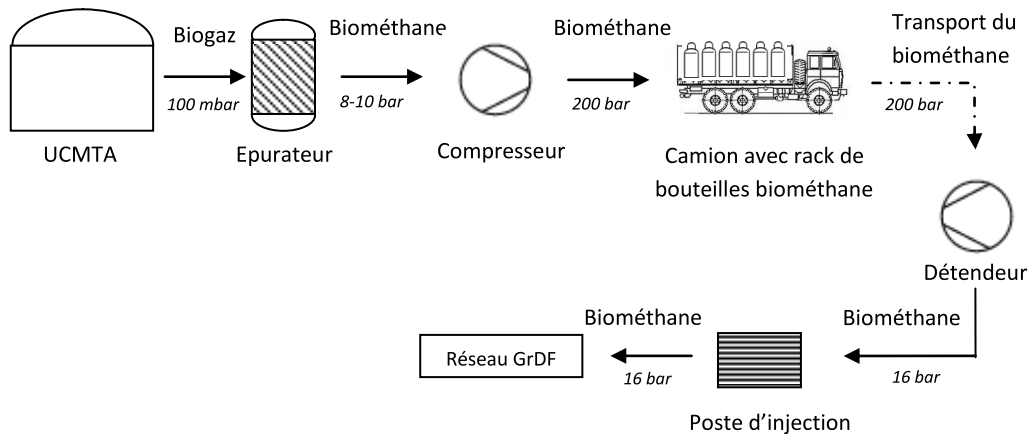
L'indice de performance de biomasse à atteindre pour un modèle « type » transport est supérieur à celui d'un modèle « type » distribution. L'indice de performance du mix biomasse passe de 62,5 €/TMS à 86,25 €/TMS pour les modèles types 20 000 T et de 67 €/TMS à 74€/TMS pour les modèles « type » 40 000 T. Les mix de biomasses viables sont donc moins nombreux et plus restrictifs.

3.5. Evaluation du modèle « type » en injection sur le réseau avec transport du biométhane

3.5.1. Caractéristique spécifiques du modèle « type » injection avec transport du biométhane

Dans l'objectif de maximiser les zones favorables où l'injection serait possible, ainsi que le débit d'injection compatible avec les débits transitant, un modèle « type » d'injection permettant de s'affranchir des contraintes de réseau a été imaginé. Il ne s'agit pas de valoriser le biométhane produit auprès du réseau le plus proche (distribution ou transport), mais de le valoriser auprès d'un réseau de distribution le plus favorable (débit compatible). Pour ce faire, le biométhane produit est comprimé à 200 bar au sein d'un rack de biométhane et transporté par camions jusqu'au poste d'injection compatible avec le débit injecté souhaité (Figure 43). Les caractéristiques techniques sont décrites en Annexe 16.

Figure 43 : Mise en place de l'injection sur le réseau avec transport de biométhane comprimé à 200 bar



Données spécifiques prises en compte dans le modèle « type » injection réseau de distribution :

- Coût de raccordement pris en compte : 20 000 €
- Location du poste d'injection et coûts d'exploitation assurés par le gestionnaire : 100 000 €/an
- Coûts d'investissement dans le rack de transport biométhane : 500 000 €
- Coûts d'investissement liés à la détente du biométhane : 200 000 €
- Coûts de transport du rack biométhane pris en compte dans le coût global de transport.

3.5.2. Modèles « type » 20 000 et 40 000 T en injection avec transport du biométhane

De la même manière que pour l'évaluation des précédents modèles « type », à approvisionnement équivalent, la seule différence entre les modèles est d'ordre économique, les coûts d'investissement et les coûts d'exploitation étant supérieurs à ceux du modèle « type » réseau distribution.

L'indice de performance de biomasse à atteindre pour un modèle « type » transport est supérieur à celui d'un modèle « type » distribution. Les mix de biomasses viables sont donc moins nombreux et plus restrictifs.

L'indice de performance du mix de biomasse passe de 62,5 €/TMS à 83,75 €/TMS pour les modèles «types » 20 000 T et de 67 €/TMS à 72,5 €/TMS pour ceux de 40 000 T.

3.6. Commentaires et perspectives

L'évaluation par une approche de modèles « type » a permis de mettre en évidence qu'à chaque modèle construit, correspond un approvisionnement biomasse lui permettant d'atteindre une rentabilité suffisante pour envisager sa mise en œuvre.

Des modèles « type » peuvent être mis en place à partir de biomasses d'origines différentes (coproduits, effluents d'élevage, mix complémentaires) pour toute taille de projet envisagé. Pour chaque modèle, le mix de biomasse viable correspond à un équilibre précis « type » entre la ration énergétique du mix et son coût de mobilisation. Par conséquent, l'importance de la taille du modèle s'oppose à la performance du mix énergétique (indice de performance biomasse) et s'associe à un nombre de combinaisons viables plus grand.

En considérant des périmètres de biomasse équivalents ainsi que des valorisations différentes (réseau de transport et de distribution), la comparaison entre modèles « type » met en avant la nécessité de produire des mix de biomasse plus performants, correspondant aux modèles ayant des coûts d'investissement et d'exploitation plus élevés. Cela réduit le nombre de combinaisons viables et restreint par conséquent la capacité de développement de ces modèles.

La possibilité de mettre en œuvre des modèles « type » de tailles différentes, sur des modes de valorisation complémentaires et à partir de biomasses variées (mono-produits ou co-digestion) montre le potentiel de développement de l'injection réseau sur l'ensemble du territoire recelant des ressources biomasse et bénéficiant d'un réseau de gaz naturel.

La méthode d'évaluation par modèle « type » peut avoir des applications à différents niveaux. En premier lieu pour l'entreprise, cette méthode a permis de construire des unités standard de différentes capacités qui répondent aux besoins du marché et à ceux des porteurs de projets sur l'ensemble du territoire. La méthodologie peut également être utilisée comme outil d'optimisation à destination des unités en fonctionnement en cherchant à alimenter le méthaniseur avec le mix de biomasse le plus performant. Enfin l'approche par les modèles « type » a permis de déterminer qu'un grand nombre de typologies de biomasse ou de mix de biomasse sont envisageables dans la mise en œuvre d'une unité de méthanisation standard. Cette démarche permet d'avoir une approche prospective et commerciale pour la société, en mettant en avant la possibilité de développer des usines de différentes capacités quelle que soit la nature des biomasses disponibles et des territoires. La connaissance des mix de biomasse les plus performants permet également de cibler les zones les

plus favorables au développement de l'activité de la société en vue d'implanter des modèles type selon les biomasses disponibles sur ces territoires.

En second lieu cette méthodologie peut être réutilisée non pour comparer le comportement de modèles type selon la nature des intrants comme nous l'avons fait, mais pour comparer la performance des technologies selon le mix d'approvisionnement. Une étude de ce type permettrait de déterminer par type de biomasse le choix technologique le plus adapté. On pourrait, entre autres, mener la même évaluation sur des technologies en voie sèche, comparer l'efficacité de régimes thermophiles et mésophiles, etc. De la même manière à périmètre égal, ce type d'évaluation pourrait être utilisé pour comparer la viabilité des modèles selon des valorisations énergétiques différentes : cogénération, micro-turbine, etc.

Enfin, l'analyse par modèle « type » pourrait être utilisée comme outil d'aide à la décision, notamment au niveau des pouvoirs publics. La méthodologie pourrait être utilisée pour définir ou aménager le cadre tarifaire auquel est soumise la filière de méthanisation. En effet, on pourrait évaluer l'impact de l'évolution du tarif ou de la mise en place d'une prime spécifique sur la viabilité des modèles par filières. On pourrait ainsi anticiper et déterminer si les modifications envisagées permettent ou non d'inciter le développement de la filière (soit en améliorant la rentabilité de modèles existants, soit en augmentant le nombre de modèles viables).

Par exemple, on pourrait de la même manière utiliser cet outil pour orienter les choix de développement. Dans l'hypothèse où l'état décide de favoriser les unités de méthanisation valorisant plus de 60% de lisier dans l'approvisionnement, cet outil nous permettrait d'évaluer le montant de la prime au lisier nécessaire à mettre en place pour que cette filière soit viable. De la même manière, le développement de la filière pourrait s'orienter vers des unités ayant une performance environnementale minimum (énergie valorisée et TeqCO_2 économisée), en conditionnant par exemple des aides à ce niveau de performance environnementale. L'évaluation par les modèles « type » nous permettrait de déterminer le choix de biomasse adéquat.

L'évaluation par les modèles « type » telle qu'elle a été réalisée dans les présents travaux prend en compte un cadre théorique pour lequel on suppose que l'ensemble des conditions nécessaires à la viabilité d'un projet sont présentes. L'évaluation ne tient pas compte de certains facteurs qui pourraient rendre la mise en œuvre des modèles « type » impossible, tels que la disponibilité de terrains pour l'implantation de l'usine, l'opposition de riverains, la réticence des agriculteurs à intégrer un projet collectif ou encore des contraintes spécifiques liées à la valorisation du biogaz.

Il est important de considérer cette démarche comme une approche d'optimisation et de création de modèles performants, tout en gardant à l'esprit que la mise en œuvre d'un projet collectif de méthanisation ne dépend pas seulement de la viabilité technique et économique du projet, mais également de paramètres divers, intrinsèques aux spécificités de chaque territoire.

CHAPITRE 4 :

La méthanisation, un outil technologique permettant d'atteindre l'autonomie

4.1. Mise en contexte de la réflexion sur l'autonomie d'une exploitation

4.1.1. La dépendance de l'agriculture

L'agriculture telle que nous la connaissons en France aujourd'hui est moderne, fortement mécanisée et très consommatrice d'intrants extérieurs. L'évolution de l'agriculture depuis 1950 est frappante tant sur le nombre des exploitations, qui est passé de 2 257 000 à 735 000 entre 1955 et 2004, que sur leur productivité qui est passée par exemple pour le maïs de 11 qt/ha à 91 qt/ha en moyenne sur la même période (*source Agreste*). La mécanisation et l'augmentation de la productivité se sont également accompagnées d'une consommation et d'une dépendance plus forte vis-à-vis des carburants et engrais azotés. L'évolution à la hausse du prix de ces postes et pour lesquels les agriculteurs ont assez peu de marge de manœuvre, met une pression constante sur la rentabilité des exploitations (Annexe 17).

L'un des enjeux de l'agriculture de demain est de réduire cette dépendance qui pèse de plus en plus dans la gestion quotidienne, à travers la mise en œuvre de solutions qui lui permettraient soit de réduire ses consommations en azote et carburant soit de les produire elle-même en devenant autonome. La méthanisation en tant que technologie permet de produire de l'énergie sous différentes formes, et en même temps de restituer au sol les éléments fertilisants contenus dans le digestat : cela explique son intérêt pour l'autonomie des exploitations. Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, chaque territoire, chaque typologie d'exploitation (élevage ou céréales) peut s'inscrire dans un projet de méthanisation collectif, au sein d'un modèle type, lorsque les éléments nécessaires au modèle sont réunis. Chaque agriculteur s'inscrivant dans cette démarche serait donc producteur d'énergie et de fertilisants, pour son compte ou celui d'autrui. La question sous-jacente d'une possible autoconsommation de ces productions pour devenir autonome se pose naturellement. Est-ce que la méthanisation, en tant qu'outil industriel partagé, est un moyen pour tendre vers l'autonomie des exploitations ? Est-ce que cet objectif est accessible pour tout type d'exploitation ? Est-ce que l'autonomie possible est gage d'une performance accrue pour l'exploitation ?

Ce chapitre a pour objectif de traiter ces questions et d'apporter des éclairages sur les capacités d'une exploitation à atteindre l'autonomie à travers son intégration d'un « modèle type » dont l'objectif serait d'accroître l'autonomie des exploitations partenaires.

4.1.2. La méthanisation collective comme outil d'autonomie pour les exploitations agricoles

Afin de tendre vers une autonomie, totale ou partielle, une exploitation doit être en mesure de produire du carburant en volume suffisant pour la conduite de son exploitation mais également des fertilisants en quantité suffisante pour la fertilisation de l'ensemble de ses terres. Le présent chapitre cherche à placer l'unité de méthanisation comme un outil permettant d'atteindre ces objectifs. Pour cela, nous allons évaluer un modèle « type » d'unité de méthanisation qui permettrait aux exploitants d'une part d'utiliser le biogaz produit comme carburant en substitution du fioul et d'autre part d'utiliser le digestat en substitution des engrais azotés.

La méthanisation permet de conserver l'ensemble des éléments fertilisants contenus dans les biomasses digérées. Bien qu'elle ne produise pas d'azote supplémentaire, la transformation des matières digérées permet toutefois d'améliorer l'efficacité de l'azote grâce à sa minéralisation. Ce n'est toutefois pas suffisant pour atteindre l'autonomie. Pour qu'une exploitation agricole devienne autonome en fertilisant azoté, le digestat renvoyé sur son exploitation doit être enrichi avec des unités fertilisantes supplémentaires. Cet objectif est atteignable au sein d'un projet collectif en méthanisant d'autres intrants en complément afin d'apporter des unités fertilisantes supplémentaires:

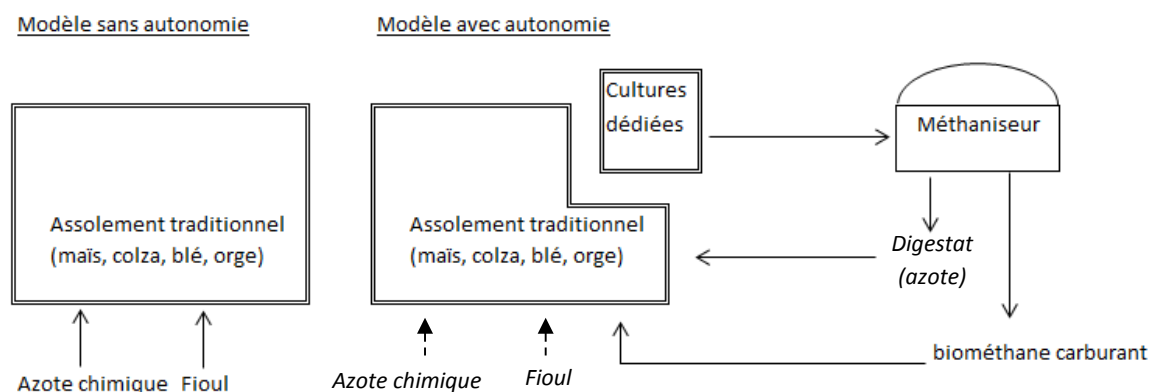
- Provenant de produits non agricoles exogènes, tels que les déchets des agro-industries, les déchets verts des collectivités, les boues de stations d'épuration.
- Provenant de produits agricoles exogènes pour lesquels les producteurs ne souhaitent pas récupérer les éléments fertilisants contenus dans le digestat, tels que les effluents d'élevage dans des zones d'excédent ou des fumiers équins pour lesquels les fumiers sont une contrainte à gérer.
- Provenant de productions végétales dédiées, de type légumineuses, issues des exploitations partenaires. Ces cultures ont la propriété de produire de l'azote. Ces plantes ne nécessitent pas de fertilisation azotée, elles sont autosuffisantes grâce à leur capacité à capter l'azote de l'air.

Le point n°1 ne sera pas traité dans cette évaluation. L'étude des déchets agro-industriels, déchets urbains et boues de STEP ont été exclus de ces travaux pour se concentrer sur les biomasses d'origines agricoles, en accord avec le modèle UMCTA. Le point n°2 ne sera pas traité non plus car cette possibilité induit la dépendance du modèle à des gisements qui ne sont pas maîtrisés à long terme par les agriculteurs partenaires du projet. L'évaluation se concentrera sur le point n°3 à travers la mise en place de cultures dédiées de légumineuses par les agriculteurs partenaires. Ces cultures dédiées permettront d'une part d'alimenter le méthaniseur en biomasse en complément des déchets et coproduits de cultures mais également d'enrichir le digestat grâce à l'azote fixé dans l'air par les légumineuses, permettant ainsi de diminuer le besoin de fertilisants azotés extérieurs et d'atteindre, selon les proportions, un certain niveau d'autonomie en azote.

Pour atteindre une autonomie en carburant à travers un projet collectif de méthanisation, il faut que le biogaz soit valorisé en tant que biométhane carburant au sein de tracteurs agricoles fonctionnant au gaz naturel. Dans le cadre des modèle « type » le biométhane épuré pour être injecté dans les réseaux peut également, en partie ou en totalité, être utilisé en tant que biométhane carburant. La production de biogaz à des usages de carburant peut être assurée soit par la valorisation de déchets des exploitations partenaires soit par la culture dédiée de légumineuses qui, une fois méthanisées, permettront la production de biogaz.

Dans ce modèle « type » d'autonomie, l'agriculteur n'est plus dans une logique où il valorise uniquement ces déchets, des coproduits de cultures ou des effluents d'élevage pour produire de l'énergie tout en maintenant ces pratiques. Il entre dans une dynamique au sein de laquelle il « cultive » son engrais et son carburant en valorisant des cultures de légumineuses au sein d'un projet de méthanisation (Figure 44).

Figure 1 : Mise en place d'un système autonome au travers d'un projet de méthanisation



Ce chapitre aborde également un sujet relativement sensible en France : l'utilisation de cultures dédiées pour des usages énergétiques. De nombreuses études ont remis en cause le bilan carbone de ce type de pratiques, notamment pour les carburants de première génération (étude Ademe). De la même manière le gouvernement a clairement exposé son refus de voir un modèle de méthanisation français prendre le même chemin que celui retenu par l'Allemagne, basé sur l'approvisionnement des digesteurs à partir de cultures énergétiques.

Il existe aujourd'hui un certain nombre d'organismes professionnels qui militent pour l'utilisation de cultures énergétiques, dans une moindre mesure en méthanisation (Méthaniseurs agriculteurs de France), notamment pour résoudre des problématiques de saisonnalité et d'approvisionnement qui sont fréquemment rencontrés dans le montage des projets par les agriculteurs.

Ce chapitre n'a pas pour objectif de prôner spécifiquement l'incorporation de cultures énergétiques au sein des unités de méthanisation, mais bien de se poser la question de la possible utilité de cette démarche dans le cas d'une recherche d'autonomie par les exploitants agricoles. Il s'agit ici de déterminer les conditions techniques qui permettent d'atteindre l'autonomie grâce à la méthanisation et d'en évaluer l'impact à l'échelle d'une exploitation entrant dans ce schéma.

D'une part, l'évaluation de ce chapitre porte sur les conditions techniques permettant d'atteindre l'autonomie : quelle surface est nécessaire pour qu'un exploitant soit autonome en carburant et en azote ? Et d'autre part, l'évaluation s'attachera à déterminer les conditions économiques qui permettraient à ce modèle autonome de voir le jour. La mise en place de cette pratique, sous réserve qu'elle soit viable permettrait aux exploitations :

- d'être autonome en carburant,
- d'être autonome en azote,
- de maîtriser le coût des approvisionnements carburant et azote sur le long terme,
- d'améliorer le bilan environnemental de son exploitation de façon durable,
- de diversifier son activité et ses revenus en intégrant un projet de méthanisation.

Les questions liées aux conséquences environnementales de la mise en place de cultures dédiées à des fins énergétiques ne sont pas traitées ici, en particulier les impacts liés au Changement d'Affectation des Sols Indirect (CASI).

L'exploitation passe d'une logique reposant sur des intrants extérieurs à base de ressources fossiles (azote et fioul) pour la conduite de l'exploitation, à une logique d'autonomie, dans laquelle l'exploitation cultive des cultures dédiées qui une fois transformées au sein du méthaniseur lui permettront de récupérer du biométhane carburant et du digestat en substitution des intrants fossiles.

4.1.3. Choix de la légumineuse pour les cultures dédiées

Les légumineuses sont des espèces végétales dont la principale caractéristique est la richesse en protéines, grâce à leur capacité à fixer l'azote de l'air. Ces espèces ne nécessitent pas d'apports d'azote extérieurs pour se développer et permettent d'enrichir le sol en éléments azotés alors que les autres espèces en exportent.

Les légumineuses appartenant à la famille des fabacées sont capables de capter l'azote de l'atmosphère grâce à leur association symbiotique avec les rhizobiums. Les racines des légumineuses sont dotées de nodosités de tailles différentes selon les espèces. C'est au sein de certaines cellules de ces nodosités que vivent les rhizobiums, bacilles du genre *Bacillus radicola* (Soltener 1986). La symbiose entre le rhizobium et la légumineuse permet une association à bénéfice réciproque, les rhizobiums prélèvent sur la légumineuse des substances hydrocarbonées nécessaires pour leur croissance à partir de l'azote atmosphérique contenue dans les cavités du sol. La légumineuse, elle, digère les bactéries qu'elle héberge au fur à mesure de leur renouvellement profitant ainsi de leurs protéines et donc de l'azote synthétisé dans l'atmosphère.

Les propriétés agronomiques de cette symbiose sont bien connues et peuvent être résumées de la façon suivante :

- Les légumineuses ont besoin des rhizobium pour croître. Des essais ont montré que sans rhizobium les légumineuses ne croissent pas malgré la présence d'éléments nutritifs (Boullard, 1967).
- Les légumineuses n'ont pas besoin d'autre source d'azote que celle fournie par les rhizobium. Même si parfois une légère fumure azotée est apportée dans le cas de situation difficile, pour faciliter la levée de la culture, le rendement de la plante n'est pas augmenté.

- Les légumineuses enrichissent le sol en azote. Les nodosités se renouvellent, celles qui meurent se détachent des racines et sont minéralisées. Lorsque la plante meurt, c'est l'ensemble de l'azote qu'elle contient qui retourne au sol.
- Les légumineuses peuvent nourrir en azote les plantes qui leurs sont associées, c'est notamment le cas lors de mélanges graminées + légumineuses.
- La quantité d'azote fixée annuellement par une légumineuse est relativement importante, selon les études on trouve 100 à plus de 400 kg N/ha en fonction de la vigueur et du type de cultures de légumineuses.

Le choix d'une culture dédiée en méthanisation dans la cadre d'un modèle type autonome doit répondre à deux enjeux : le premier est d'apporter en partie ou en totalité, l'autonomie sur le volet azote et sur le volet carburant, ce qui est le cas avec une légumineuse qui serait cultivée pour être ensuite méthanisée (production azote et biogaz). Le second enjeu est la capacité de cette culture à s'intégrer dans des modèles « type », c'est-à-dire à pouvoir s'implanter sur des territoires ne présentant pas les mêmes conditions pédoclimatiques. La diversité de ces cultures, le choix variétal et la possibilité d'association en mélange semblent permettre d'assurer une souplesse dans la mise en place de ces cultures dédiées pour la méthanisation en vue d'une autonomie.

4.2. Evaluation de l'autonomie Azote et Carburant

Démarche de l'évaluation :

L'identification d'un modèle spécifique de méthanisation collective, qui permettrait d'atteindre l'autonomie en utilisant le méthaniseur comme outil de production de carburant et d'azote nécessite une évaluation multicritères, aussi bien sur les aspects techniques, économiques qu'environnementaux.

Pour cela, nous avons élaboré une succession d'évaluations pour déterminer les caractéristiques permettant d'aboutir un modèle « type autonome » viable, que ce soit au niveau de la construction technique et économique d'une unité « type autonome » ou de l'identification des conditions dans lesquelles un exploitant agricole à intérêt d'intégrer ce modèle. L'évaluation porte sur :

- 1. la description des conditions d'autonomie et l'évaluation de la capacité d'un exploitant à l'atteindre,

- 2. la création d'un modèle « type autonome » intégrant les conditions permettant d'atteindre l'autonomie,
- 3. l'identification des paramètres influençant l'intérêt de la démarche, identification des seuils et limites,
- 4. le choix des modèles d'évaluation pertinents, la construction de modèles d'exploitation caractéristiques pour l'évaluation,
- 5. l'évaluation de l'intérêt et des possibilités de mise en œuvre de l'autonomie au sein des modèles d'évaluation.

Description des conditions d'autonomie :

L'analyse des conditions d'autonomie nécessite de confronter d'une part l'ensemble des besoins de l'exploitation avec, d'autre part, ses capacités à devenir autosuffisante. Pour cela il a fallu caractériser les besoins en azote et carburant des principales cultures et identifier les facteurs qui les influencent. De la même manière cette analyse nous a conduit à caractériser, selon la nature des légumineuses prises en compte, la capacité ou non de devenir autonome et les limites de la démarche.

Création d'un modèle « type autonome » :

La mise en œuvre d'un projet collectif de méthanisation permettant de valoriser des cultures dédiées afin de produire des fertilisants et du carburant à destination des exploitations partenaires du projet nécessite la création d'un modèle « type autonome » viable. Pour cela, en suivant la méthodologie déployée dans le Chapitre 2, l'ensemble des paramètres permettant d'aboutir à un projet techniquement et économiquement viable a été défini. Cette représentation à travers un modèle type nous a permis de définir certains paramètres nécessaires à l'évaluation de l'autonomie, tels que les seuils de prix de vente du biométhane carburant ou de participation à la culture des légumineuses.

Identification des paramètres influençant l'intérêt de l'autonomie :

La mise en place de cultures dédiées par l'exploitant pour la production de son carburant et de son azote va entraîner un impact majeur sur la rentabilité de son exploitation (marge brute/ha). En effet le bilan économique global va être modifié par l'arrivée de nouveaux flux économiques (achat de biométhane) et par la diminution des flux existants (vente de grains, achat du fioul, achat d'azote, coût d'implantation des cultures). Il a fallu caractériser l'ensemble des paramètres influençant

l'économie globale de l'exploitation afin de déterminer les seuils et limites de la démarche d'autonomie.

Choix des modèles d'évaluation :

Afin de mettre en place une évaluation globale de l'intérêt pour une exploitation d'intégrer un modèle « type autonome », il a fallu définir des modèles d'évaluation en créant des typologies d'exploitations qui soient à la fois standard et représentatives tout en mettant en avant des situations différentes significatives.

Evaluation de l'intérêt et des possibilités de mise en œuvre de l'autonomie :

Pour comprendre l'intérêt de l'autonomie et les possibilités de sa mise en œuvre, nous nous sommes attachés dans un premier temps à comparer au sein d'un même modèle (modèle type autonome) le comportement de différentes exploitations (modèle d'évaluation). Ceci nous a permis d'identifier les cas les plus favorables pour la mise en place de ces systèmes. De la même manière, pour chacun des modèles d'évaluation, nous avons étudié le comportement à long terme à partir de scénario prospectifs, selon l'évolution de paramètres économiques (prix du fuel, azote, grains), afin de mieux caractériser les contextes au sein desquels la mise en œuvre de l'autonomie est possible.

4.3. Autonomie azote

4.3.1. Le besoin d'azote à substituer

Le principe d'autonomie développé dans ce chapitre consiste à substituer l'apport d'engrais azotés chimiques sur les cultures d'une exploitation par l'apport de digestat issu de la méthanisation de légumineuses. Dans ce schéma, l'agriculteur utilise une partie de sa surface agricole pour « cultiver » l'engrais azoté qu'il utilisera sur le reste de ses cultures. Il se sert de la culture de la légumineuse pour stocker et produire de l'azote et de la méthanisation comme un outil permettant de produire un engrais azoté sous forme de digestat disponible tout au long de l'année pour la fertilisation de ses autres cultures.

La surface à cultiver en légumineuses va dépendre d'une part de la quantité d'azote que peut produire la légumineuse et d'autre part du besoin en azote des différentes cultures de l'exploitation. Ces besoins en azote vont être différents d'une exploitation à l'autre et vont dépendre principalement :

- De la typologie des cultures implantées,
- Des objectifs de rendement,
- Des conditions pédoclimatiques,
- Des pratiques locales.
-

Chaque exploitation intégrant un modèle « type autonome » aura une configuration possible d'autonomie singulière qui dépendra totalement des choix de conduite de cultures et des conditions locales dans lesquelles l'exploitation se trouve.

Dans l'évaluation nous avons déterminé les surfaces de légumineuses nécessaires pour atteindre l'autonomie à partir du besoin en azote chimique des cultures, en utilisant des méthodes de calculs des plans de fumures des Chambres d'Agriculture, telles que la méthodologie CAU (Coefficient Apparent d'Utilisation d'engrais) ou la méthode du bilan additif (Chambre d'Agriculture de la Marne, guide de calcul de la dose d'azote prévisionnelle).

Afin d'évaluer les besoins en azote des cultures et de comparer la capacité d'autonomie des exploitations, nous avons constitué quatre modèles d'évaluation reflétant différentes configurations dans lesquelles les exploitations peuvent se trouver (Tableau 4). Les différents paramètres pris en compte dans ces modèles sont :

- Le type de culture (ici 4 cultures sont étudiés : maïs grain, colza, blé, orge),
- Le rendement des cultures (haut rendement/bas rendement),
- La fourniture du sol (élevée/faible), en unité d'azote (1 uN = 1 kgN/ha).

Tableau 4 : dose d'azote à fournir (uN/ha) selon les cultures et fournitures du sol

Rendement bas de cultures	uN/qt	Rdt (qt/ha)	Besoins uN Tot (uN)	Fourniture du sol (uN)	Dose à apporter (uN)
Maïs	2,5	70	175	80-120	95-55
Colza	6,5	30	195	40-80	155-115
Blé	3	65	195	50-80	145-115
Orge	2,3	65	150	50-80	99-70

Rendement élevés de cultures	uN/qt	Rdt (qt/ha)	Besoins uN Tot (uN)	Fourniture du sol (uN)	Dose à apporter (uN)
Maïs	2,5	110	275	80-120	195-155
Colza	6,5	45	293	40-80	253-213
Blé	3	80	240	50-80	190-160
Orge	2,3	80	184	50-80	134-104

La recherche de l'autonomie dépend fortement du type de culture et de la nature des fournitures disponibles. Comme l'illustre le Tableau 4, les besoins en azote sont très dépendants de l'objectif de rendement visé et des fournitures du sol disponibles. On constate par exemple des écarts d'une culture à l'autre : l'orge réclame en effet nettement moins d'azote, que se soit à bas ou haut rendement, que le colza. Mais surtout des écarts selon les objectifs de rendement apparaissent : environ 100 uN supplémentaires pour le maïs et le colza selon la configuration. En prenant en compte les extrêmes dans chaque configuration, par exemple un maïs bas rendement associé à une fourniture importante et un colza haut rendement et à une faible fourniture du sol, l'écart en dose à apporter est très important, environ 198 uN.

La dépendance d'une exploitation aux fournitures azotées extérieures étant extrêmement variable, la recherche d'autonomie sera soumise aux mêmes contraintes.

4.3.2. Les conséquences du choix de la légumineuse

Le choix de la légumineuse est un élément déterminant dans l'évaluation. En effet, le choix de cette culture va dépendre du contexte pédoclimatique local et des pratiques de l'exploitation. Ce choix va impacter les caractéristiques du modèle type « autonome » selon le rendement de la culture et la production de biogaz de celle-ci, ainsi que la capacité d'autonomie apportée par la culture selon la quantité d'azote qu'elle est capable de produire.

Le choix de la légumineuse doit répondre aux impératifs suivants :

- capacité d'implantation sur une part importante du territoire,
- rendement élevé,
- production d'azote importante.

Pour répondre à ces objectifs, deux systèmes de légumineuses ont été retenus : la culture de la luzerne et la culture d'un mélange vesce/tritcale. La luzerne est une culture bien implantée et France

avec 300 000 ha environ, pouvant atteindre des rendements élevés jusqu'à 14 TMS/ha/an et un taux de production d'azote très important, supérieur à 400 uN/an. Des études ont mis en évidence la possibilité d'utiliser la luzerne en méthanisation comme source d'autonomie en azote (E Triboi, 2010). Des essais menés sur 30 ans ont démontrés qu'une luzerne de 2 ans était en moyenne capable 891 uN dont 689 grâce à la biomasse aérienne et 202 uN grâce à l'effet rémanent sur les cultures suivantes, soit environ 445 uN/an mobilisables. Ces éléments font de la luzerne une culture à privilégier dans le cadre de la mise en œuvre d'un modèle « type autonome ». Néanmoins la luzerne nécessite pour son implantation des caractéristiques pédoclimatiques particulières et ne peut pas être cultivée partout dans des conditions optimales. Elle nécessite des sols calcaires et se développe peu dans les sols acides.

C'est pourquoi le choix d'évaluer également une autre culture a été envisagé dans ces travaux, notamment une association de légumineuse/céréale (vesces-triticales). Cette association est intéressante car elle permet de sécuriser le rendement de production dans les zones difficiles où notamment l'implantation de la luzerne est difficile ou impossible. Le triticales est un croisement entre le blé et le seigle, associant la productivité de l'un avec la rusticité et la résistance de l'autre. Le rendement moyen est d'environ 55 qt/ha en zone difficile, pouvant atteindre 95 à 100 qt/ha dans les zones céréalières traditionnelles. L'utilisation de la vesce au sein du mélange permettra d'apporter l'azote nécessaire au triticales associé. Dans des conditions favorables, nous pouvons prendre en compte un rendement pour le mélange d'environ 10 TMS/ha avec une production d'azote qui sera mobilisable d'environ 300 uN/an.

Le choix d'étudier ces deux cultures nous permet de mener une évaluation qui n'exclut pas à priori de zones géographiques. On pourra ainsi d'une part comparer les modèles d'évaluation entre eux selon leur nature (objectifs de rendement, fourniture du sol importante ou non) mais également selon l'opportunité de cultures dédiées pouvant être mise en place (luzerne ou vesce-triticales).

4.3.3. Estimations des surfaces nécessaires pour atteindre l'autonomie

La capacité de substitution d'engrais azotés par des unités fertilisantes issues de la méthanisation de légumineuses a été réalisée de la même manière que les bilans de fertilisation présentés dans le Tableau 4 avec la méthode CAU. On considère que l'ensemble des besoins sont assurés par les unités fertilisantes contenue dans le digestat, en prenant en compte un coefficient d'efficacité de l'azote du digestat de 75%.

Le Tableau 5 illustre la surface des différentes cultures que l'on pourrait fertiliser à partir de la culture dédiée de légumineuse. On constate par exemple qu'un hectare de luzerne pourrait fertiliser entre 3,5 et 6,1 hectares de maïs à 70 qt/ha selon les fournitures du sol. Une exploitation de 45 ha pourrait donc être autonome en azote en cultivant 10 ha de luzerne servant à fertiliser 35 ha de maïs. Le Tableau 5, met en évidence que plus les cultures requièrent un apport d'azote élevé, plus la surface dédiée à la culture de la légumineuse sera importante. La comparaison entre la luzerne et le mélange triticale-vesce est toujours en faveur de la luzerne, dans la mesure où elle permet d'apporter 20% d'unités fertilisantes en plus.

Tableau 5 : Surface des cultures pouvant être fertilisées par la culture d'une légumineuse

Rendements de cultures bas	uN/qt	Rdt (qt/ha)	Besoins uN Tot (uN)	Fourniture du sol (uN)	ha fertilisé par ha de luzerne	ha fertilisé par ha de vesce-triticale
Maïs	2,5	70	175	80-120	3,5 - 6,1	2,8 - 4,8
Colza	6,5	30	195	40-80	2,2 - 2,9	1,7 - 2,3
Blé	3	65	195	50-80	2,3 - 2,9	1,8 - 2,3
Orge	2,3	65	150	50-80	3,4 - 4,8	2,6 - 3,8

Rendements de cultures élevés	uN/qt	Rdt (qt/ha)	Besoins uN Tot (uN)	Fourniture du sol (uN)	ha fertilisé par ha de luzerne	ha fertilisé par ha de vesce-triticale
Maïs	2,5	110	275	80-120	1,7 - 2,2	1,3 - 1,7
Colza	6,5	45	293	40-80	1,3 - 1,6	1 - 1,2
Blé	3	80	240	50-80	1,8 - 2,1	1,4 - 1,6
Orge	2,3	80	184	50-80	2,5 - 3,2	2 - 2,5

Afin de réaliser une étude comparative de l'autonomie d'une exploitation, nous avons construit deux fermes type (modèle d'évaluation). La première ferme est une exploitation de 100 ha en système de monoculture de maïs. La seconde une exploitation de 100 ha en système colza-blé-orge, l'assolement des trois cultures étant réparti à parts égales (1/3 de la surface cultivée par culture). L'autonomie des exploitations a été évaluée selon les critères mentionnés précédemment (rendement, fourniture du sol et type de légumineuse).

Le Tableau 6 met en évidence les surfaces nécessaires pour qu'une exploitation atteigne l'autonomie en azote en dédiant une part de sa SAU à la culture de luzerne. Les systèmes à bas rendement, dans

les deux modèles d'évaluation, nécessitent toujours une surface de culture dédiée en luzerne inférieure aux systèmes à haut rendement. On constate que le modèle de monoculture de maïs nécessite moins de culture dédiée que son homologue à bas rendement en rotation colza blé orge, respectivement 14% contre 23%. En système à haut rendement, on constate l'effet inverse : 40% pour la monoculture de maïs contre 32% pour la rotation colza-blé-orge. Les systèmes avec des fournitures du sol importantes permettent de diminuer nettement le besoin de culture dédiée, de 4 à 10% selon les modèles d'évaluation.

Tableau 6 : Part de culture dédiée en luzerne pour l'autonomie en azote d'une exploitation de 100 ha

Rendements de cultures bas	Besoins de la culture (uN)	Fourniture du sol (uN)	Dose à apporter (uN)	Surface de l'exploitation (ha)	Dose totale à apporter pour l'exploitation (uN)	Part de culture dédiée en luzerne
Maïs	175	80-120	95-55	100	8 151 - 4 719	14%-24%
Colza	195	40-80	155-115	100	10 254 - 7 687	23%-30%
Blé	195	50-80	145-115			
Orge	150	50-80	99-70			

Rendements de cultures élevés	Besoins de la culture (uN)	Fourniture du sol (uN)	Dose à apporter (uN)	Surface de l'exploitation (ha)	Dose totale à apporter pour l'exploitation (uN)	Part de culture dédiée en luzerne
Maïs	275	80-120	195-155	100	13 260 - 10 540	40%-48%
Colza	293	40-80	253-213	100	13 067 - 10 801	32%-36%
Blé	240	50-80	190-160			
Orge	184	50-80	134-104			

La culture dédiée du mélange triticale-vesce, quant à elle, donne des résultats voisins de ceux de la luzerne ; toutefois les surfaces mobilisées sont plus importantes dans la mesure où le mélange produit moins d'azote que la luzerne (Annexe 18).

La valorisation de cultures dédiées de légumineuse en méthanisation dans l'objectif de cultiver son engrais est une voie possible pour diminuer la dépendance de l'exploitation au fertilisants azotés chimiques. L'évaluation montre que selon les configurations, l'autonomie est atteignable en dédiant une part plus ou moins importante de la surface pour la culture dédiée de légumineuses. Différentes configurations de cultures dédiées permettent d'envisager la production de légumineuse au sein des

exploitations et donc de tendre vers l'autonomie. Néanmoins les configurations des modèles d'évaluation étudiés ici ne se comportent pas de la même façon et mettent en évidence que les conditions pédoclimatiques et le choix de conduite d'exploitation seront déterminants dans la façon d'atteindre l'autonomie. Dans certaines configurations, les surfaces de cultures dédiées sont très importantes, pouvant remettre en question l'intérêt de la démarche. Par ailleurs il faut également prendre en compte les habitudes et les pratiques de fertilisation existantes : une exploitation ayant recours à une fertilisation importante avec des produits d'origine chimique sera plus réticente à la mise en place de cette démarche. En effet l'exploitation passera d'une logique de fertilisation chimique à une logique de fertilisation organique. A l'inverse, les exploitations ayant déjà recours à la fertilisation organique ou ayant des besoins en azote extérieurs moins importants auront plus de facilité à se projeter de cette démarche.

Il faut retenir de cette première approche que :

- La production d'azote grâce à la culture dédiée de légumineuse et la diminution de l'utilisation d'engrais azotés chimique sont possibles,
- L'autonomie d'une exploitation en azote est possible en dédiant une partie plus ou moins importante de sa surface à la culture de légumineuse,
- L'accès à l'autonomie est très dépendant de la conduite de l'exploitation et du contexte pédoclimatique,
- L'objectif de rendement est un élément déterminant dans la capacité d'une exploitation à atteindre l'autonomie,
- Toutes les exploitations n'appréhenderont pas la démarche avec le même intérêt.
-

4.4. Autonomie carburant

4.4.1. Les besoins en carburant d'une exploitation

Le principe d'autonomie développé dans ce chapitre sur l'aspect carburant consiste à substituer l'utilisation de fioul au sein des exploitations par du biométhane carburant qui serait produit grâce à la méthanisation de légumineuses. Dans ce schéma, l'agriculteur utilise une partie de sa surface agricole pour « cultiver » son carburant.

La surface de légumineuses nécessaire à la production de carburant va être dépendante d'une part du besoin en carburant de l'exploitation et d'autre part de la production de biogaz de la culture dédiée, elle-même dépendante des caractéristiques intrinsèques de l'exploitation (conditions pédoclimatiques, type de sol, rendement possible, etc...).

De la même manière que pour l'autonomie azote et selon les mêmes contraintes, l'autonomie possible d'une exploitation en carburant dépendra totalement des choix de conduite des cultures et des conditions locales dans lesquelles l'exploitation se trouve.

Dans l'évaluation nous avons déterminé les surfaces de légumineuses nécessaires pour atteindre l'autonomie en carburant en prenant en compte les cultures déjà retenues pour l'autonomie en azote (culture dédiée de luzerne et mélange triticale-vesce), et conservé les modèles d'évaluation (fermes standard).

Les consommations en carburant sont variables d'une exploitation à l'autre : la ferme type doit donc représenter une situation moyenne estimée ici à une consommation de 100 l/ha de fuel.

4.5. Comportement des modèles d'évaluation au sein d'un modèle « type autonome »

4.5.1. Définition du modèle « type autonome »

La définition du modèle « type autonome » repose sur les mêmes caractéristiques et le même mode de construction que les « modèles type » présentés au Chapitre 2. L'objectif est de créer un modèle d'unité de méthanisation autour de la notion d'autonomie, qui assure les mêmes objectifs que les modèles « type » présentés, et qui de plus permette à certaines exploitations d'atteindre l'autonomie, en partie ou en totalité.

Un certain nombre de caractéristiques sont identiques au modèle « type » d'injection réseau et transport de biométhane. D'autres sont spécifiques et liées à la mise en place de l'autonomie :

- la construction technique et le dimensionnement sont identiques à ceux des modèles types présentés,
- les intrants correspondent aux mix de biomasses identifiés comme viables au sein des modèles types,

- une partie de l'approvisionnement en coproduits ou en effluents d'élevage est remplacée par des légumineuses, dans la limite de ce que peuvent supporter les différents modèles type viables (coût de mobilisation de la biomasse, concentration en azote, etc...),
- le biométhane produit est valorisé en majorité par injection réseau via une logistique de camions rack transportant du biométhane. Une partie du biométhane est valorisée en biométhane carburant et vendue auprès des exploitations qui approvisionnent l'unité en légumineuses. L'exploitation peut s'approvisionner soit directement sur le site de méthanisation, soit auprès du camion rack qui effectue des tournées entre le poste d'injection et les exploitations cherchant l'autonomie,
- Le digestat issu des légumineuses est épandu aux frais de l'unité de méthanisation pour les apporteurs de légumineuses,
- Les coûts de production des légumineuses sont pris en charge par l'unité de méthanisation. L'exploitation met à disposition une surface de culture dédiée auprès de l'unité qui s'occupe de l'implantation et de la récolte.

4.5.2. Paramètres de l'évaluation

Afin d'évaluer l'impact de l'autonomie pour une exploitation intégrant un modèle « type autonome », nous avons cherché à caractériser la performance économique liée à cette démarche, en projetant l'évolution de la marge brute dégagée par différents modèles de fermes. Cette évolution de la marge brute a été évaluée à travers la recherche de différents degrés d'autonomie d'une part, et grâce à la comparaison de ces modèles avec différents scénarios de références de prix, d'autre part.

L'évaluation est dépendante de paramètres qui introduisent beaucoup de variabilité dans les résultats. Ces paramètres sont eux-mêmes dépendants d'un contexte local précis et sont capables de varier fortement d'une année à l'autre. Pour s'en affranchir on se réfère à des modèles moyens d'évaluation.

Marge brute : La marge brute est le principal indicateur économique évalué ici. Elle est calculée à partir du chiffre d'affaire de l'exploitation diminuée de l'ensemble des charges liées à la mise en culture. Elle est calculée hors aide PAC et est exprimée en €/ha.

Rendements des cultures : On se réfère aux deux types d'exploitation de 100 ha présentés précédemment (monoculture de maïs et rotation colza-blé-orge). On choisit pour chacune de ces exploitations de modéliser des configurations opposées, c'est à dire dans les deux cas, des fermes caractérisées soit par un rendement de grain élevé et une fourniture du sol en azote faible, soit par un rendement faible et une fourniture en azote du sol importante. Le rendement des cultures est exprimé en qt/ha.

Coûts des cultures : Le prix des cultures a été déterminé à partir de coûts moyens. Il prend en compte l'ensemble des coûts de production hors main d'œuvre et récolte. Il est exprimé en €/ha.

Prix carburant : Le prix du carburant a été déterminé à partir des bases de données INSEE ; les données utilisées sont sur une période de 15 ans (1998-2012). Il est exprimé en €/l.

Prix azote : Le prix de l'azote a été déterminé à partir des bases de données INSEE ; les données utilisées sont sur une période de 15 ans (1998-2012). Il est exprimé en €/uN.

Prix de vente du grain : Le prix de vente du grain a été déterminé à partir des bases de données INSEE ; les données utilisées sont sur une période de 15 ans (1998-2012). Il est exprimé en €/T.

Scénario référence fossile : Le scénario référence fossile correspond à l'évaluation sur une base de prix, grain, azote et carburant pour l'année 2012.

Scénario dégradé : Le scénario dégradé correspond à une évolution haussière des prix de l'azote et du carburant par rapport au scénario fossile de référence (150%).

Degré d'autonomie : Le degré d'autonomie correspond à la part d'autonomie, azote ou carburant, qui est atteinte en fonction de la part de surface de cultures dédiées aux légumineuses.

Dépendance au prix du grain : La dépendance au prix du grain correspond à l'analyse de l'évolution de la marge brute selon l'évolution du prix du grain. L'ensemble des paramètres de l'évaluation sont renseignés en Annexe 17.

4.6. Evaluation du modèle monoculture de maïs

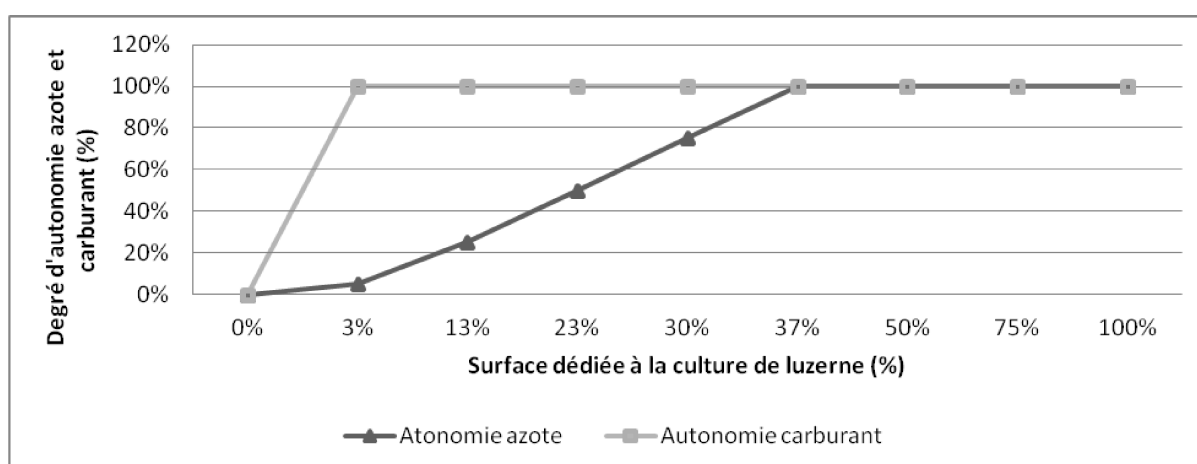
4.6.1. Configuration d'une ferme avec un rendement grain élevé et fourniture du sol faible

Degré d'autonomie :

La configuration de ferme étudiée ici, visant à atteindre un rendement de production de grain élevé tout en bénéficiant d'une faible fourniture d'azote de la part du sol présente les caractéristiques les plus contraignantes pour atteindre l'autonomie, en particulier au niveau de l'autonomie azote.

La Figure 45 met en évidence que l'autonomie azote est la plus contraignante et peut être atteinte en mobilisant 37% de sa surface totale de culture à la production de luzerne. L'autonomie carburant, plus facilement atteignable, nécessite la mise en place de cultures dédiées à hauteur de 3% de la surface totale.

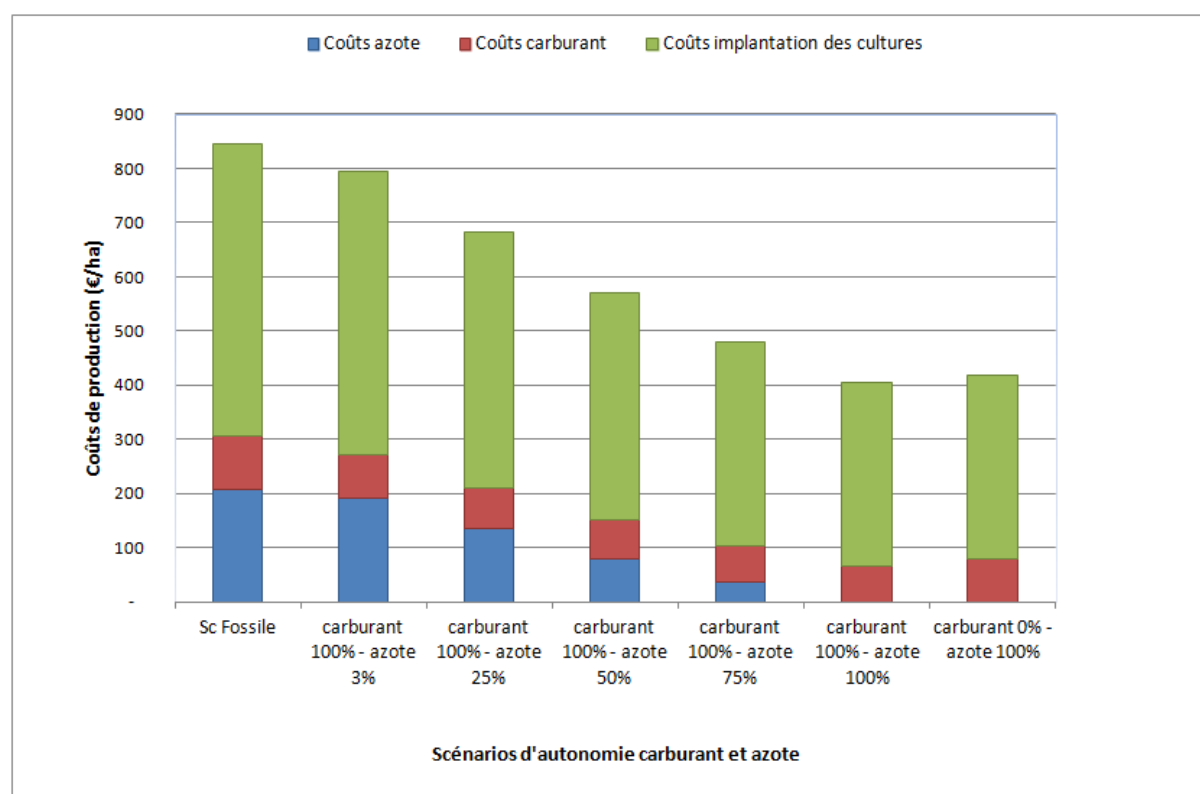
Figure 45 : Surface de culture dédiée nécessaire pour l'autonomie azote et carburant



Performance technico-économique :

La Figure 46 met en avant la répartition de la diminution des coûts de production, d'autant plus importante que le degré d'autonomie est élevé. Les coûts de production passent de 845 €/ha à 420 €/ha. Le principal poste impacté est celui du coût en azote, suivi des coûts d'implantation. Le poste carburant est le moins impacté dans la mesure où le niveau de prix actuel et celui proposé par la substitution du fioul en biométhane est proche.

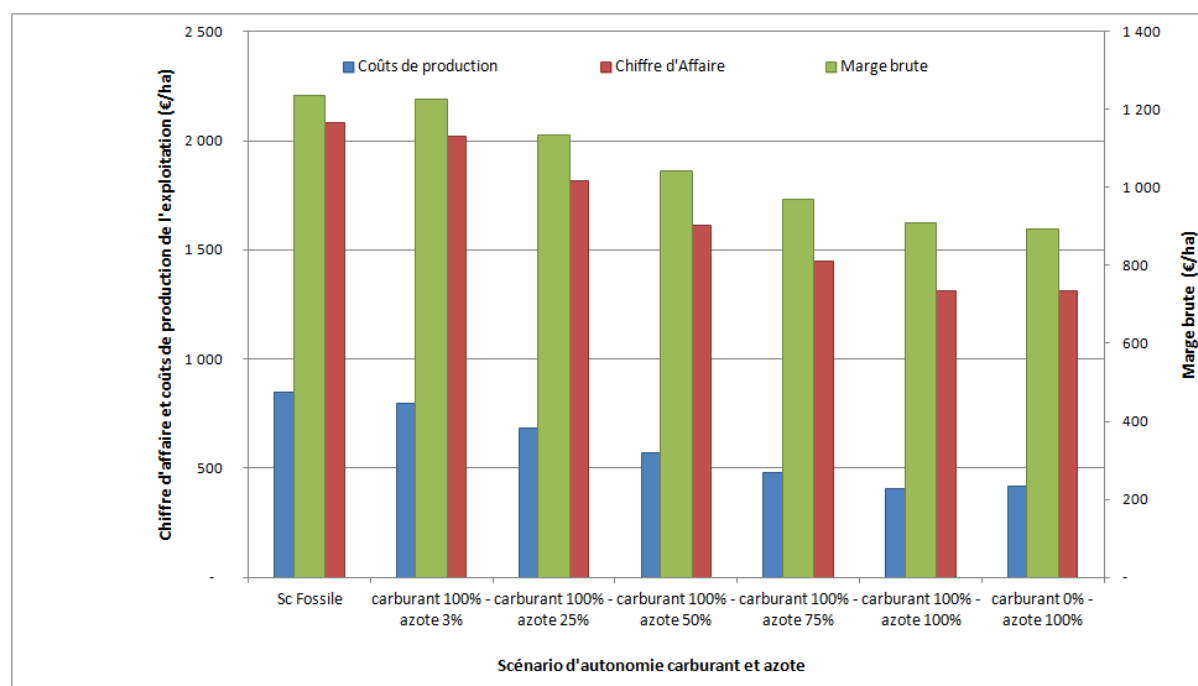
Figure 46 : Coûts de production de l'exploitation selon le scénario d'autonomie



L'analyse comparative de la marge brute dégagée par l'exploitation selon le degré d'autonomie recherché (Figure 47), met en évidence que le scénario de référence « fossile », sans autonomie, est le plus performant (1 237 €/ha). L'ensemble des scénarios d'autonomie présentent une marge brute d'autant plus faible que l'autonomie est importante, passant de 1 227 €/ha à 994 €/ha.

La Figure 47 montre une diminution du chiffre d'affaires et des coûts de production proportionnels au degré d'autonomie recherché. La diminution du chiffre d'affaires étant plus importante que la diminution des coûts de production, la marge brute dégagée par les scénarios autonomes est plus faible que dans le scénario « fossile » de référence.

Figure 47 : Evaluation de la performance économique de l'exploitation selon le degré d'autonomie choisi

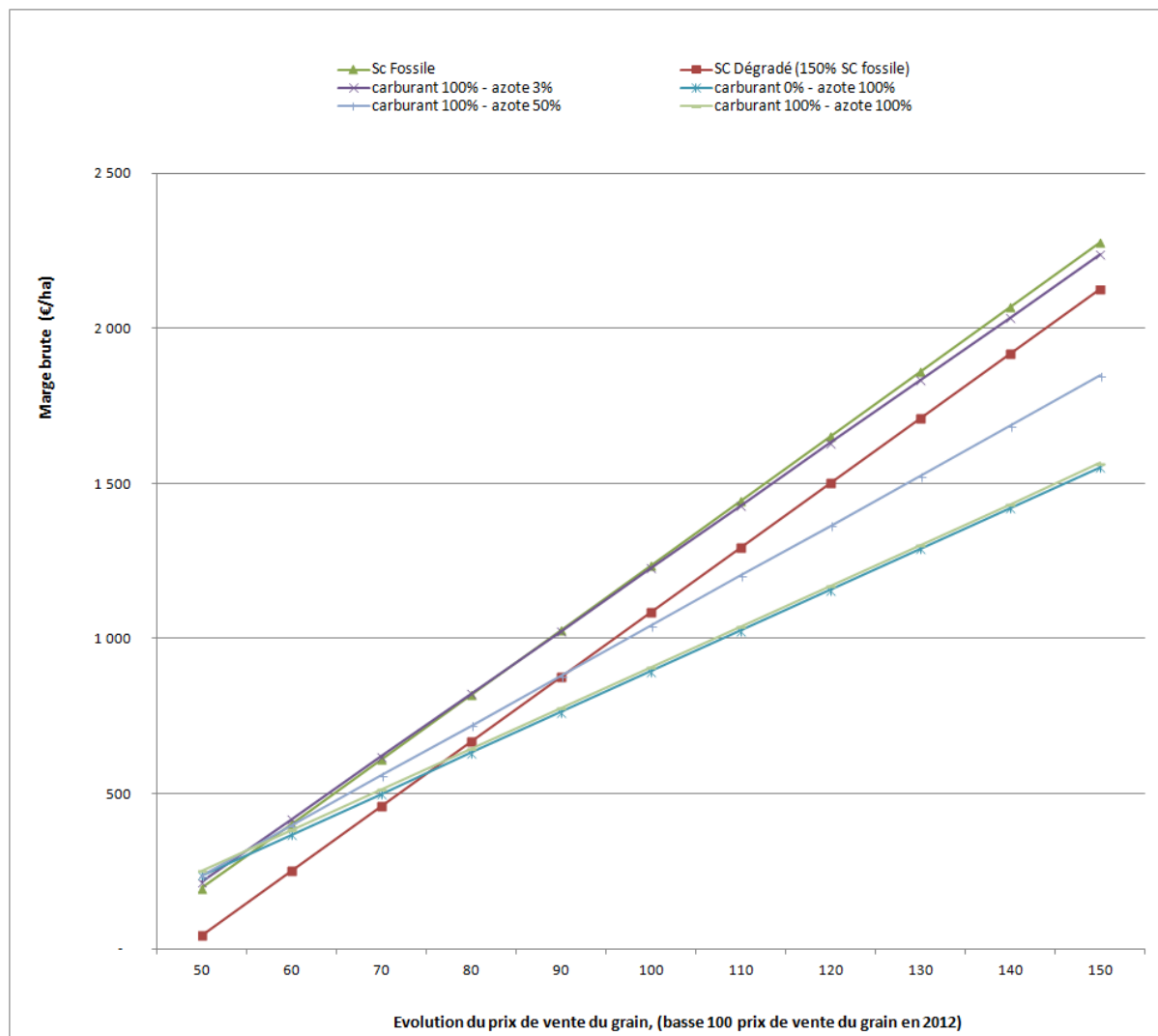


Dépendance au prix du grain:

La marge brute dégagée par les différents systèmes est principalement impactée par le chiffre d'affaires dégagé par la vente du grain, les coûts de production, de carburant et d'azote étant d'une influence moindre.

La Figure 48 met en évidence que les modèles autonomes à des prix d'énergie fossile et azote actuels dégagent moins de marge brute quel que soit le prix du grain. Dans le cas d'un scénario où le prix des énergies et de l'azote seraient supérieurs (150% par rapport à 2012), les scénarios d'autonomie dégagent des marges brutes supérieures au scénario fossile pour des prix de grain inférieurs aux prix actuels (70%). Lorsque les prix de grains sont supérieurs, le scénario fossile dégage systématiquement des marges brutes supérieures.

Figure 48 : Comparaison de la marge brute de différents scénarios d'autonomie selon l'évolution du prix du grain



Analyse prospective :

Les résultats précédents sont confirmés par l'analyse de la Figure 49. En effet, le profil des courbes de marges brutes suivent l'évolution du prix du grain (Annexe 17) et mettent en avant que les scénarios d'autonomie dans cette configuration de ferme sont plus performants uniquement lorsque le prix de vente du grain est faible.

Néanmoins, la marge brute moyenne dégagée sur la période de 15 ans, même si elle reste favorable au scénario « fossile » de référence apparaît acceptable pour les scénarios d'autonomie (Figure 50).

Figure 49 : Evolution de la marge brute des différents scénarios d'autonomie sur une base de prix constatés (période 1998 - 2012)

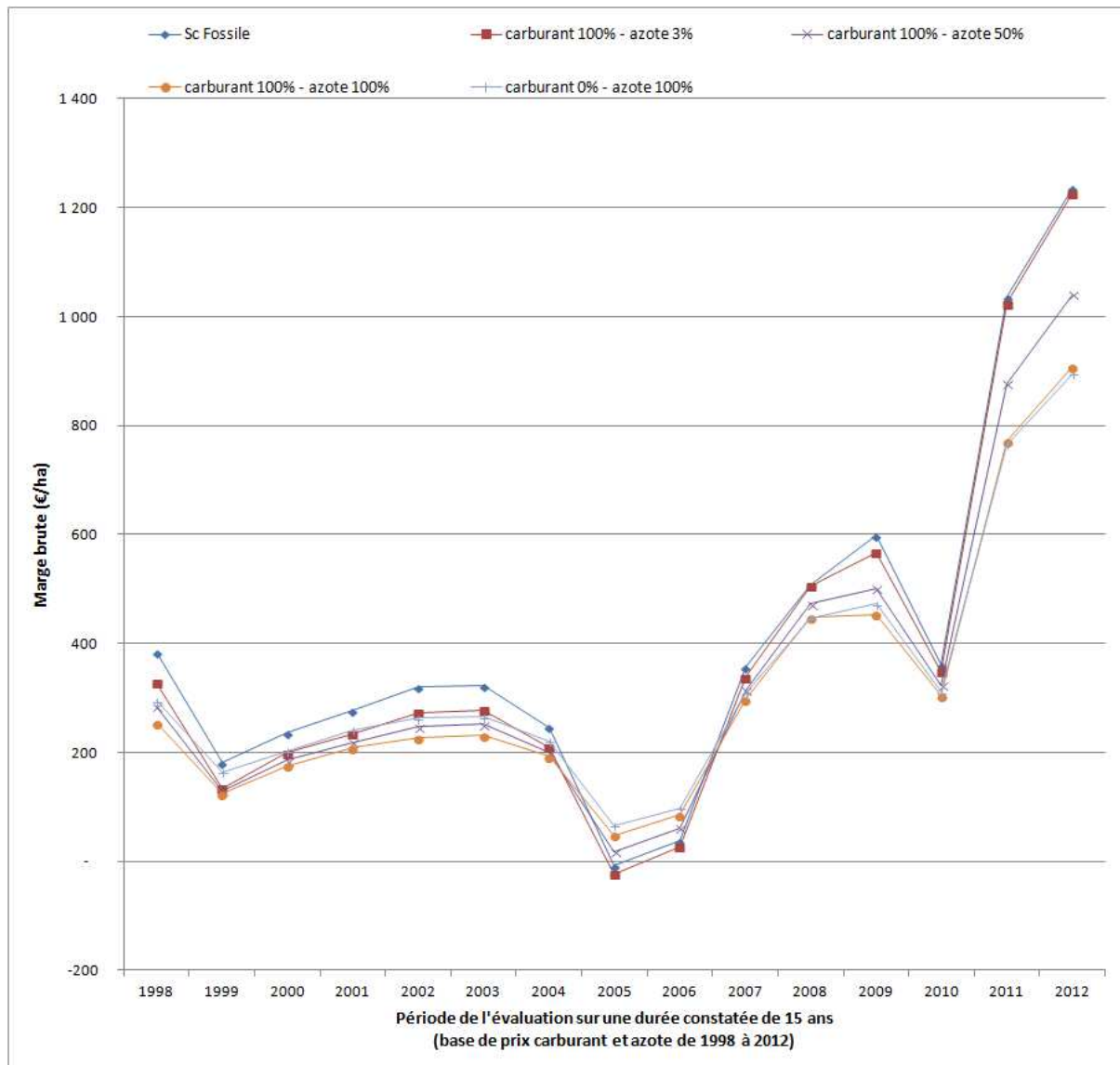
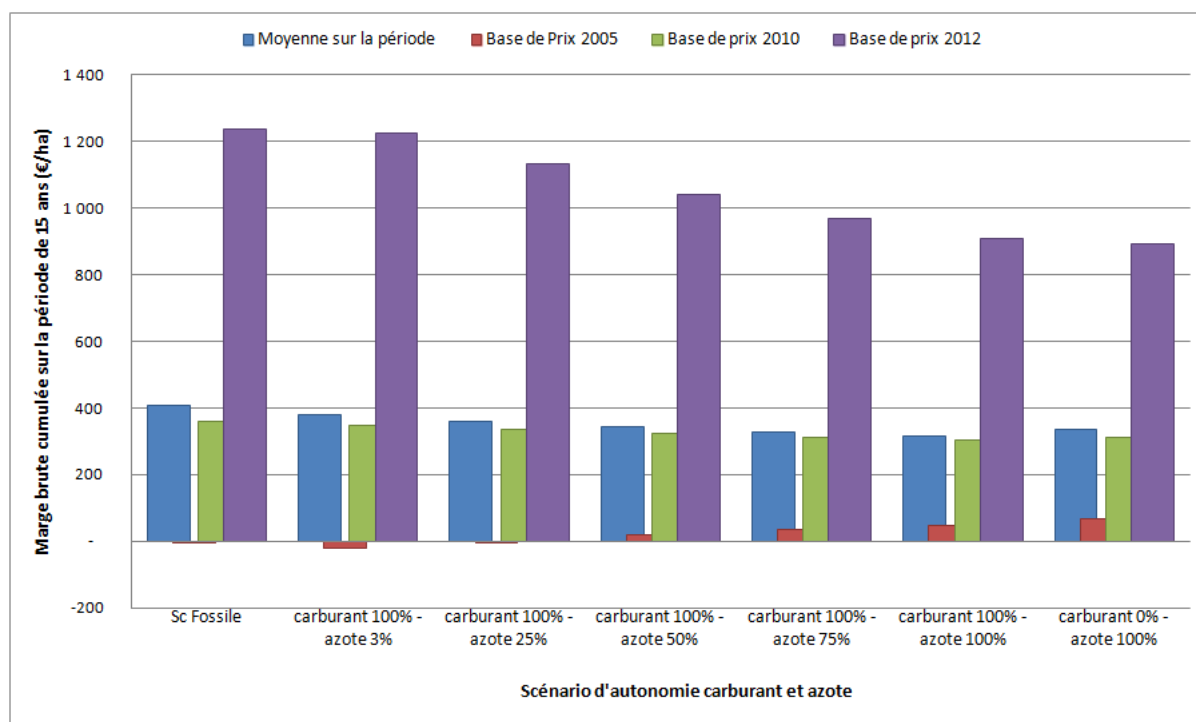


Figure 50 : Marge brute moyenne sur 15 ans des différents scénarios d'autonomie sur une base de prix constatés (1998 - 2012)

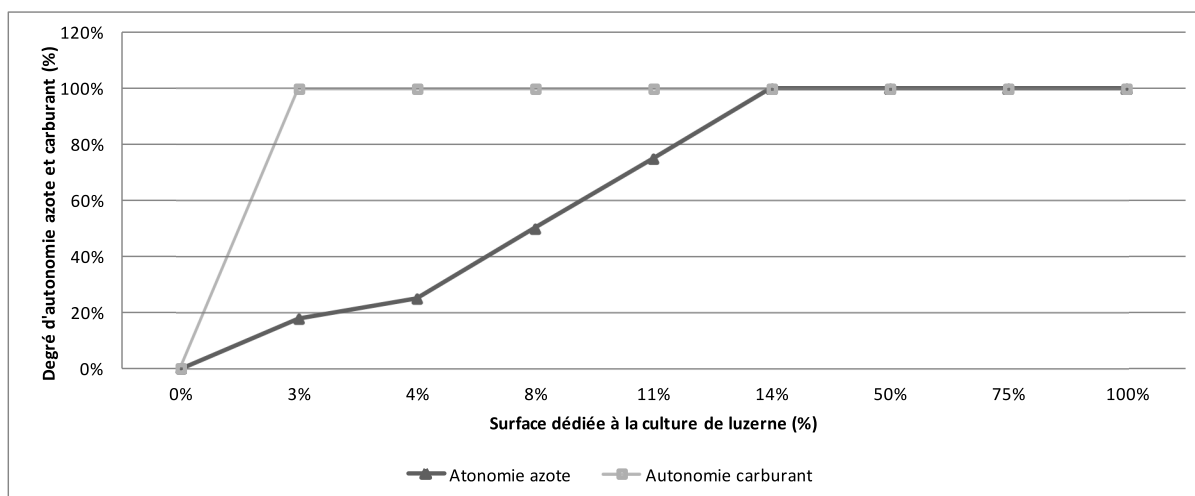


4.6.2. Configuration d'une ferme avec un rendement grain faible et une fourniture du sol élevée

La configuration de ferme étudiée ici, profitant d'une fourniture en azote du sol importante tout en ayant un rendement de grain peu élevé, présente les caractéristiques les plus favorables à l'autonomie, en particulier à l'autonomie en azote.

Comme le montre la Figure 51, l'autonomie en azote est la plus difficile à atteindre que l'autonomie carburant. Il faut dédier respectivement 14% et 3% de la surface pour atteindre l'autonomie. Ces valeurs apparaissent plus accessibles aux exploitations à bas rendements qu'à celles présentant des rendements agricoles élevés.

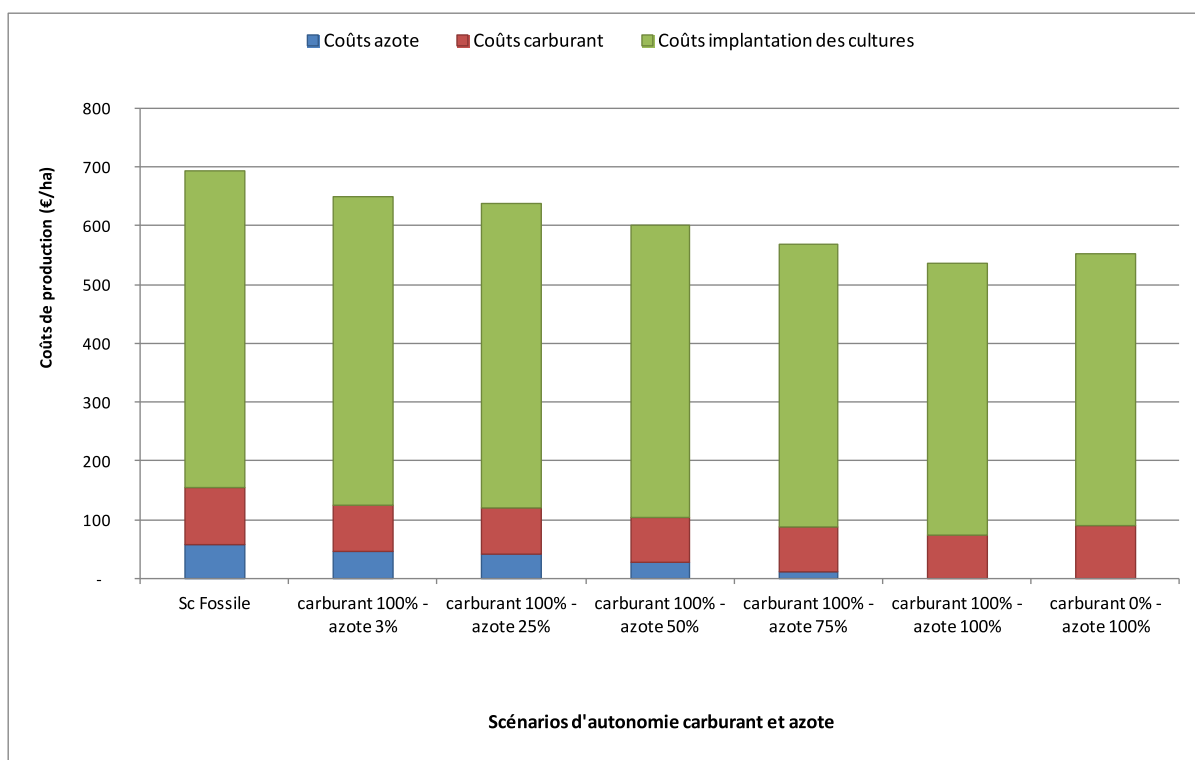
Figure 51 : Surface de culture dédiée nécessaire pour l'autonomie en azote et en carburant



Performance technico-économique :

La Figure 52 montre la répartition des coûts de production ; la diminution des coûts est d'autant plus importante que le degré d'autonomie est élevé. Les coûts de production passent de 695 €/ha à 553 €/ha.

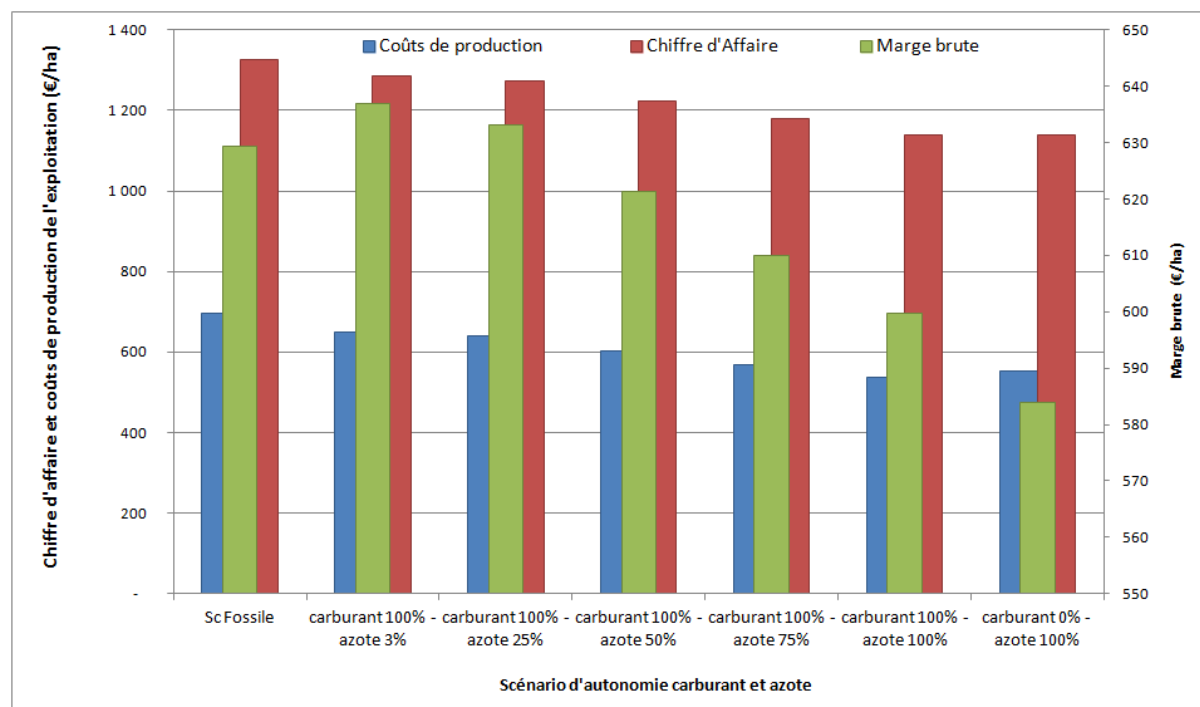
Figure 52 : Coûts de production des cultures selon le scénario d'autonomie



L'analyse comparative de la marge brute dégagée par l'exploitation selon le degré d'autonomie recherché (Figure 53), met en évidence que le scénario de référence « fossile », sans autonomie, n'est pas toujours le plus performant. En effet, les deux premiers scénarios d'autonomie (autonomie 100 % carburant-3% azote, et autonomie 100% carburant-25% azote) dégagent une marge brute plus importante : respectivement 637 €/ha et 633 €/ha pour les scénarios autonomes et 629 €/ha pour le scénario fossile. L'ensemble des scénarios étudiés se situent dans une fourchette de marge brute assez proche, entre 584 €/ha et 637 €/ha.

Dans cette configuration, la diminution du chiffre d'affaires du grain liée à la mise en place de cultures dédiées est moins pénalisante (1325 €/ha pour le plus performant et 1137 €/ha pour le moins performant). La diminution des coûts de production liée à la mise ne place de l'autonomie est plus importante que la baisse de chiffre d'affaires rendant les modèles autonomes plus performants.

Figure 53 : Evaluation de la performance économique de l'exploitation selon le degré d'autonomie choisi



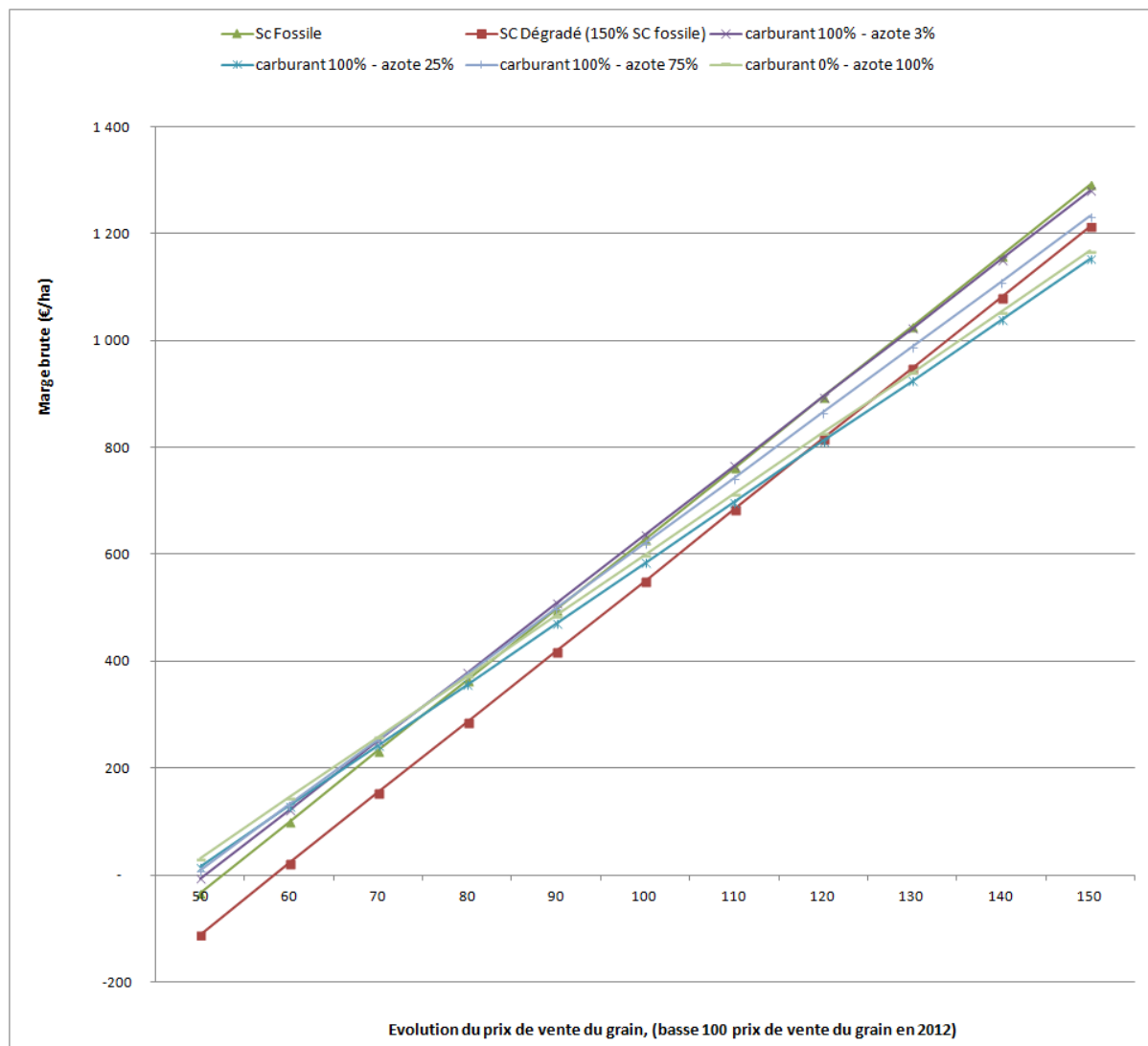
Dépendance au prix du grain:

Dans cette configuration, étant donné que le chiffre d'affaires des modèles, autonomes ou non, reste très proche, les seuils d'intérêt vont être impactés autant par l'évolution du prix du grain que par les économies associées à la mise en place de l'autonomie. La comparaison des modèles met en avant que selon les hypothèses de prix du grain, les économies engendrées par la mise en place de système autonome permettent de dégager une marge brute supérieure à celle d'un modèle de référence « fossile » (Figure 54).

Lorsqu'on compare le scénario de référence avec les modèles autonomes, on constate que pour un prix de grain inférieur à un indice 80, les systèmes autonomes dégagent une marge brute supérieure. Au delà, le système fossile redevient de plus en plus compétitif, jusqu'à une valeur d'indice de prix de grain de 120, où il devient le plus performant.

La comparaison de ces scénarios d'autonomie avec un scénario dégradé (sc dégradé, Figure 54) met en avant que l'ensemble des scénarios autonomes dégagent une marge brute supérieure jusqu'à un indice de prix de grain de 110. Au-delà, seuls certains scénarios d'autonomie sont capables d'être plus performants que le scénario « fossile » de référence.

Figure 54 : Comparaison de la marge brute des différents scénarios d'autonomie selon l'évolution du prix du grain



Analyse prospective :

Les résultats précédents sont confirmés par l'analyse de la Figure 55. Le profil des courbes, même s'il suit l'évolution du prix du grain est toujours favorable aux systèmes autonomes.

La Figure 56 montre que les marges brutes moyennes dégagées sur la période de 15 ans sont très proches quel que soit le scénario (de 72 €/ha à 108 €/ha), et que les valeurs les plus importantes sont atteintes pour les scénarios d'autonomie.

Figure 55 : Evolution de la marge brute des différents scénarios d'autonomie sur une base de prix constatés (période 1998 - 2012)

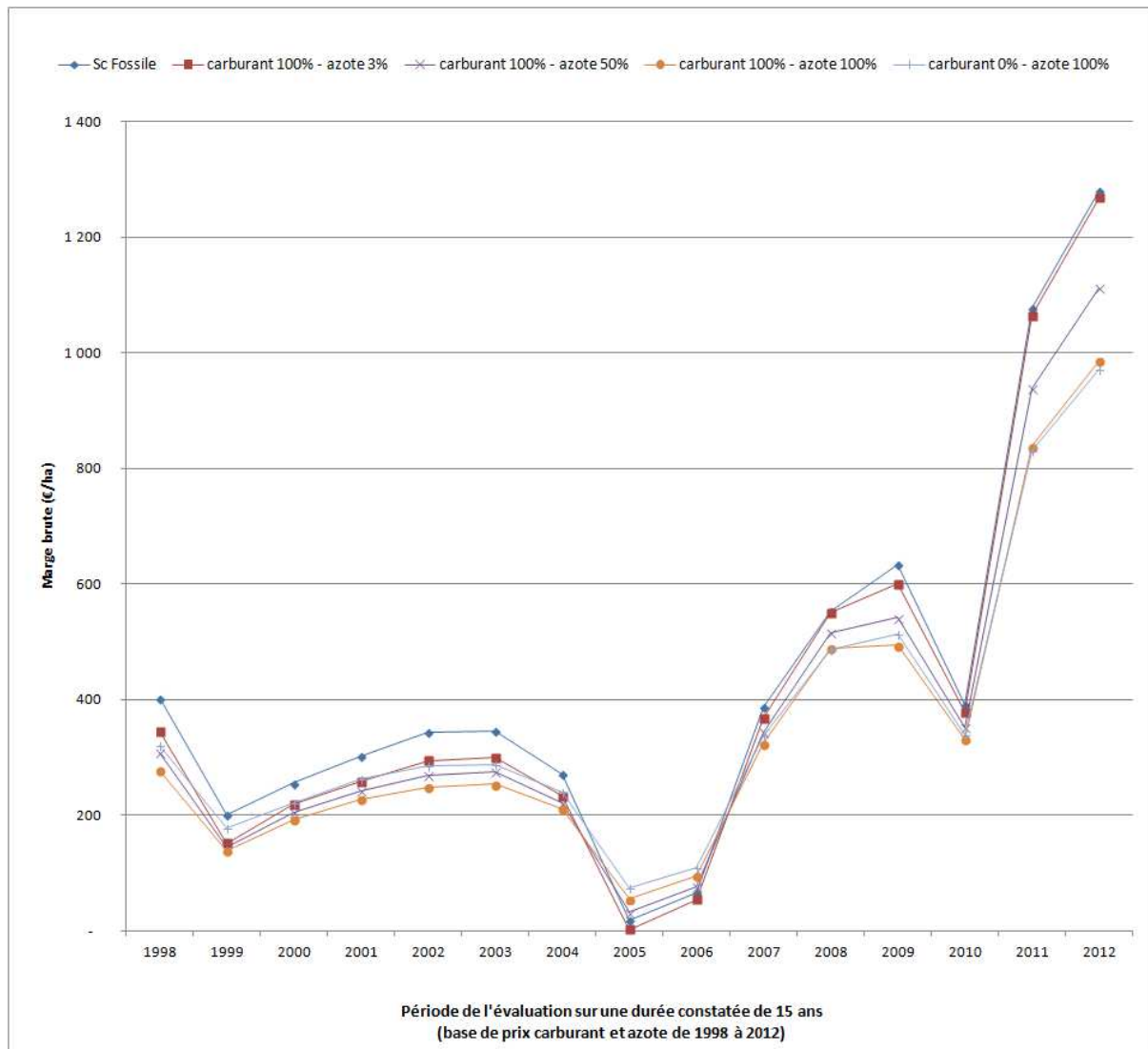
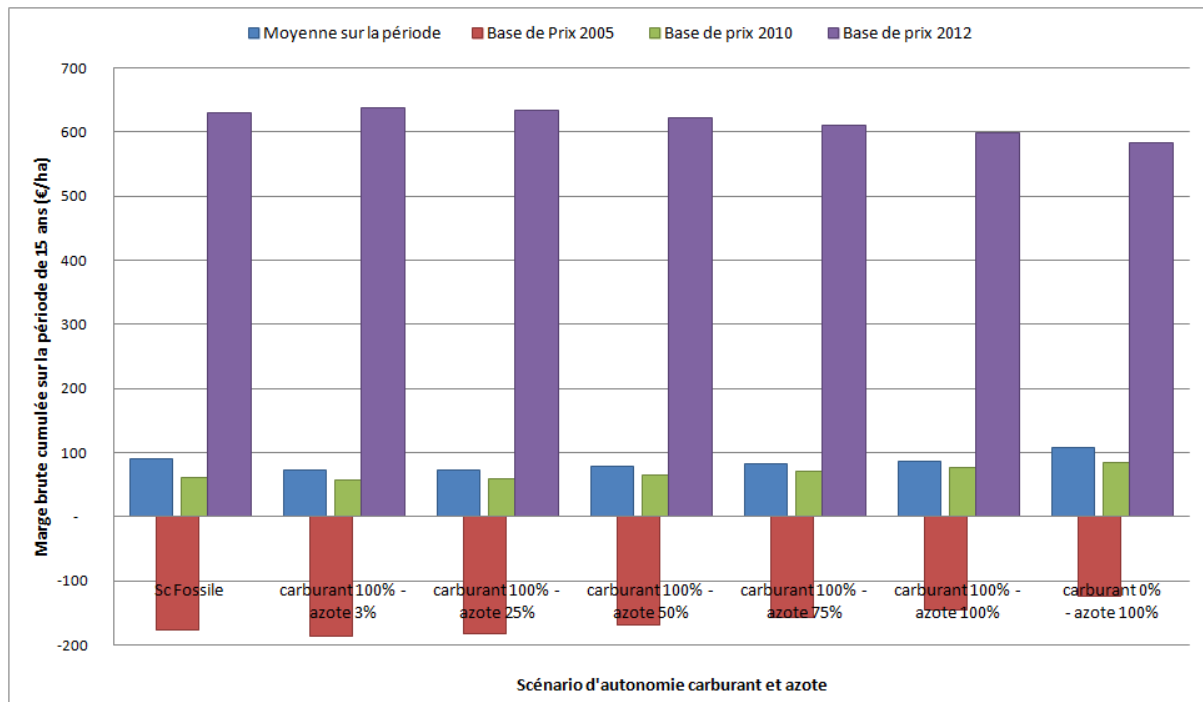


Figure 56 : Marge brute moyenne sur 15 ans pour les différents scénarios d'autonomie sur une base de prix constatés (1998 - 2012)



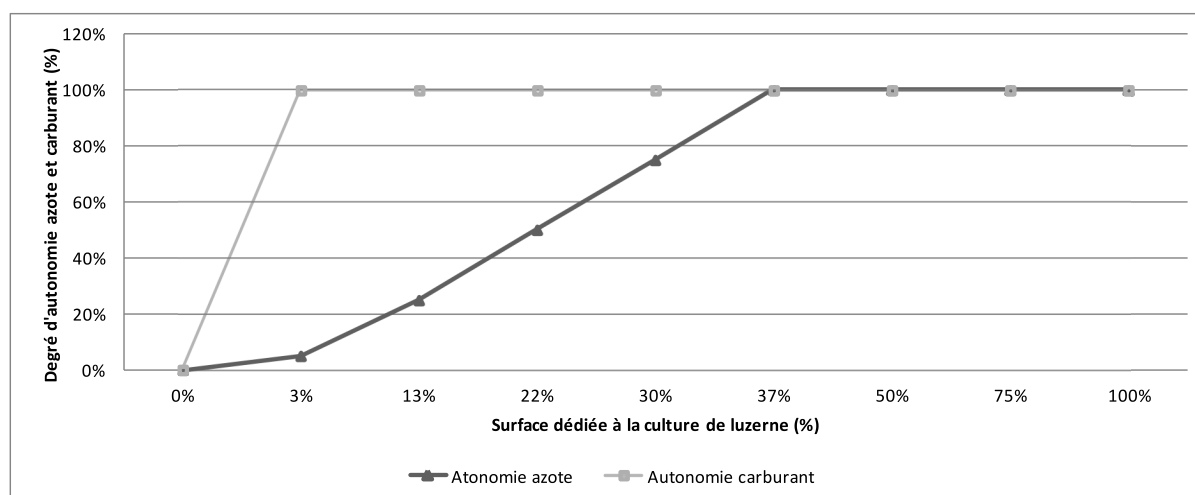
4.7. Evaluation du modèle avec rotation colza-blé-orge

4.7.1. Configuration d'une ferme avec un rendement de grain élevé et une fourniture du sol faible

Le modèle de ferme étudié ici présente les mêmes contraintes que celui du modèle de monoculture de maïs étudié dans la même configuration. Il s'agit de la configuration la plus contraignante pour atteindre l'autonomie.

L'autonomie en carburant est atteinte selon les mêmes proportions que le modèle de ferme de monoculture du maïs (3% de la surface totale). L'autonomie en azote est également identique en proportion : elle nécessite la mise en culture de 37% de la surface totale pour atteindre l'autonomie (Figure 57). La similitude des résultats pour la partie carburant est normale dans la mesure où les hypothèses de consommation de carburant sont liées à la surface et identiques d'un modèle à l'autre. A contrario, les résultats pour l'autonomie en azote sont issus d'une coïncidence, dans la mesure où les hypothèses de besoin d'azote sont variables d'une culture à l'autre. Il faut 19 260 kgN dans cette configuration de modèle pour une rotation colza-blé-orge contre 19 250 kgN pour celle du maïs.

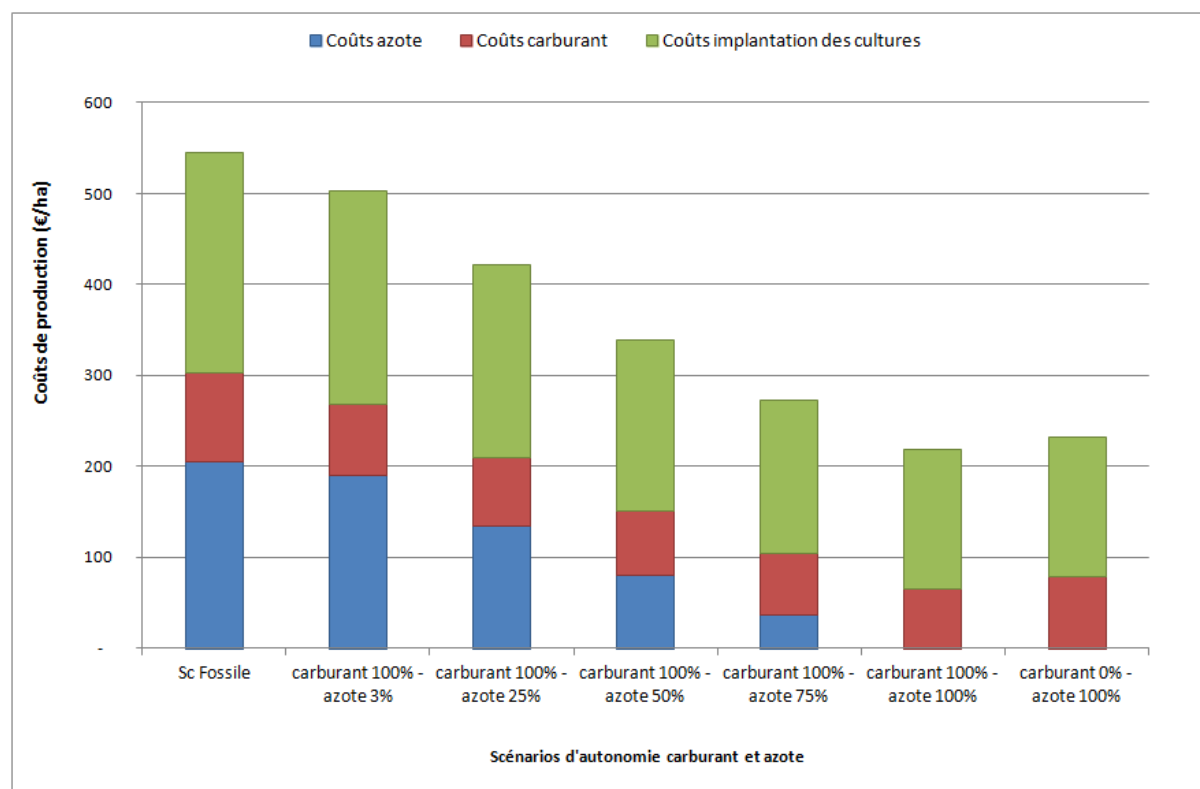
Figure 57 : Surface de culture dédiée nécessaire pour l'autonomie en azote et en carburant



Performance technico-économique :

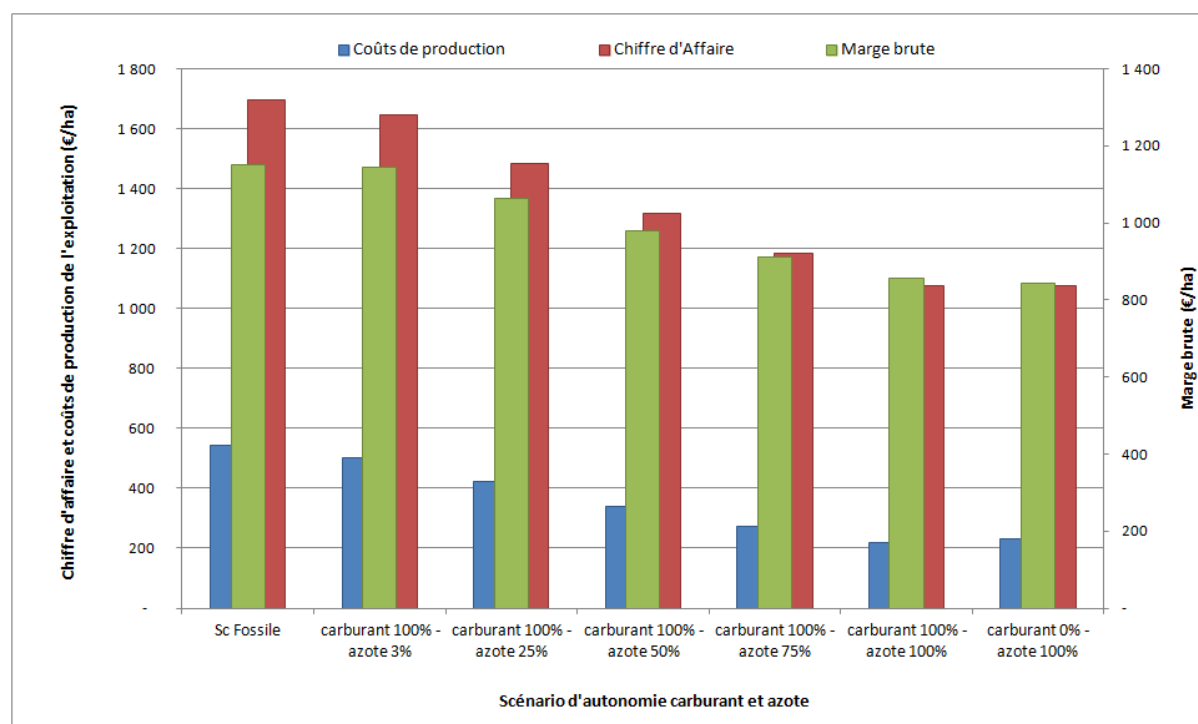
La Figure 58 met en avant que la diminution des coûts de production est d'autant plus importante que le degré d'autonomie est élevé. Les coûts de production passent de 544€/ha à 233€/ha.

Figure 58 : Coûts de production des cultures selon le scénario d'autonomie



La Figure 59 nous permet de comparer les marges brutes selon le degré d'autonomie de l'exploitation. Ainsi, on constate que le scénario de référence « fossile », sans autonomie, est le plus performant (1 152 €/ha). L'ensemble des scénarios d'autonomie présente une marge brute d'autant plus faible que l'autonomie est importante, passant de 1 145 €/ha à 844 €/ha. Cette figure montre également une diminution du chiffre d'affaires et des coûts de production proportionnels au degré d'autonomie recherché. La diminution du chiffre d'affaires étant plus significative que la diminution des coûts de production, la marge brute dégagée par les scénarios autonomes est plus faible que dans le scénario « fossile » de référence.

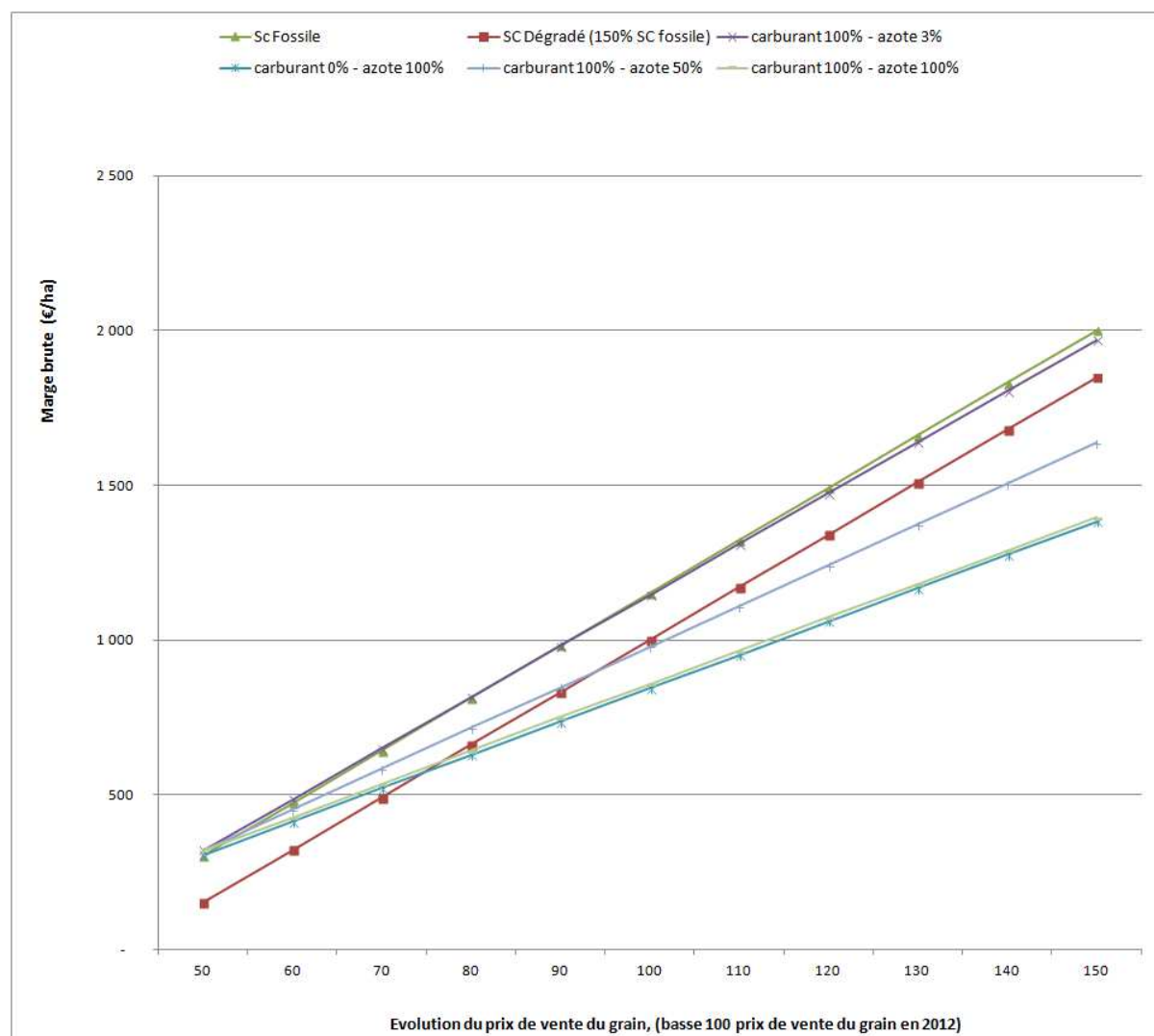
Figure 59 : Evaluation de la performance économique de l'exploitation selon le degré d'autonomie choisi



Dépendance au prix du grain :

La Figure 60 met en évidence que les modèles autonomes à des prix d'énergie fossile et d'azote actuels dégagent moins de marge brute quel que soit le prix du grain. Dans le cas d'un scénario où les prix des énergies et de l'azote seraient supérieurs (150% des prix 2012), les scénarios d'autonomie dégagent des marges brutes supérieures au scénario fossile pour des prix de grain inférieurs aux prix actuels, base de prix 80. Lorsque les prix de grain sont supérieurs, le scénario fossile dégage des marges brutes supérieures face aux scénarios autonomes ayant plus de 50% d'autonomie azote. Seul le scénario avec l'autonomie carburant 100% et azote 3% dégagent une marge brute supérieure quel que soit le prix du grain.

Figure 60 : Comparaison de la marge brute des différents scénarios d'autonomie selon l'évolution du prix du grain



Analyse prospective :

Les résultats précédents sont confirmés par l'analyse de la Figure 61. En effet, le profil des courbes de marges brutes suit bien l'évolution du prix du grain (Annexe 17) et met en avant que le scénario fossile en dégage une marge brute toujours supérieure à celles des scénarios d'autonomie quelle que soit l'évolution des prix sur la période de 15 ans.

Néanmoins, la marge brute moyenne dégagée sur la période de 15 ans, même si elle reste favorable au scénario « fossile » de référence est encore acceptable pour les scénarios d'autonomie. Elle s'établit en effet entre 844 €/ha et 1152 €/ha (Figure 62).

Figure 61 : Evolution de la marge brute des différents scénarios d'autonomie sur une base de prix constatés (période 1998 - 2012)

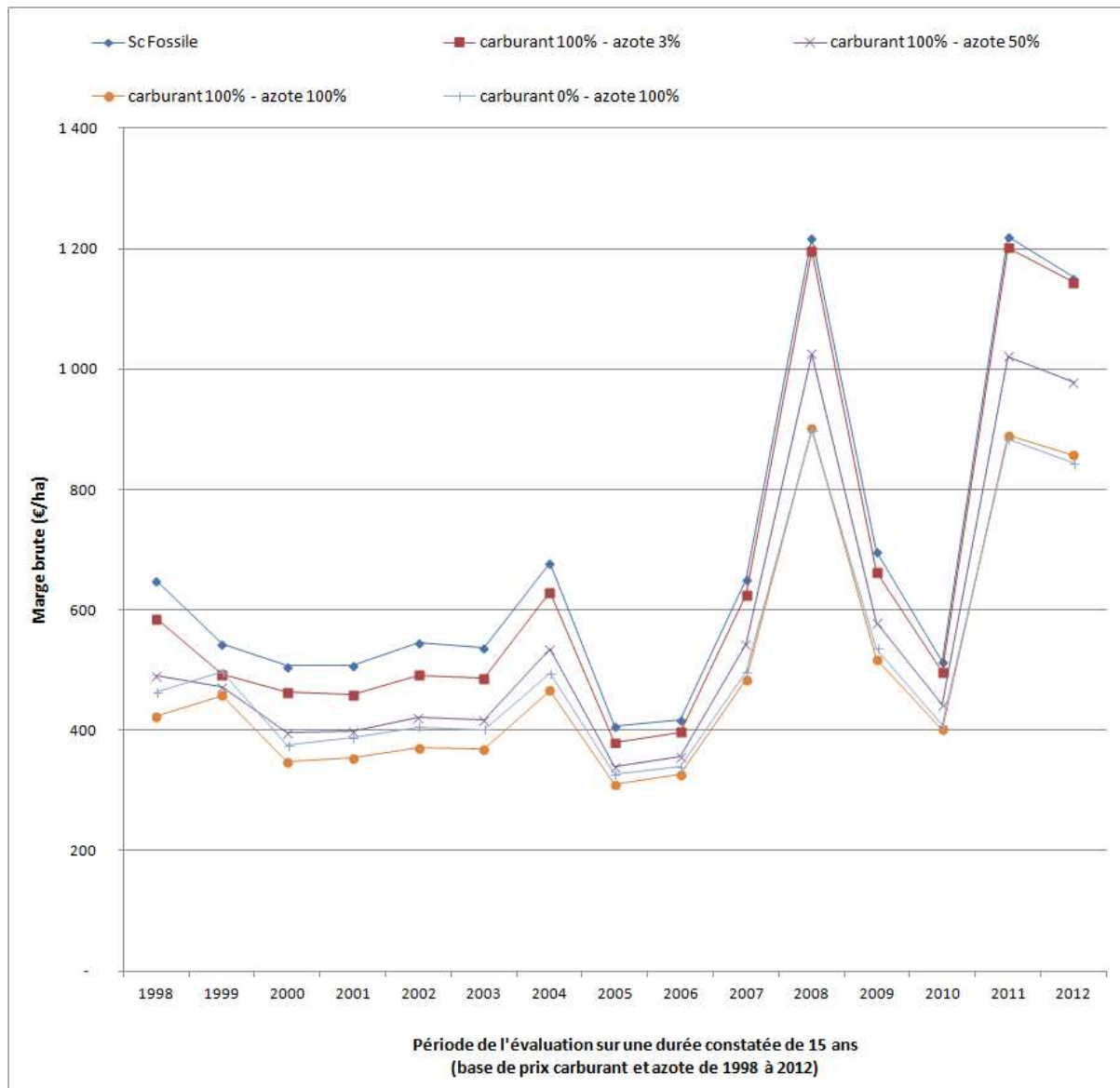
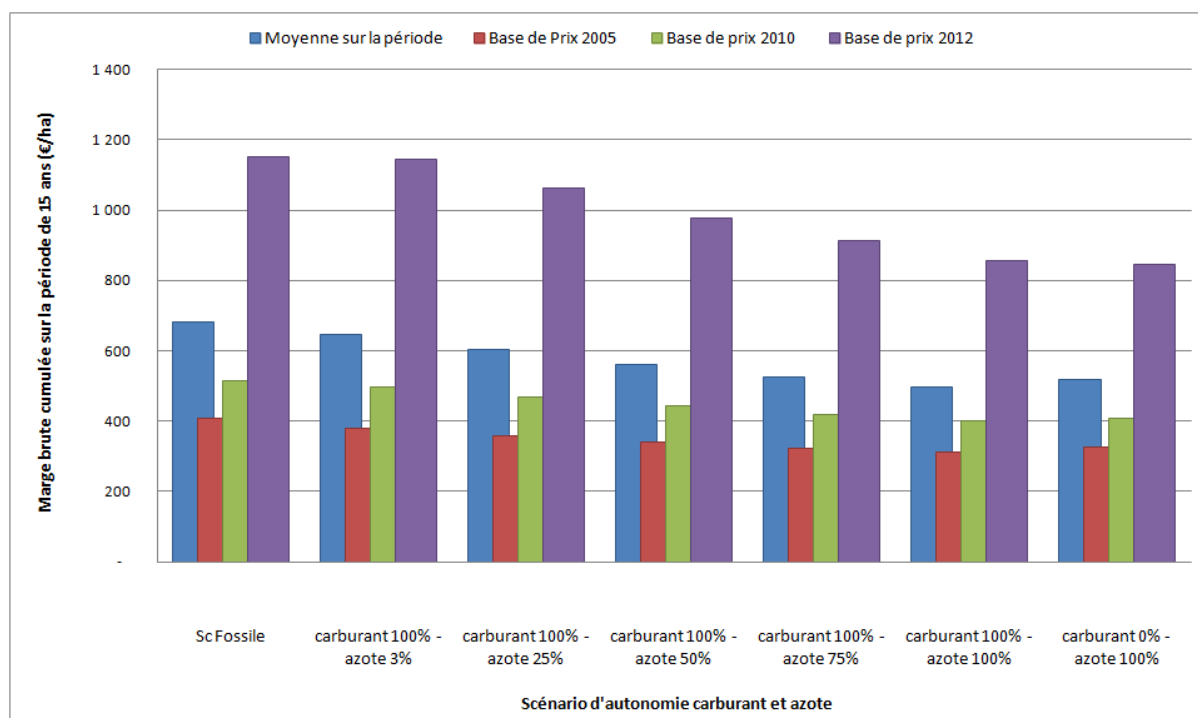


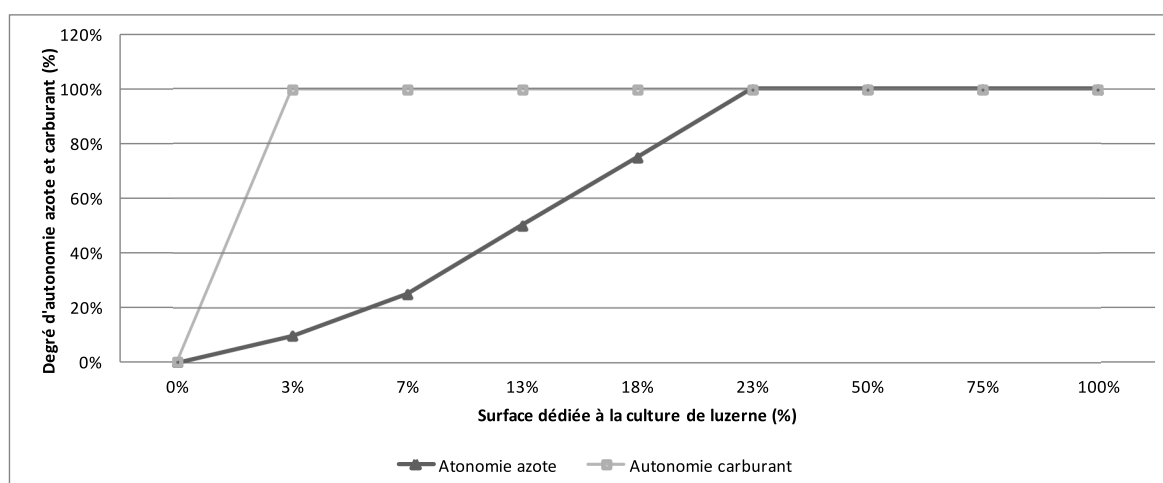
Figure 62 : Marge brute moyenne sur 15 ans dans les différents scénarios d'autonomie sur une base de prix constatés (1998 - 2012)



4.7.2. Configuration d'une ferme avec un rendement en grain faible et une fourniture du sol élevée

La Figure 63 met en évidence que l'autonomie en azote peut être atteinte en dédiant 23% de sa surface totale de culture à la production de luzerne. L'autonomie en carburant, comme dans les autres modèles, nécessite une surface de cultures dédiées à hauteur de 3% de la surface totale.

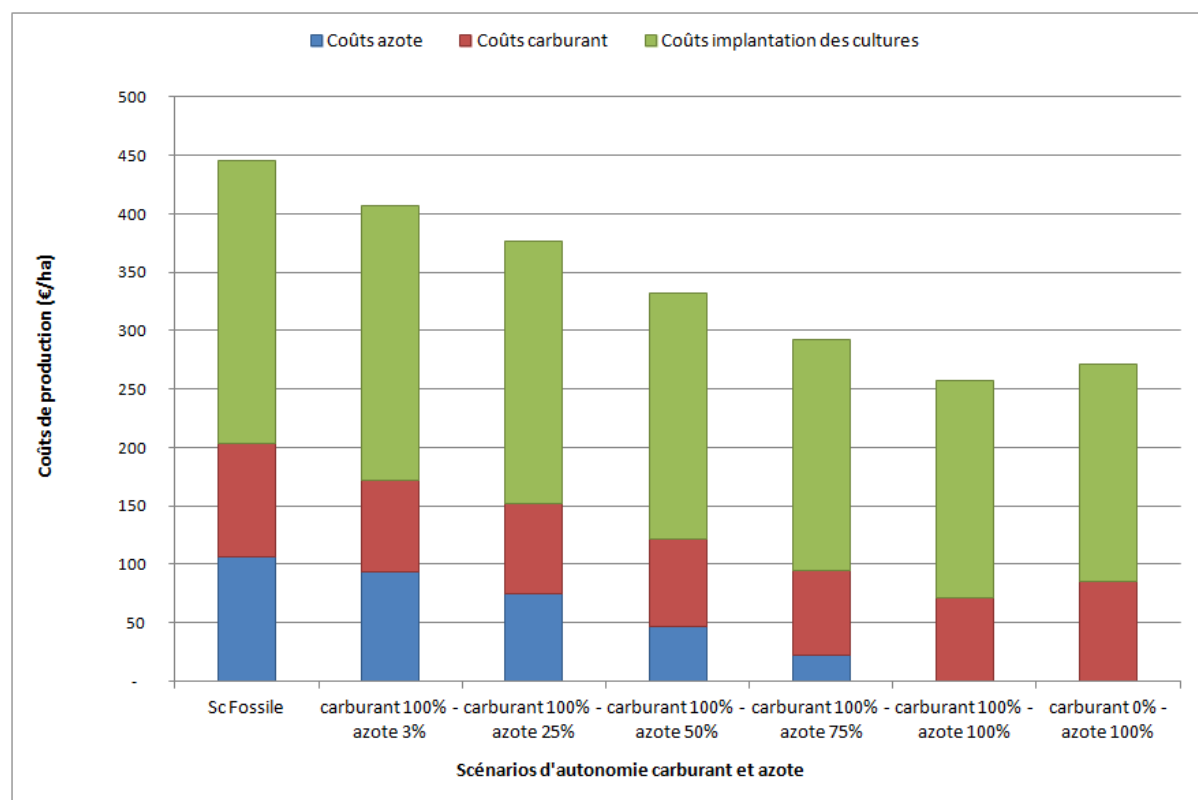
Figure 63 : Surface de culture dédiée nécessaire pour l'autonomie en azote et en carburant



Performance technico-économique :

Les coûts de production sont également plus faibles (272 à 446 €/ha) que dans le modèle de référence ; le coût le plus bas étant atteint pour le cas 100% azote-100% carburant (Figure 64).

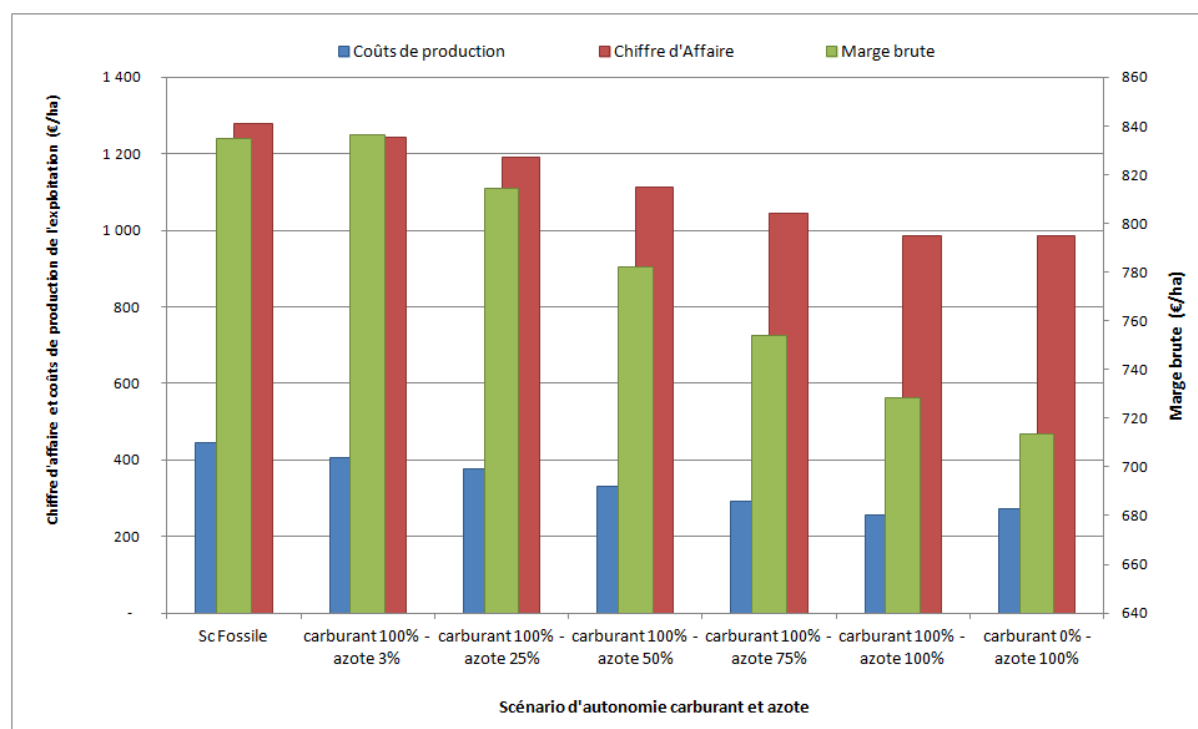
Figure 64 : Coûts de production des cultures selon le scénario d'autonomie



L'analyse de la marge brute de l'exploitation en fonction du degré d'autonomie recherché (Figure 65), montre que le scénario d'autonomie carburant 100%-azote 3% est le plus performant (836 €/ha). Les autres scénarios d'autonomie présentent une marge brute plus faible (entre 714 €/ha et 836 €/ha) que le scénario référence « fossile ».

Le chiffre d'affaires et les coûts de production, ici encore, diminuent avec l'augmentation du degré d'autonomie recherché, le chiffre d'affaires diminuant plus rapidement que les coûts de production (Figure 65).

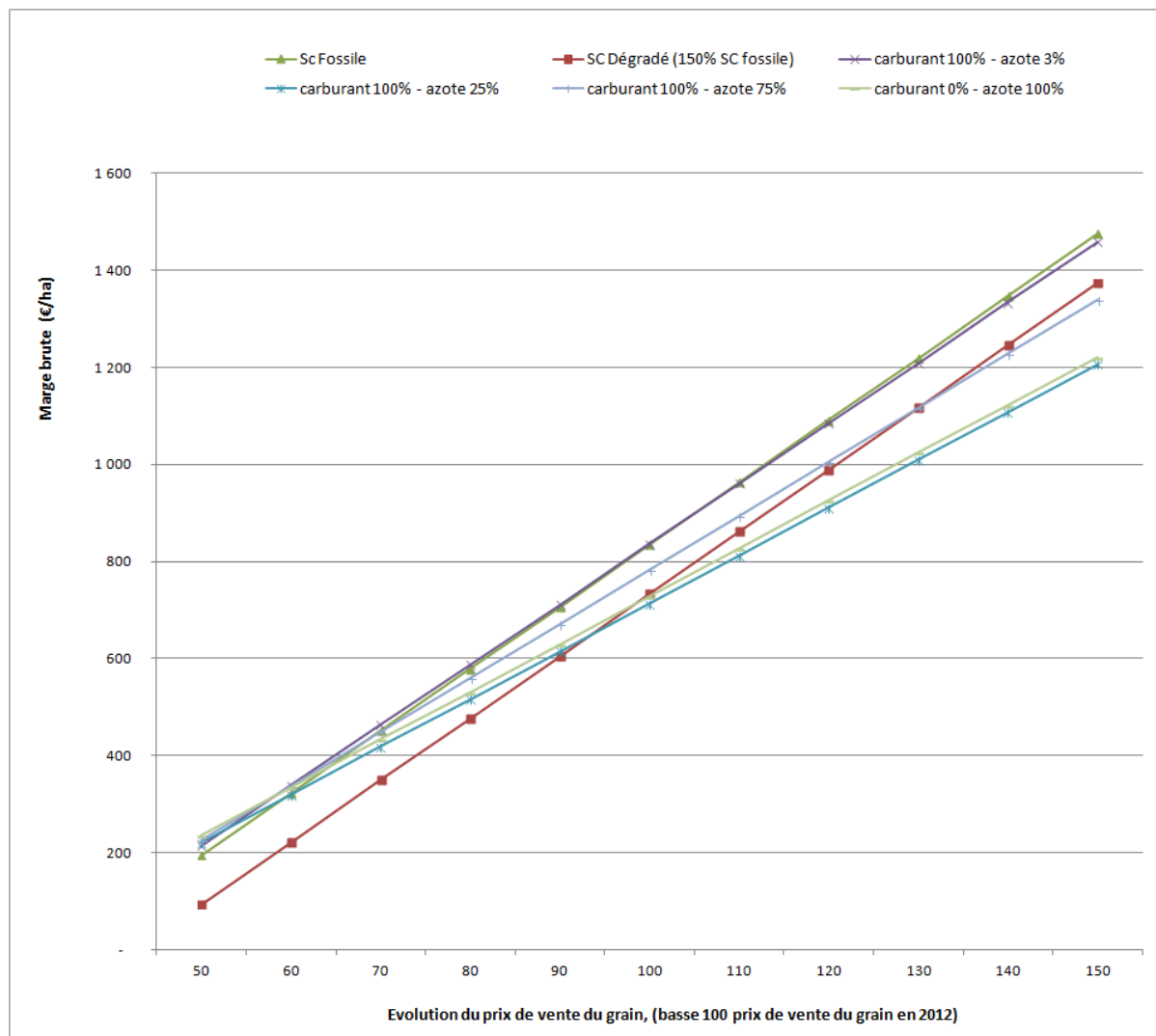
Figure 65 : Evaluation de la performance économique de l'exploitation selon le degré d'autonomie choisi



Dépendance au prix du grain :

Quel que soit le prix du grain, avec les tarifs actuels de l'azote et de l'énergie, la marge brute est plus faible dans les modèles autonomes que dans le modèle de référence (Figure 66). Dans le cas d'un scénario où le prix des énergies et de l'azote seraient supérieurs (150% des prix 2012), les scénarios d'autonomie dégageraient des marges brutes supérieures à celles obtenues dans le scénario fossile pour des prix de grain nettement inférieurs aux prix actuels (70%). Lorsque les prix de grain sont supérieurs, le scénario fossile dégage systématiquement des marges brutes supérieures.

Figure 66 : Comparaison de la marge brute des différents scénarios d'autonomie selon l'évolution du prix du grain



Analyse prospective :

Lorsque l'on reproduit la variation du prix des énergies, du grain et de l'azote constatée entre 1998 et 2012, la marge brute du scénario de référence reste supérieure à celles des autres (Figure 67). Pour autant, on peut considérer comme acceptable la marge brute obtenue dans les scénarios d'autonomie (entre 714 et 836 €/ha) (Figure 68).

Figure 67 : Evolution de la marge brute des différents scénarios d'autonomie sur une base de prix constatés (période 1998 - 2012)

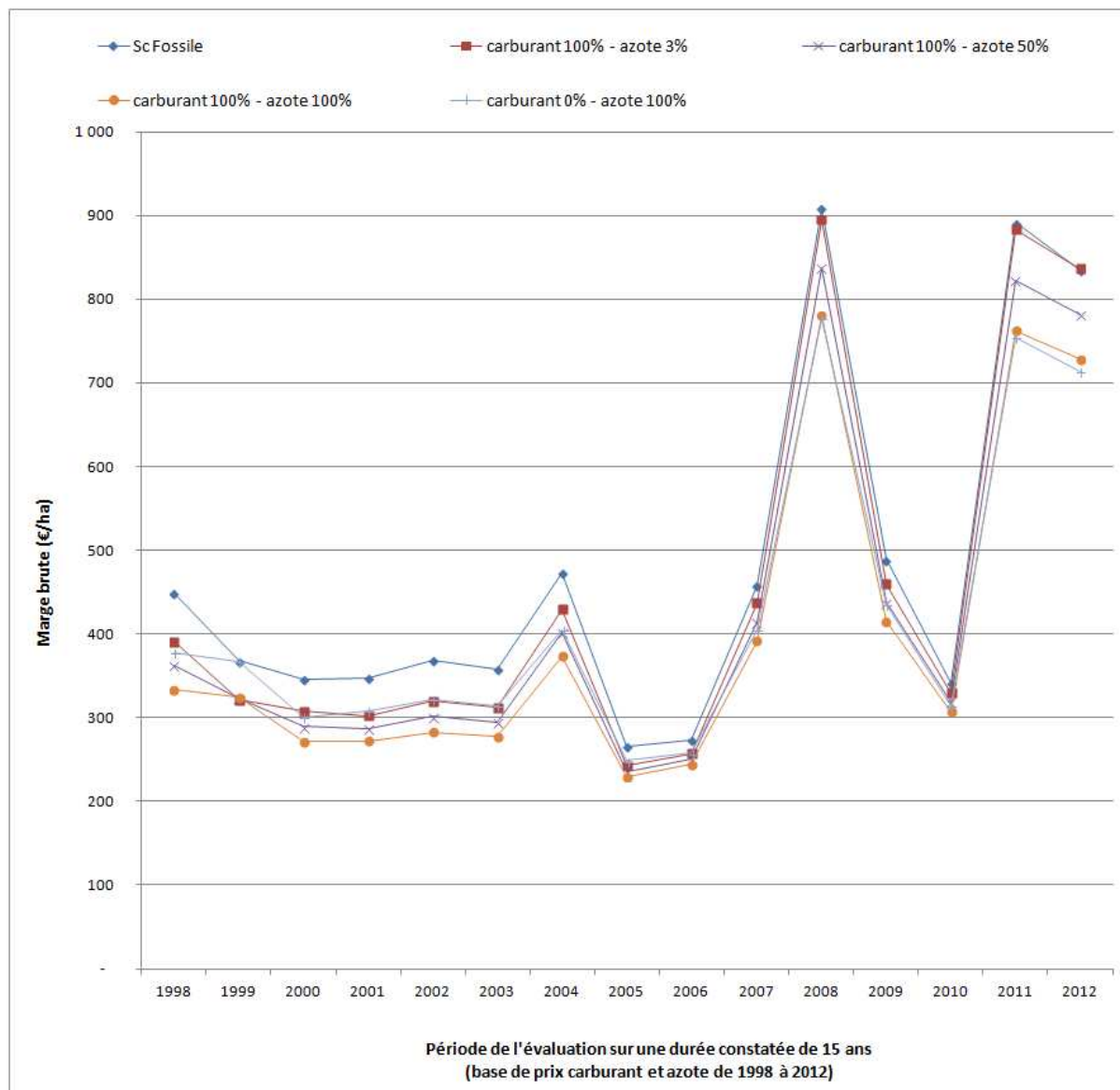
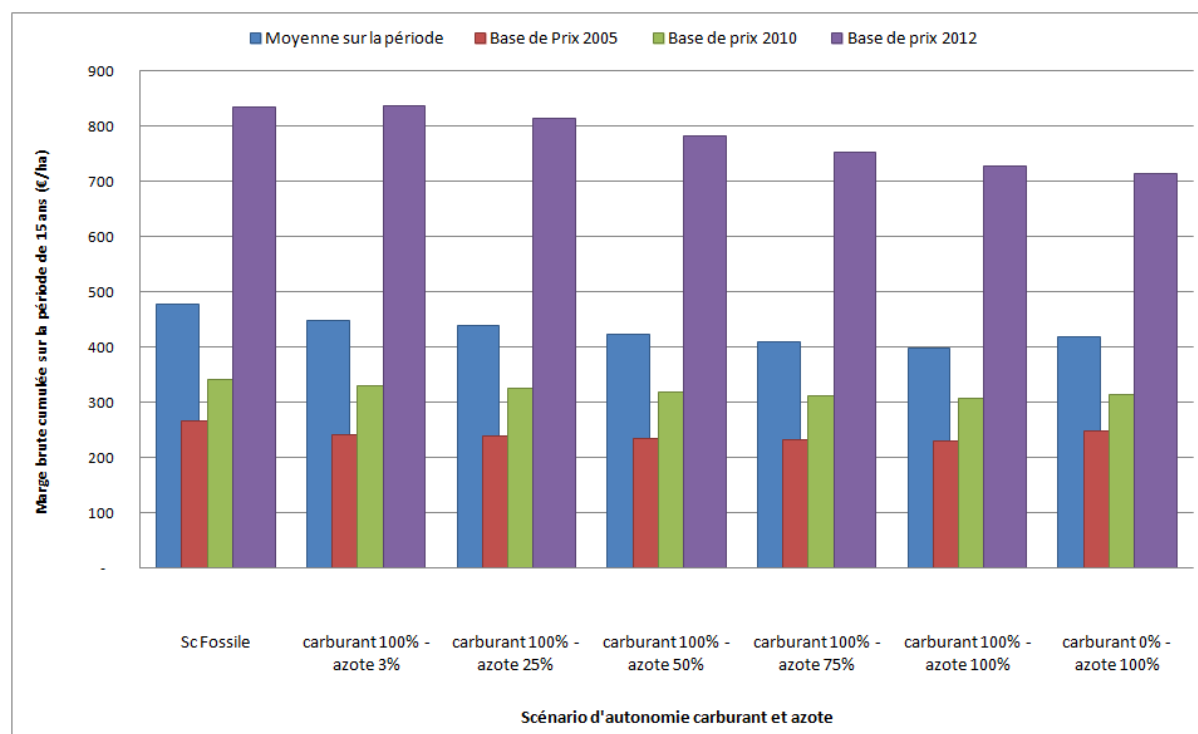


Figure 68 : Marge brute moyenne sur 15 ans des différents scénarios d'autonomie sur une base de prix constatés (1998 - 2012)



4.8. Comparaison des modèles de fermes et mise en œuvre de l'autonomie

Lorsque l'on compare l'ensemble des modèles de fermes étudiés, il en ressort que l'autonomie, en carburant et en azote, est toujours atteignable, quel que soit le choix de cultures ou l'objectif de rendement. La mise en place de l'autonomie se traduit systématiquement par une diminution des coûts de production à l'échelle de l'exploitation. Cela peut contribuer tout de même une vision plus stable des coûts de production dans le temps.

Néanmoins, l'analyse économique montre que la marge brute dégagée par l'exploitation, et sa performance économique ne sont pas les mêmes selon la configuration d'une même ferme, ou selon ses choix de cultures. Il en ressort également que les systèmes ayant des besoins d'azote plus faibles et un objectif de rendement moins élevé sont toujours favorisés par des systèmes autonomes en comparaison de schémas plus consommateurs d'azote et aux objectifs de rendements élevés. Cela met en évidence l'importance du contexte local dans lequel se trouve l'exploitation (conditions

pédoclimatiques, fourniture d'azote du sol et objectifs de rendement), qui gouverne à l'échelle de l'exploitation l'intérêt technico-économique de la démarche.

L'analyse sur une période de temps de quinze ans, sur une base de prix constatée, a montré que selon les années, certaines configurations d'autonomie étaient plus performantes que les scénarios de référence fossile. Cela montre la dépendance de l'évaluation au contexte de prix auquel le modèle autonome est comparé. Sur les bases de prix que nous connaissons actuellement, les systèmes autonomes ne sont pas les plus performants, alors que sur l'ensemble de la période d'observation de 1998 à 2012, certaines configurations d'autonomie l'auraient été.

Pour conclure, même si l'évaluation des modèles de fermes proposés a permis de dégager des grandes tendances sur les conditions agricoles favorables à la mise en place de l'autonomie : tel qu'un prix de grain faible, des rendements modérés ou encore des besoins d'azote extérieurs limités. L'intérêt de la démarche devra se réfléchir au cas par cas, en prenant en compte une approche locale unique dans un contexte global de marché. Chaque exploitation aura un intérêt plus ou moins évident à rechercher l'autonomie selon ses caractéristiques propres mais également sur le pas de temps et pas d'évolution des marchés qu'il prendra en compte pour caractériser son intérêt.

Si l'on se réfère à des scénarios pour lesquels les prix des carburants et de l'azote seraient stables ou en baisse, en même temps que le prix du grain serait élevé ou supérieur au coût actuel, l'intérêt de la démarche d'autonomie semble se limiter à une volonté individuelle environnementale devant primer sur la rentabilité économique de l'exploitation. Les scénarios « tout fossile » dans ce contexte devraient demeurer plus performants et encourager la course au rendement.

A contrario, si le prix du grain tend à diminuer pendant que les prix des carburants et de l'azote augmentent fortement, la recherche de l'autonomie pourrait bien être une alternative économique et environnementale plus performante.

Enfin, la façon dont les modèles agronomiques pourraient évoluer dans le futur peut avoir une influence déterminante. Une approche moins productiviste inciterait les exploitants à rechercher une performance d'ordre technique et environnemental sur des critères plus nombreux que le rendement agricole et la marge brute de l'exploitation. Cette optique dans laquelle la performance environnementale serait mise en valeur, d'une manière ou d'une autre, favoriserait l'émergence de projets de méthanisation dont la vocation serait d'apporter l'autonomie aux exploitations qui y participent.

CHAPITRE V :

Synthèse et perspectives

5.1. Evolution du contexte durant les travaux

La méthanisation est aujourd'hui l'une des filières d'avenir des énergies renouvelables en France. En effet depuis son émergence en tant que filière énergétique en 2006, suite à la parution des premiers tarifs de rachat d'électricité, la filière n'a cessé de se structurer, aussi bien sur les aspects législatifs et réglementaires que sur l'organisation des professionnels du secteur. A l'origine de la réflexion préfigurant ces travaux de recherche, seule la valorisation du biogaz par cogénération étant alors possible, l'injection du biogaz dans les réseaux était en réflexion mais encore impossible à mettre en oeuvre. Entre 2010 et 2013, de nombreux facteurs ont évolué et le secteur de la méthanisation est devenu plus attractif. En premier lieu la parution le 23 novembre 2011 des décrets autorisant l'injection du biométhane dans les réseaux de gaz naturel, précisant les conditions techniques et le tarif de rachat, a ouvert de nouvelles perspectives. En second lieu la parution le 27 février 2013 des décrets relatifs à la double valorisation, permettant à la fois de produire de l'électricité et de la chaleur ainsi que d'injecter du biométhane sur les réseaux a permis de doter la filière d'un ensemble de solutions techniques favorisant son développement. Enfin, entre fin 2012 et début 2013, les premiers projets d'injection réseau, Séquedin dans le département du Nord et Forbach en Meurthe-et-Moselle, ont pu être raccordés, offrant les premiers retours d'expérience sur l'injection de biométhane dans les réseaux de gaz naturel.

L'ensemble des évolutions réglementaires accompagnant l'évolution et l'émergence de la filière de méthanisation conforte l'intérêt des travaux de recherche sur des aspects prospectifs de filière, en particulier sur ceux, assez nouveaux, touchant à la réinjection de biométhane dans les réseaux.

Par ailleurs, de nombreux signaux positifs lancés par les pouvoirs publics (Etat, de nombreuses collectivités, ...) vont dans le sens du déploiement à plus grande échelle de la méthanisation. En outre l'objectif ambitieux annoncé par les Ministères de l'Ecologie et de l'Agriculture au travers du plan Energie Méthanisation Autonomie Azote (EMAA), prévoit 1 000 méthaniseurs à la ferme d'ici 2020 et une amélioration de la gestion de l'azote à l'échelle des territoires.

On constate aujourd'hui l'émergence d'outils et de réflexions, en lien direct avec les travaux de recherches menés depuis trois ans. Plusieurs agglomérations initient des réflexions sur l'évaluation du potentiel de leur territoire en termes de biomasse, en particulier concernant le débouché énergétique et la localisation des gisements fermentescibles. C'est par exemple le cas de

l'agglomération de Perpignan en partenariat avec GrDF qui dans le cadre de son étude a été amenée à contacter le laboratoire I2M pour bénéficier du cadre méthodologique développé au sein de ces travaux. On voit également des études récentes sur l'évaluation de gisements de biomasses atypiques, telles que les intercultures ou la valorisation de prairie (Solagro). Des outils sont également créés autour du potentiel d'injection par les gestionnaires de réseaux, tels que « réseaux verts » développé par GRT précisant la localisation des réseaux et les débits de gaz transitant. Autant de réflexions qui mettent en évidence le besoin de la part de la filière de se doter d'outils d'évaluation, de comparaison et d'identification du potentiel de la méthanisation en France. Les travaux menés semblent donc s'inscrire dans le schéma de développement de la filière qui s'est déroulé depuis 3 ans.

5.2. Synthèse des résultats

La création d'un cadre méthodologique spécifique à l'évaluation des gisements biomasse d'origine agricole, des effluents d'élevage et des coproduits de culture a permis de mettre en évidence le potentiel de mobilisation à différentes échelles sur le territoire et de consolider ainsi l'intérêt que représente cette typologie de biomasse pour la méthanisation. Le potentiel global à l'échelle de la France représente un potentiel biogaz d'environ 23 millions de m³, soit environ 28% de la consommation de gaz en 2008. L'évaluation a mis en évidence que les territoires, dans leur globalité, recèlent de gisements mobilisables variés. Le potentiel de production étant plutôt en faveur des zones concentrant les productions végétales via la mobilisation de coproduits, on constate néanmoins que la diversité des gisements cumulés permet d'avoir une production globale importante dans de nombreuses zones.

Ces résultats confortent le positionnement pris à l'origine par la société Methaneo sur le développement de projets de Méthanisation Collectifs Territoriaux et Agricoles, dont le potentiel de mobilisation de gisements s'avère important et représenté sur l'ensemble du territoire national. L'évaluation a entre autres débouché sur la création d'outils à différentes échelles destinés soit à déterminer des zones à forts potentiels de prospection (échelle macro), soit à produire une évaluation fine dans des périmètres restreints (échelle d'un territoire) pour anticiper sur la capacité maximale de biomasse mobilisable au sein d'une usine. Cela permet également à Methaneo d'adapter son discours et le montage des projets selon la typologie de l'agriculture présente localement, par exemple pour des projets valorisant une majorité d'effluents ou, à l'inverse, de coproduits.

Enfin la démarche menée, au travers de la consolidation d'informations statistiques, d'enquêtes de terrain et d'expérimentations, pourrait être appliquée pour d'autres gisements mobilisables en méthanisation (déchets agroindustriels, boues de stations d'épuration, déchets verts des collectivités, etc..), voire même de façon plus générale pour toute filière nécessitant un approvisionnement en biomasse et dont le développement pourrait se réaliser à différentes échelles et sur différents territoires.

La seconde évaluation, portant sur la définition de « modèles types » nous a permis de proposer la construction d'outils destinés à évaluer les possibilités de mise en œuvre de projets de méthanisation sur le territoire selon le dimensionnement technico-économique d'unités standards et la typologie des biomasses valorisées. Cette démarche apporte des éclairages sur les « mix biomasse » les plus performants pour envisager la mise en œuvre d'un projet de méthanisation sur un territoire. En effet l'évaluation a mis en évidence l'intérêt d'une part de certains gisements par rapport à d'autres et d'autre part de la détermination des seuils au-delà desquels certaines biomasses ne sont plus intéressantes. En particulier la présence de différents types de biomasses sur un territoire permettant une synergie rendant des « modèles types » viables. C'est notamment le cas pour les coproduits agricoles. Nécessitant un coût de mobilisation élevé en comparaison des effluents d'élevage, ils trouvent leurs limites dans les projets de grandes capacités. Mais dans d'autres configurations de « mix biomasse », ils permettent de compenser la saisonnalité de certains effluents d'élevage, et d'obtenir la viabilité du modèle étudié.

L'évaluation par les « modèles type » a permis d'identifier des typologies de projets distincts, permettant à Methaneo de créer en interne des unités de méthanisation « standard » et « reproductibles » (taille et typologie de biomasse) répondant aux possibilités du territoire, renforçant ainsi sa démarche commerciale.

Par ailleurs l'évaluation comparative par « modèle type » pourra également être menée pour identifier les modalités techniques les plus favorables au développement de projets de méthanisation, que ce soit en comparant les filières de valorisation possibles (cogénération, injection ou double valorisation) ou en comparant pour une même typologie d'intrants la technologie la plus performante (voie liquide, voie sèche, etc...). Enfin, la méthodologie comparative par les « modèles type » pourrait être utilisée pour toute filière biomasse dont les technologies et les capacités de traitement d'intrants sont multiples.

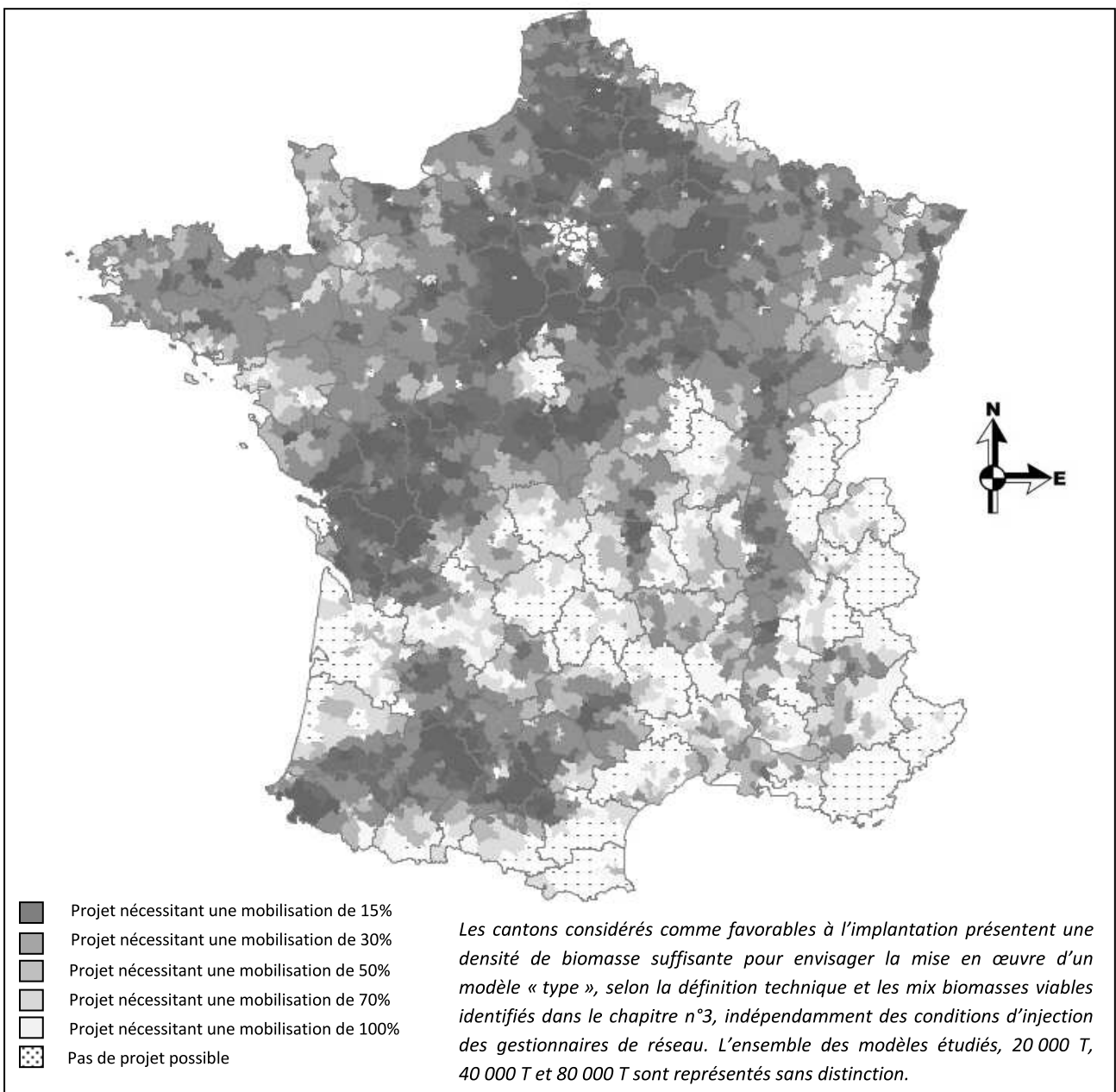
La mutualisation des outils cartographiques développés pour l'évaluation des gisements d'origine agricole, couplés à l'évaluation des « modèles type » en injection, permet une évaluation, sur l'ensemble de la chaîne, pour différents scénarios, du potentiel de développement des 'modèles

type » viables étudiés à l'échelle de la France. La Figure 69 met en évidence les zones favorables à la mise en œuvre des « modèles type » présentés dans les travaux. Cette figure représente les cantons ayant un mix de biomasse viable pour la mise en place des modèles « type » (injection sur le réseau de distribution, injection sur le réseau de transport, injection avec rack de transport biométhane) sans en préciser la typologie ou la taille du « modèle type » étudié (20 000 T, 40 000 T, 80 000 T). Elle caractérise le potentiel de développement et, le nombre de cantons pour lesquels l'implantation de l'un de ces « modèles types » serait possible.

L'analyse de la figure montre qu'un grand nombre de territoires sont favorables à l'implantation d'un « modèle type », près de 84% des cantons ont une quantité de biomasse correspondant à un mix d'approvisionnement favorable. Les possibilités de mise en œuvre de projets de méthanisation sont dépendantes du taux de mobilisation de la biomasse et de la participation des exploitants agricoles à une démarche de projets de Méthanisation Collectifs Territoriaux et Agricoles. L'échelle de l'évaluation de 100% de mobilisation à 10% met en avant le potentiel très important de certains territoires. Pour d'autres, la mise en place de projets de méthanisation tels que définis par les « modèles type » étudiés ne pourront voir le jour que si une part très importante de mobilisation de biomasse est réalisée. Le développement de la méthanisation sur l'ensemble des territoires ne sera donc possible qu'à travers une forte adhésion de l'ensemble du monde agricole à ces projets et donc à une promotion de la méthanisation sur les territoires. Il faudra également identifier de nouveaux « modèles type » viables pour les territoires dont le potentiel de biomasse est moins important (technologie et taille de projet différent, rentabilité attendue moindre, etc...).

La synergie entre les deux méthodologies développées permet aujourd'hui à Methaneo d'avoir une vision et un positionnement affirmé sur la capacité de déploiement de la méthanisation agricole sur l'ensemble du territoire, tout en ayant défini des modèles spécifiques techniques selon les territoires. Pour aller plus loin et déterminer les réels potentiels de réinjection en France, une mutualisation de la méthodologie avec les outils développés par les gestionnaires de réseaux (réseau vert de GRT) permettrait de déterminer de façon plus fine la localisation possible des projets (localisation des réseaux en comparaison de la localisation des gisements) et la typologie des « modèles types » à mettre en œuvre (taille de projet en comparaison des capacités de réinjection dans les réseaux). De la même manière, ce travail d'évaluation confrontant les gisements biomasses avec des « modèles types » pourrait être réalisé pour des tailles ou typologies de projets différents et complémentaires à la Méthanisation Collective et Territoriale et Agricole, notamment pour la méthanisation à la ferme ou encore pour des unités de méthanisation de déchets agroindustriels, d'ordures ménagères et de boues de station d'épuration.

Figure 69 : Cartographie des cantons permettant le développement de modèles « type », selon le taux de mobilisation de la biomasse.



Le dernier chapitre de ce travail s'est intéressé à la mise en place d'un projet de méthanisation à l'échelle de base, celle de l'exploitation, en caractérisant les possibilités d'autonomie en azote et en carburant qu'elle peut atteindre au travers de sa participation au sein d'un projet collectif. L'évaluation a mis en évidence qu'une logique d'approvisionnement du méthaniseur avec des cultures dédiées de légumineuses permet dans une certaine mesure à l'exploitation d'augmenter son degré d'autonomie en produisant elle-même l'azote et le carburant nécessaire à la conduite de son exploitation. On constate que le degré d'autonomie recherché ou atteignable dépend de facteurs

intrinsèques de l'exploitation (conditions pédoclimatiques, objectifs de rendements, reliquats du sol). Cette démarche ne peut donc être envisageable que par une évaluation précise au cas par cas pour chaque exploitation d'un territoire. Les résultats ont mis en évidence que le facteur le plus limitant était l'autonomie en azote et que les systèmes à bas rendement de grains présentant des conditions locales favorables moins consommatrice d'azote sont favorisés par la mise en place de ce système, en comparaison des autres modèles étudiés très consommateurs d'azote. L'analyse technico-économique d'une exploitation entrant dans cette démarche met en avant que les conditions de performances sont extrêmement dépendantes de la conjoncture des prix de marché, en particulier celui du grain mais également celui du prix des carburants et de l'azote fossiles. L'évaluation sur la base d'une évolution temporelle de prix connue (1998 – 2012) nous a permis de déterminer que certaines configurations de ferme auraient dégagé une marge brute supérieure grâce à l'autonomie. Pour la majorité des cas étudiés, sur une base de prix du grain et des intrants extérieurs actuels ou en progression, le modèle d'autonomie ne semble pas plus performant que le modèle fossile d'un point de vue économique. La démarche d'autonomie semble donc une solution viable pour des configurations bien précises et surtout dans l'objectif pour l'exploitation de diminuer sa dépendance et d'améliorer ses pratiques.

Cette démarche répond également à d'autres objectifs, par exemple agronomiques en allant dans le sens des politiques agricoles actuelles telles que la PAC, qui incite à la diversification des cultures et veut promouvoir l'usage de légumineuses. Cette démarche répond également à des problématiques en lien direct avec les possibilités de mise en œuvre d'un projet de méthanisation. La mise en place de cultures dédiées de légumineuses permettrait de faciliter la mise en œuvre de projets, en disposant de biomasses sécurisées et pouvant palier à des problématiques de saisonnalité dans l'approvisionnement des unités de méthanisation.

L'analyse des possibilités de mise en œuvre de cultures dédiées au sein d'une exploitation ouvre la voie pour Methaneo dans l'optique de proposer un modèle de méthanisation évolutif pour les projets développés par la société. En effet, la recherche d'autonomie peut être un levier à terme pour des exploitants inscrits au sein d'un projet de méthanisation UCMTA en leur offrant la possibilité d'augmenter les capacités de l'usine via un apport en biomasse supplémentaire et de basculer du modèle UCMTA vers un modèle d'UMCTA2: Unité de Méthanisation Collective Territoriale Agricole et Autonome. Les agriculteurs pourraient ainsi, selon l'évolution des prix de marché du grain et de l'azote, utiliser l'unité de méthanisation comme un outil de pilotage et d'amélioration de leurs pratiques en livrant en plus des effluents et coproduits, des cultures dédiées de légumineuses. L'exploitation produirait elle-même une partie ou la totalité des unités d'azote pour son exploitation, limitant ainsi l'impact de la variation des prix sur leur marge brute.

Si on s'intéresse au potentiel de développement de « modèles type » (Figure 69) en ajoutant la dimension de l'autonomie et la possibilité d'accroître la ressource avec la mise en place de cultures dédiées, on constate que cette démarche permet d'accroître le potentiel des territoires et d'augmenter le nombre de cantons favorables au développement de « modèles type ». En effet, la mise en place de cultures va permettre soit d'augmenter le potentiel de biomasse disponible sur un territoire favorable et donc permettre un taux de mobilisation plus faible, soit de rendre viables des cantons qui, jusque là, ne l'étaient pas à partir de la mobilisation d'effluents ou de coproduits. La mise en place de cultures dédiées de légumineuses pour des usages de méthanisation, dans des proportions contrôlées, semble donc une opportunité aussi bien pour les exploitants agricoles que pour le potentiel de développement de la filière à l'échelle des territoires.

5.3. Perspectives

Pour conclure, la méthanisation basée sur l'approvisionnement de matières d'origine agricole présente un réel potentiel sur l'ensemble du territoire pour lequel les cadres réglementaires mis en place aujourd'hui ainsi que la structuration de la filière sont favorables à l'émergence de projets collectifs agricoles. Un certain nombre de synergies, de leviers et de perspectives à venir ont été mis en avant et laissent présager que les objectifs de développement sont atteignables. GrDF prévoit, dans son étude prospective, que 73% du gaz transitant dans ces réseaux en 2050 sera d'origine renouvelable. Le potentiel de biomasse agricole quand à lui semble capable de participer de façon significative à ces objectifs.

L'ensemble des travaux et des évaluations réalisés offre aujourd'hui la possibilité à Methaneo de définir les zones prioritaires de développement et d'affiner sa stratégie commerciale autour du contexte législatif et technico-économique actuel, tout en se dotant d'outils qui lui permettront de faire évoluer son modèle au travers des évolutions à venir de la filière et de ses objectifs de développement.

La perspective de ces travaux et de la démarche serait sans doute de généraliser l'évaluation par les « modèles type » pour accompagner les évolutions réglementaires à venir et sans doute nécessaire pour poursuivre le développement de la filière et d'utiliser la méthodologie comme outil d'aide à la décision. A travers cette méthode, on pourrait évaluer les propositions d'évolution du cadre tarifaire (réévaluation des tarifs, introduction de primes spécifiques, interdiction ou promotion de cultures dédiées) et déterminer l'impact de ces propositions sur le potentiel de déploiement de la méthanisation en France.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Addou, A. (2009). Traitement des déchets, valorisation, élimination, Ellipses, Paris, 284 p.

Ademe, AFGNV, Atee Club Biogaz, GDF SUEZ, IFP. (2008). Synthèse: État des lieux et potentiel du biométhane carburant, Ademe, p.2.

Ademe, France Agrimer. Analyses de Cycle de Vie appliquées aux biocarburants de première génération consommés en France, 234 p.

Ademe (2011). Qualité agronomique des digestats. Etude réalisée pour le compte de l'ADEME et le Ministère de l'Agriculture par RITTMO Agroenvironnement, Uteam, FIBL, INERIS, LDAR, p.36-70.

ADEME, DIGES : bilan gaz à effet de serre des installations de méthanisation de déchets. <http://www2.ademe.fr/>.

Adler, E. (2009). Le biométhane, une énergie naturelle renouvelable qui a fait ses preuves, p. 1-6. <http://www.aconsult.fr/>

AGRESTE (2009). La consommation d'énergie directe des exploitations agricoles. Agreste Primeur, n°224. p.1-4.

Association des Agriculteurs Méthaniseurs de France (AMF).

<http://www.pardessuslahaie.net/agriculteurs-methaniseurs/39>.

Almansour, E. (2011). Bilans énergétiques et environnementaux de filières biogaz : Approche par filière type. Thèse au laboratoire du Trèfle à l'Université de Bordeaux 1. p.29, 63-66.

Almansour, E., Bonnet, J.-F., Heredia, M. (2011). Potentiel de production de biogaz à partir de résidus agricoles ou de cultures dédiées en France. Sciences Eaux & Territoires, N°04-2011, p. 64,72.

ATEE. Association Technique Energie Environnement-Club Biogaz. <http://www.atee.fr/>

Barlaz (1990). Bacterial population development and chemical characteristics of refuse decomposition in a simulated sanitary landfill, *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 55, p. 55-65.

Biomasse Normandie (2011). Étude d'opportunité pour la mise en œuvre d'unités collectives de méthanisation en Basse-Normandie. <http://www.biomasse-normandie.org/>, 24 p.

Bonnet, J.-F. (1998). Les apports solaires implicites dans les activités humaines. Thèse à l'ENSAM Arts et Métiers ParisTech, 395 p.

Bonnet, J.-F., & Lorne, D. (2009). Eau et biocarburants Impacts sur l'eau du développement des biocarburants en France à l'horizon 2030, *Les Cahiers du Clip n°19*, IDDRI, Paris, 98 p.

Boullard, B (1967). Vie intense et cachée du sol. Essai de pédobiologie végétale. Flammarion. 140 p.

Brauman, A., Fonty, G *et al.* (2008). La méthanisation dans les écosystèmes naturels et cultivés. Editions Tech & Doc-Lavoisier, 552 p.

Buffière, P, Carrere M *et al.* (2007). Guide méthodologique pour l'exploitation d'unités de méthanisation de déchets solides, 173 p.

Chambre d'Agriculture de la Haute Marne (2008). Etude du gisement des déchets fermentescibles de la Haute-Marne (52), p.35-38.

Conrad, R (1999). Contribution of hydrogen to methane production and control of hydrogen concentration in methanogenic soils and sediments. *FEMS Microbiology Ecology* 28, p.192-202.

Couturier, C. (2002). Effets de la digestion anaérobie sur les micropolluants et germes pathogènes. SOLAGRO, www.solagro.org

Couturier, C. (2004). Potentiel et facteurs d'émergence de la récupération du biogaz et des gaz fatals, SOLAGRO/ RECORD, p.16

Couturier, C. (2004). La qualité agronomique des digestats, Rapport Final. SOLAGRO, 250 p.

Couturier, C. (2009). Injection de biogaz dans le réseau public de gaz naturel. Colloque BIOGAZMAX. SOLAGRO, p. 13-18.

Couturier, C. (2013). Quel potentiel pour le biogaz dans la transition énergétique ? SOLAGRO, p.10.

Damien, A. (2008). La biomasse énergie : Définitions Ressources Usages, Dunod, Paris, 250 p.

Demuyne, M., Nyns, E. J., & Palz, W. (1984). Biogas Plants in Europe : A Practical Handbook (D. Reidel). Dordrecht / Boston / Lancaster, 361 p.

El-Fadel, M., A. N. Findikakis, *et al.* (1996). Temperature effects in modelling solid waste biodegradation. *Environmental Technology* 17. p.915-935

Ehrig, H.J (1983). Quality and Quantity of Sanitary Landfill Leachate. *Waste Management and Research* 1.p. 53-68.

Ernst &Young. (2010). Etude de marché de la méthanisation et des valorisations du biogaz. Ademe, Paris, 142 p.

Farquhar, Rovers (1973). Gas Production during refuse decomposition. *Water Air Soil Pollution*, 483 p.

Féménias, *et al.* (2008). Évaluation des conditions de développement d'une filière de méthanisation «la ferme » des effluents d'élevage, p. 47, 67.

Frédéric, S., & Lugardon, A. (2007). Méthanisation des effluents industriels liquides. *Techniques de l'ingénieur*, J3943, p. 1-11.

Gaz Réseau Transport (GRT gaz). [Réseau vert. www.grt.com](http://www.grt.com).

Goossens, X., Bonnet J.-F. (2001). Etude de la matrice des interactions eau – énergie, In *Penser l'avenir pour agir aujourd'hui*, Tome 2, Commissariat général du Plan, Paris, p. 789 – 898.

Görisch, U., & Helm, M. (2008). La production de Biogaz, Ulmer, Paris, 120 p.

Grossin, J (2011). Fractionnement Isotopique ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) engendrés par la méthanogénèse : apports pour la compréhension des processus e biodégradation lors de la digestion anaérobie. Thèse de l'Université Bordeaux 1, p.49.

Keller, *et al.* (2002). The IWA anaerobic digestion model N°1 (ADM1). *Water Science and Technology* 45(10): p.65-73.

La Farge, B. (1995). *Le Biogaz Procédés de fermentation méthanique*, Masson, Paris, 237 p.

Leignel, J (2007). Etude de l'émergence de véhicules propres dans le domaine des « grands routiers » par l'utilisation du GNV. Etude du Ministère des Transports, de l'Équipement, du Tourisme et de la Mer. p.20-22.

Lukehurst, 2012. Quality management of digestate from biogas plants used as fertiliser, IEA Bioenergy, Task 37 - Energy from Biogas, p.40

Meynell, P.-J. (1976). *Methane : planning a digester*, Prism, Pre., Dorchester, Dorset, p.3.

Ministère de l'Agriculture. Plan Energie Méthanisation Autonomie Azote (EMAA). <http://agriculture.gouv.fr/Plan-Energie-Methanisation>.

Moletta, R (2002). Note de synthèse du rapport : étude bibliographique sur la méthanisation des déchets organiques. Records, 194 p.

Moletta, R. C. (coord.) (2008). *La méthanisation*. Édition TEC&DOC Lavoisier, Paris, 532 p.

RECORD. (2004). Potentiel et facteurs d'émergence de la récupération du biogaz et des gaz fatals, n°02-0415/1A, p.259.

Pain, B.F, *et al.* (1990). Odour and ammonia emissions following the spreading oh anaerobically digested pig slurry pn grass land, p 63..

Pavlostathis, Giraldo-Gomez (1991). Kinetics of anaerobic treatment : a critical review. *Critical Reviews in Environmental Control* 21, p. 441-490.

Sarbondadière, J.-C. (2007). Nouvelles technologies de l'énergie 3 géothermie et énergies de la biomasse, Hermes Science, Paris, 262 p.

Soltener (1986), les bases de la production végétale, 464 p.

Thauer, R. K., K. Jungermann et K. Decker (1977). Energy Conservation in Chemotrophic Anaerobic Bacteria. *Bacteriological Reviews*, p.41.

Tholozan, J.-L. (1988). Métabolisme des acides gras volatils dans les écosystèmes méthanogènes : application de la RMN du carbone 13, Université des Sciences et Techniques de Lille Flandres-Artois, p.96.

Toine Bakx, Yves Membrez, Adèle Mottet, Adriano Joss, Marc Boehler (2009). Etat de l'art des méthodes rentables pour l'élimination, la concentration ou la transformation de l'azote pour les installations de biogaz agricoles de tailles petite/moyenne, 93 p.

Triboi, E (2010). Système de cultures autonomes en azote. Présentation lors d'une conférence du concept LOMe. p.16-17.

Wens, P, Vercauteren, T *et al.* (2001). Factors inhibiting anaerobic degradation in a landfill. *Proceedings Sardinia 2001, eighth International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Italy, vol.I, p. 13-20.*

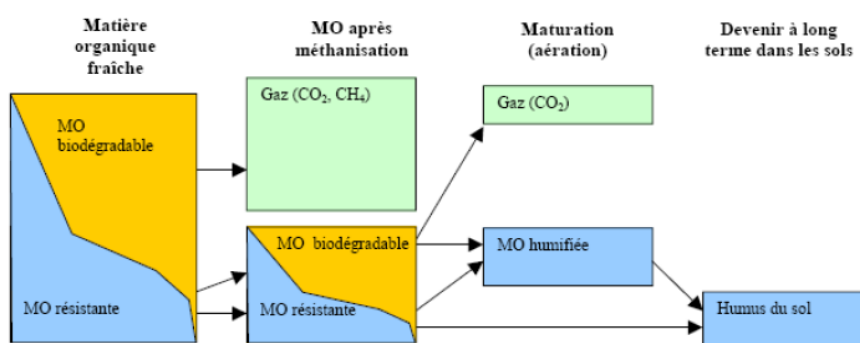
Yuen, S.T.S, J.R Styles *et al.* (1995). An Active Landfill Management by Leachate Recirculation : a Review and an Outline of Full Scale Project. *Sardinia 1995, Fifth International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Sardinia, Italy, CISA.*

ANNEXES

Annexe 1 : Maintien du potentiel humifère en méthanisation

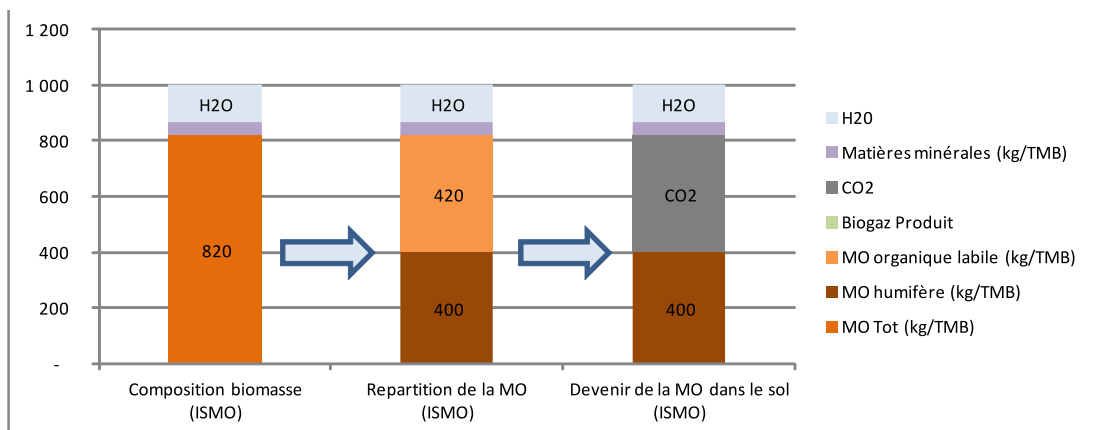
La méthanisation permet la dégradation de la matière organique labile, les microorganismes impliqués dans le processus de dégradation anaérobie ne sont pas capables de dégrader la partie ligneuse de la matière organique qui est à l'origine de la matière organique humifère (Moletta 2008, Apesa).

Figure 70 : Devenir de la matière organique dans le sol (APESA, P Pouech)



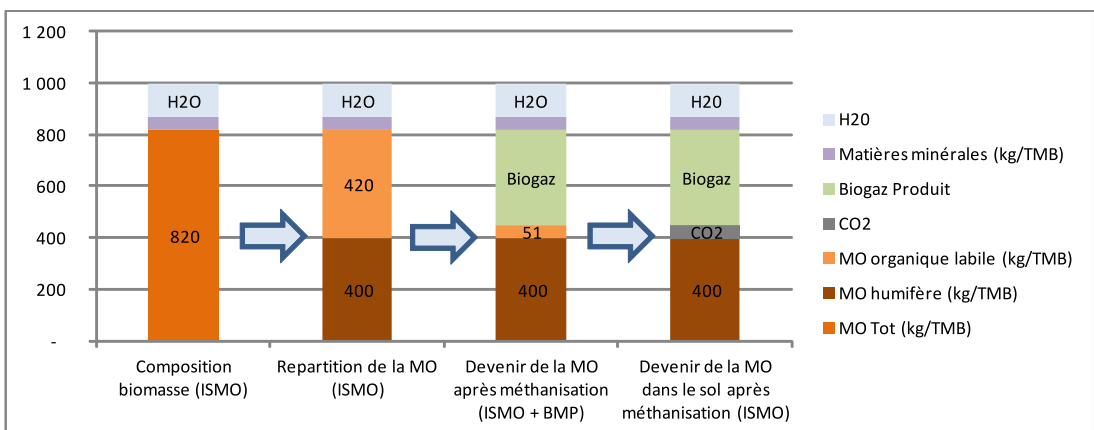
Par ailleurs, Methaneo a fait réaliser des essais en laboratoire (APESA et LCA) pour caractériser le devenir de la matière organique après méthanisation dans le cadre de la méthanisation de coproduits de cultures. C'est notamment le cas pour les rafles de maïs. Le protocole expérimental a été assez simple, il a consisté à évaluer la part de matière organique labile et humifère dans un échantillon de cannes de maïs (test ISMO du laboratoire du LCA). Puis nous avons réalisé un test de BMP auprès de l'APESA pour déterminer la part de matière organique MO dégradée par méthanisation. Par différentiel des deux résultats, nous pouvons estimer la part de matière organique labile dégradée et la part de matière organique humifère restante (Figure 71 et Figure 72).

Figure 71 : Approche simplifiée du devenir de la matière organique d'une canne de maïs après enfouissement dans le sol



* Analyse réalisées dans les laboratoire du LCA (ISMO)

Figure 72 : Approche simplifiée du devenir de la matière organique issue d'une canne de maïs après méthanisation



* Analyse réalisées dans les laboratoire du LCA (ISMO) et de l'APESA (BMP)

Annexe 2 : Résultats des essais de fertilisation de digestat sur Tiper Méthanisation

Durant le développement du projet Tiper Méthanisation, Methaneo a réalisé une série d'expérimentations de 2009 à 2012 en partenariat avec la Chambre d'Agriculture des Deux Sèvres. Ces essais ont eu pour objectif de présenter aux agriculteurs partenaires du projet les effets du digestat sur une culture en comparaison de leurs pratiques habituelles.

Une partie des résultats de ces essais est présentée ici afin d'illustrer la qualité agronomique des digestats.

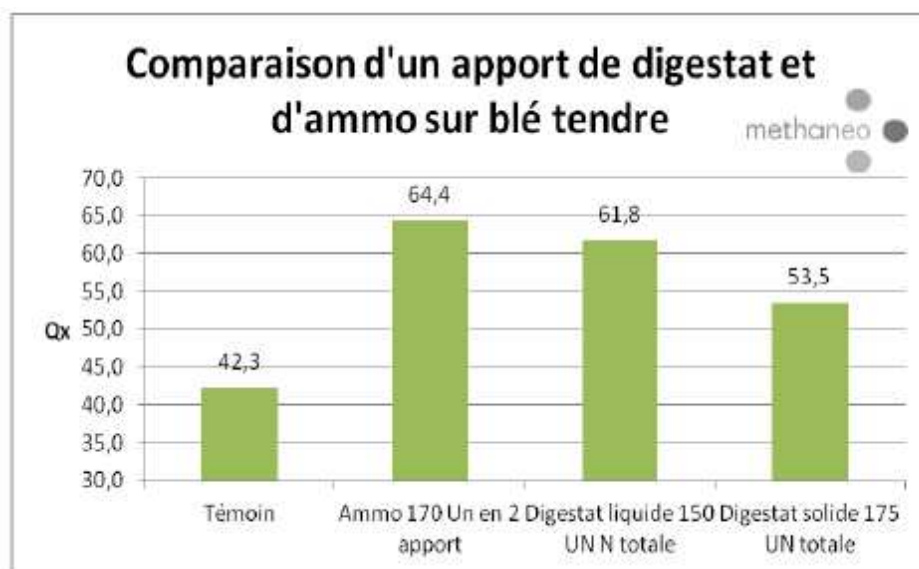
Essais sur blé tendre :

Essais à St Générour

Objectif : Comparer différents types de fertilisants sur blé tendre.

Objectif de rendement : 65 T/ha

Type de sol : argilo-calcaire superficiel



On constate que les apports de digestat solide et liquide permettent d'atteindre des rendements en blé plus élevés que le témoin. En comparaison avec l'apport d'engrais chimique ammonitrate, le digestat liquide assure presque les mêmes rendements. Les apports en ammonitrate peuvent être substitués par du digestat liquide. Enfin, la comparaison entre les apports de digestats solide et liquide met en évidence une meilleure disponibilité de l'azote dans la phase liquide du digestat (forme ammoniacale).

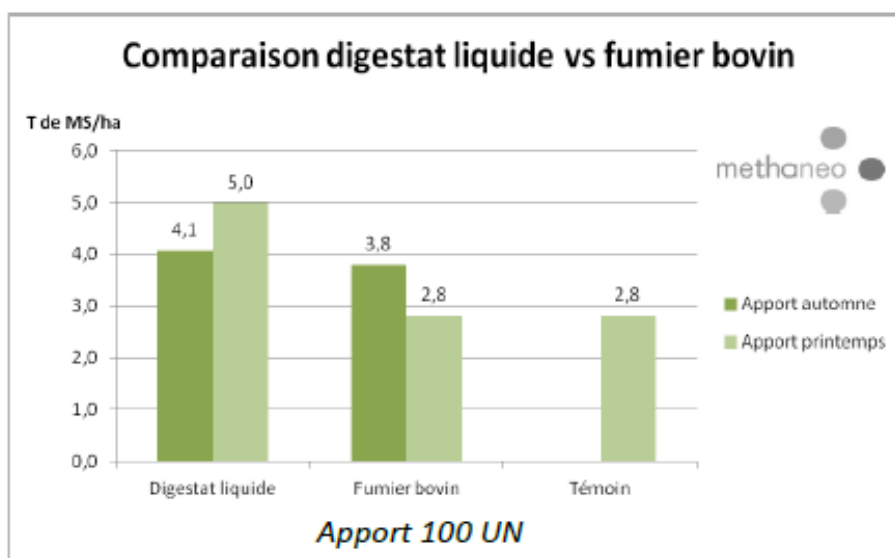
Essais sur prairie fauchée :

Essais menés en 2012 à Mauléon

Objectif : Comparer différents types de fertilisants et la date d'apport (automne/printemps)

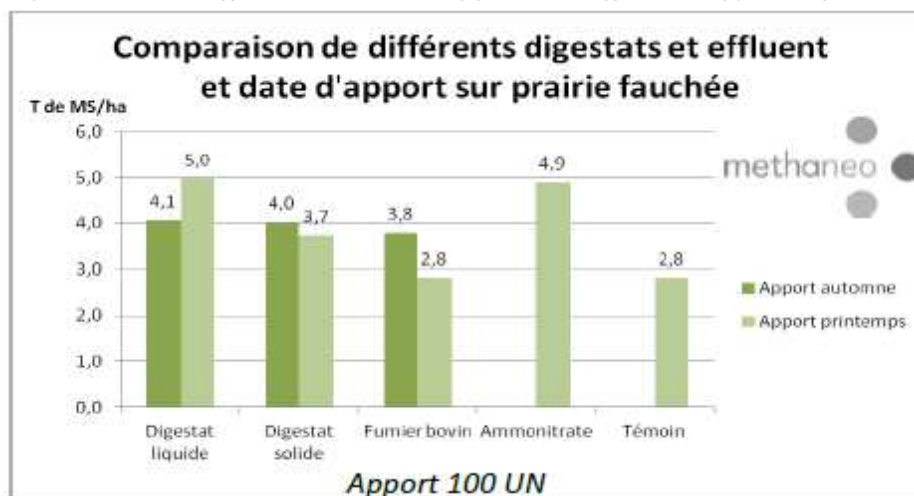
Type de sol : sablo-limoneux

Comparaison des différentes dates d'apport sur différents types de fertilisants



Les pratiques de fertilisation d'un éleveur avant et après méthanisation vont être modifiées. Si l'on compare un apport de digestat liquide au printemps et un apport de fumier bovin en automne (modification des pratiques pour un agriculteur adhérent à un projet collectif de méthanisation), il en ressort que grâce à la méthanisation, l'azote organique provenant d'un élevage bovin peut être mieux valorisé. En effet, cet essai met en évidence que les rendements obtenus à l'aide de digestat liquide sont supérieurs à ceux des pratiques actuelles avec les fumiers quelle que soit la période d'apport.

Comparaison des différentes dates d'apport sur différents types de fertilisants



Les produits présentant une fraction ammoniacale importante et donc de l'azote rapidement disponible pour la plante sont mieux valorisés lorsqu'ils sont épandus au moment où la plante en a le plus besoin (cas du digestat liquide épandu au printemps). Cet essai met en évidence que d'une part le digestat liquide est mieux valorisé au printemps et que d'autre part, lorsqu'il est valorisé au bon moment, il permet d'avoir des rendements équivalents à ceux des engrais chimique type ammonitrate.

Annexe 3 : Intérêts sanitaires de la méthanisation

Plusieurs études ont démontrés l'intérêt sanitaire de la méthanisation à travers le pouvoir « hygiénisant » du procédé. C'est ce que met en évidence l'étude bibliographique menée par Solagro (SOLAGRO, 2004) qui précise que « *L'essentiel des travaux de recherche sur le devenir des pathogènes au cours de la digestion anaérobie, porte sur ceux qui sont susceptibles d'affecter l'homme et les animaux. Les principaux paramètres d'élimination des agents pathogènes sont le **temps** et la **température**. Globalement, la digestion **mésophile** classique (autour de 37°C) permet d'éliminer en ordre de grandeur 99 % des germes pathogènes (facteur 100), et la digestion **thermophile** (autour de 55°C) 99,99 % (facteur de réduction de 10.000) ».*

D'autres travaux se sont intéressés à la dégradation de pathogènes précis tel que la brucellose ou le botulisme par méthanisation et mis en évidence la destruction des bactéries et des ravageurs tels que les nématodes (Lukerust *et al.*). Enfin la méthanisation est également reconnue pour permettre la destruction des adventices et mauvaises graines (Lukhurst *et al.*, Katovich and Becker, Engeli *et al.*) (Figure 73). La dégradation des adventices comme pour les pathogènes est liée à un couple temps et température (Figure 74).

Figure 73 : Survie des agents pathogènes des plantes et des graines de mauvaises herbes pendant la digestion anaérobie - Essai Suisse (Engeli, Edelmann, Fuchs and Rottermann)

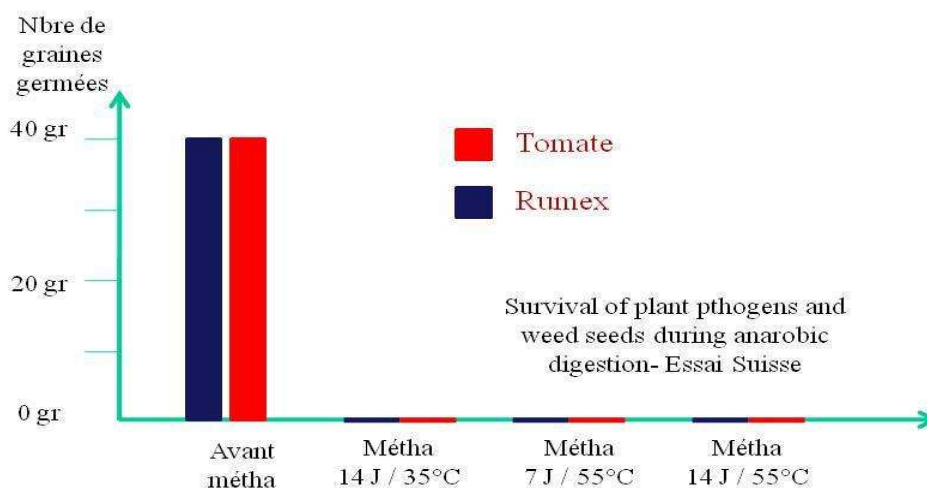


Figure 74 : Temps de séjour et température de digestion nécessaires à la dégradation des adventices par méthanisation

Nom vernaculaire de l'espèce	Nom latin	Température nécessaire pour empêcher toute germination (°C)	Durée (jours)
Abutilon ⁽³⁾	<i>Abutilon theophrasti</i>	35-40.6 ⁽¹⁾	20
Amaranthe réfléchie	<i>Amaranthus retroflexus</i>	35-40.6 ⁽²⁾	20
Chénopode blanc ⁽²⁾	<i>Chenopodium album</i>	38	21.5
Chiendent	<i>Elytrigia</i>	30	~30
Colza	<i>Brassica napus</i>	35	21.5
Folle avoine	<i>Avena fatua</i>	35	21.5
Folle avoine	<i>Avena fatua</i>	30	~30
Millet commun ⁽³⁾	<i>Panicum miliaceum</i>	35-40.6	20
Morelle noire	<i>Solanum nigrum</i>	35	21.5
Ortie commune	<i>Urtica urens</i>	35	21.5
Patience sauvage	<i>Rumex obtusifolius</i>	35	21.5
Renouée	<i>Hydropiper polygonum</i>	30	~30
Renouée persicaire ⁽³⁾	<i>Polygonum persicaria</i>	35-40.6	20
Setaire de faber ⁽³⁾	<i>Setaria faberi</i>	35-40.6	20
Tabouret des champs	<i>Thlaspi arvense L.</i>	30	~30
Tomate	<i>Lycopersicon lycopersicum</i>	55	14

⁽¹⁾ Taux de germination de 2.7% pendant les 2 saisons suivantes (essais en champ)

⁽²⁾ 0.1% de graines germant pendant les 2 saisons suivantes. On note également 4% de graines viables à T=30°C pour un traitement de 30 jours

⁽³⁾ D'après Katovich and Becker 2004, le seul procédé de rumination suffirait à détruire la capacité de germination de ces graines

Annexe 4 : Trame des enquêtes territoriales

Une série d'enquêtes téléphoniques et par courriels a été menée auprès des Chambres d'Agriculture. La démarche des enquêtes a permis de comprendre les pratiques locales et d'établir les bases de données nécessaires à la réalisation de l'évaluation du Chapitre 1.

La méthanisation dans votre secteur:

Existe-t-il des références de projets de méthanisation sur votre territoire ?
Depuis combien de temps ce sujet est-il abordé par les agriculteurs ?
Votre organisme a-t-il participé à un (ou plusieurs) projet(s) aujourd'hui en fonctionnement ?
Quel type d'agriculteurs est intéressé par la méthanisation à la ferme? Ou collective?
Quelle est l'image de la méthanisation du point de vue agronomique? Economique? De la gestion et du traitement des déchets?
Quel est le niveau actuel d'informations sur le sujet ?

Accompagnement mis en place par la chambre:

Avez-vous mis en place des prestations d'études techniques ou agronomiques en rapport avec les projets de méthanisation ?
Quel est le diamètre de ces prestations ?
Avez-vous organisé des formations ou orienter des agriculteurs vers certaines d'entre elles ?
Ces formations étaient-elles réalisées par des associations, des bureaux d'études ou des développeurs ?

Positionnement et perspectives:

Combien de projets accompagnez-vous aujourd'hui sur le territoire ?
Avez-vous réalisé des prestations pour des développeurs de projets collectifs ? Sinon accepteriez-vous de le faire ?
Quels modèles de projets pensez-vous être les plus à même de se développer?
Pensez-vous que la méthanisation collective agricole est une bonne solution pour les agriculteurs ne disposant pas des fonds ou du temps pour monter un projet individuel « à la ferme » ?

Pratiques élevage :

Conduites des exploitations :

Nombre de tête moyen par type d'animaux (bovin lait, viande, équidés, caprins, ovins, volailles, porcins)
Nombre de mois passés en bâti? Période? (bovins lait et viande?)

Gestion et type d'effluents

Quel type de stabulation est privilégié ? Plutôt en fumier (fumier accumulé, air de paillage, litière) ou lisier (lisier, eau blanche, eau verte, raclage de fosses non couverte)?
Quel est la répartition du pourcentage fumier/lisier ? Pour chaque type de production animale

Questions supplémentaires filière

Taille moyenne des exploitations en UGB ? Système intensif/extensif ?
Pouvez-vous nous fournir une grille des caractéristiques NPK des effluents de votre secteur ?
Y'a-t-il une évolution des pratiques en cours, ou une concentration des élevages, qui pourraient faire changer significativement ses données ?
Tendance d'évolution ? Par rapport aux mises aux normes, à la labellisation ?

Coproduits agricoles (menue paille ,paille de colza, canne de maïs...) et échanges de matières :

Y'a-t-il des filières en place sur les coproduits agricoles ? Des acteurs qui valorisent l'un des coproduits précités ?
Qui sont les producteurs de paille, plutôt les éleveurs ou les céréaliers? En %
Y'a-t-il une tension sur la <u>paille de céréales</u> ? Quel est leur mode de valorisation : mulching/ enfouissement? Export (valorisation locale ou pas) ?
Mêmes questions pour le <u>colza</u> : Y'a-t-il une tension sur la paille de colza? Quel est leur mode de valorisation : mulching/ enfouissement, %? Export (valorisation locale ou pas) ou import ?
Mêmes questions pour les <u>cannes de tournesol</u> : Quel est leur mode de valorisation : mulching/ enfouissement? Export (valorisation locale ou pas) ?
Les déchets de fruits/maraîchage sont-ils valorisés aujourd'hui ? (alimentation animale, compost ...)
Les cultures intermédiaires sont-elles développées sur le territoire ? Dans quel but (couverture, production) ? Quels types d'exploitation utilisent ces systèmes ? Possibilité de récolte (portance du sol)?
Existe-t-il aujourd'hui des échanges entre les différents types d'exploitation ? Echange de matières fertilisantes, de paille ? au niveau du département ou à une échelle plus grande ?

Coproduits agricoles (menue paille ,paille de colza, canne de maïs...) et échanges de matières :

Existe-t-il des filières en place sur les coproduits agricoles ? Des acteurs qui valorisent l'un des coproduits précités ?
Existe-t-il aujourd'hui des échanges entre les différents types d'exploitation ? Echange de matières fertilisantes, de paille ? au niveau du département ou à une échelle plus grande ?
Y'a-t-il une tension sur la paille de céréales? Quel est leur mode de valorisation : mulching/enfouissement? Export (valorisation locale ou pas) ?
Mêmes questions pour le colza : Y'a-t-il une tension sur la paille de colza? Quel est leur mode de valorisation : mulching/enfouissement? Export (valorisation locale ou pas) ?
Les déchets de fruits/maraîchage sont-ils valorisés aujourd'hui ? (alimentation animale, compost ...)
Les cultures intermédiaires sont-elles développées sur le territoire ? Dans quel but (couverture, production) ? Quels types d'exploitation utilisent ces systèmes ?
Existe-t-il des systèmes de valorisation des issus de silos (en alimentation animale ou autre) ?

Exemple de tableau quantitatif issu des enquêtes territoriales sur la répartition de la production d'effluents :

Département	Vaches Laitières		Vaches Allaitantes		Porcs	Caprins	Ovins	Equins	Volaille*	
	Fumier	Lisier	Fumier	Lisier	Lisier	Fumier	Fumier	Fumier	Fumier	Lisier
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
01 AIN	81%	19%	98%	2%	100%	100%	100%	100%	68%	32%

Annexe 5 : Synthèse des temps de séjour et répartition de production d'effluents par animaux

Département	Vaches Laitières	Vaches Laitières	Vaches Allaitantes	Vaches Allaitantes	Porcs	Caprins	Ovins	Equins	Volaille		
	Fumier	Lisier	Fumier	Lisier	Lisier	Fumier	Fumier	Fumier	Fumier	Lisier	
01	Ain	81%	19%	98%	2%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
02	Aisne	85%	15%	99%	1%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
03	Allier	80%	20%	98%	2%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
04	Alpes-de-Haute-Provence	80%	20%	91%	9%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
05	Hautes-Alpes	76%	24%	73%	27%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
06	Alpes-Maritimes	80%	20%	94%	6%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
07	Ardèche	79%	21%	79%	21%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
08	Ardennes	81%	19%	97%	3%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
09	Ariège	79%	21%	95%	5%	100%	100%	100%	100%	59%	41%
10	Aube	72%	28%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
11	Aude	85%	15%	93%	7%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
12	Aveyron	75%	25%	79%	21%	100%	100%	100%	100%	59%	41%
13	Bouches-du-Rhône	80%	20%	94%	6%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
14	Calvados	79%	21%	99%	1%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
15	Cantal	69%	31%	69%	31%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
16	Charente	70%	30%	95%	5%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
17	Charente-Maritime	60%	40%	95%	5%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
18	Cher	97%	3%	98%	2%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
19	Corrèze	69%	31%	96%	4%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
2A	Corse-du-Sud	80%	20%	94%	6%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
2B	Haute-Corse	80%	20%	94%	6%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
21	Côte-d'Or	80%	20%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
22	Côtes-d'Armor	65%	35%	95%	5%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
23	Creuse	95%	5%	99%	1%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
24	Dordogne	92%	8%	97%	3%	100%	100%	100%	100%	59%	41%
25	Doubs	87%	13%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
26	Drôme	60%	40%	99%	1%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
27	Eure	80%	20%	97%	3%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
28	Eure-et-Loire	100%	0%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
29	Finistère	70%	30%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
30	Gard	80%	20%	94%	6%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
31	Haute-Garonne	83%	17%	97%	3%	100%	100%	100%	100%	59%	41%
32	Gers	92%	8%	99%	1%	100%	100%	100%	100%	59%	41%
33	Gironde	97%	3%	99%	1%	100%	100%	100%	100%	59%	41%
34	Hérault	80%	20%	94%	6%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
35	Ille-et-Vilaine	78%	22%	94%	6%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
36	Indre	87%	13%	97%	3%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
37	Indre-et-Loire	96%	4%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
38	Isère	89%	11%	99%	1%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
39	Jura	86%	14%	96%	4%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
40	Landes	59%	41%	94%	6%	100%	100%	100%	100%	59%	41%
41	Loir-et-Cher	100%	0%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	59%	41%
42	Loire	80%	20%	98%	2%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
43	Haute-Loire	84%	16%	94%	6%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
44	Loire-Atlantique	79%	21%	95%	5%	100%	100%	100%	100%	59%	41%
45	Loiret	100%	0%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
46	Lot	76%	24%	89%	11%	100%	100%	100%	100%	59%	41%
47	Lot-et-Garonne	86%	14%	99%	1%	100%	100%	100%	100%	59%	41%
48	Lozère	84%	16%	57%	43%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
49	Maine-et-Loire	86%	14%	99%	1%	100%	100%	100%	100%	59%	41%

50	Manche	74%	26%	91%	9%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
51	Marne	97%	3%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
52	Haute-Marne	86%	14%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
53	Mayenne	87%	13%	97%	3%	100%	100%	100%	100%	59%	41%
54	Meurthe-et-Moselle	82%	18%	98%	2%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
55	Meuse	73%	27%	99%	1%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
56	Morbihan	82%	18%	91%	9%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
57	Moselle	83%	17%	98%	2%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
58	Nièvre	90%	10%	98%	2%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
59	Nord	80%	20%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
60	Oise	92%	8%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
61	Orne	58%	42%	93%	7%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
62	Pas-de-Calais	85%	15%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
63	Puy-de-Dôme	62%	38%	90%	10%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
64	Pyrénées-Atlantiques	61%	39%	82%	18%	100%	100%	100%	100%	59%	41%
65	Hautes-Pyrénées	70%	30%	92%	8%	100%	100%	100%	100%	59%	41%
66	Pyrénées-Orientales	80%	20%	94%	6%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
67	Bas-Rhin	70%	30%	98%	2%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
68	Haut-Rhin	69%	31%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
69	Rhône	78%	22%	98%	2%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
70	Haute-Saône	84%	16%	98%	2%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
71	Saône-et-Loire	85%	15%	96%	4%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
72	Sarthe	78%	22%	94%	6%	100%	100%	100%	100%	59%	41%
73	Savoie	81%	19%	95%	5%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
74	Haute-Savoie	83%	17%	91%	9%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
76	Seine-Maritime	70%	30%	95%	5%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
77	Seine-et-Marne	80%	20%	94%	6%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
78	Yvelines	80%	20%	94%	6%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
79	Deux-Sèvres	65%	35%	99%	1%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
80	Somme	88%	12%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
81	Tarn	76%	24%	92%	8%	100%	100%	100%	100%	59%	41%
82	Tarn-et-Garonne	83%	17%	97%	3%	100%	100%	100%	100%	59%	41%
83	Var	80%	20%	94%	6%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
84	Vaucluse	80%	20%	94%	6%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
85	Vendée	80%	20%	97%	3%	100%	100%	100%	100%	59%	41%
86	Vienne	60%	40%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
87	Haute-Vienne	91%	9%	92%	8%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
88	Vosges	75%	25%	99%	1%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
89	Yonne	85%	15%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
90	Territoire-de-Belfort	69%	31%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
91	Essonne	80%	20%	94%	6%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
92	Hauts-de-Seine	80%	20%	94%	6%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
93	Seine-Saint-Denis	80%	20%	94%	6%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
94	Val-de-Marne	80%	20%	94%	6%	100%	100%	100%	100%	68%	32%
95	Val-d'Oise	80%	20%	94%	6%	100%	100%	100%	100%	68%	32%

<i>moyenne nationale</i>	80%	20%	95%	5%	100%	100%	100%	100%	100%	66%	34%
--------------------------	-----	-----	-----	----	------	------	------	------	------	-----	-----

Annexe 6 : Caractéristiques et potentiel de production de biogaz des effluents d'élevage

Les données prises en compte sur les caractéristiques des biomasses et sur les potentiels méthanogènes sont issues à la fois des enquêtes territoriales, des normes dites CORPEN ainsi que de ressources internes de METHANEO sur les pouvoirs méthanogènes des matières.

		Quantité/animal/mois en tonnes	BMP (l CH4/kg MO)	MS (% MB)	Tx MO (% MS)	MO (kg/t MB)
Vache Laitière	Fumier	1	250	23%	80%	184
	Lisier	0,7	213	9,0%	75%	67
Vache Allaitante	Fumier	1	250	23%	80%	184
	Lisier	0,7	213	9,0%	75%	67
Equin	Fumier	0,75	250	35%	80%	280
Ovin	Fumier	0,12	250	35%	80%	280
Caprin	Fumier	0,12	250	35%	80%	280
Porcin	Lisier	0,09	290	3,5%	75%	26
Volaille	Fumier	0,0012	250	57%	80%	455

		Quantité en T/ha	BMP (l CH4/kg MO)	MS (% MB)	Tx MO (% MS)	MO (kg/t MB)
Pailles de céréale	coproduit	4	250	90%	95%	855
Menue paille de céréale	coproduit	1,5	290	90%	95%	855
Rafle maïs	coproduit	2,5	250	70%	96%	672
Canne maïs	coproduit	7,5	290	50%	82%	410
Pailles de colza	coproduit	4	250	90%	90%	810
Canne de tournesol	coproduit	4	250	50%	90%	450
Vignes	coproduit	1,3	200	40%	90%	360

Annexe 7 : Résultats des essais de mobilisation de coproduits

Des essais ont été réalisés depuis 2007 sur la mobilisation des coproduits au travers du développement du projet Tiper Méthanisation développé par Methaneo, en particulier des essais sur la récolte de menues-pailles. Des résultats similaires ont été publiés par les équipementiers fournisseurs de machines permettant la récupération de ces coproduits (www.thierad.com). Les essais menés démontrent un taux de mobilisation variant de 1T /ha à 2 T/ha de menues pailles mobilisables selon les conditions de récoltes et la variété des cultures (blé, orge, colza).

Figure 75 : Photo des essais de récolte de menues paille à la ferme de Grignon (juillet 2008)



Par ailleurs, depuis 2010 des essais ont été menés sur les coproduits du maïs et du tournesol avec l'aide en partenariat avec un organisme agricole du sud ouest de la France, le GRCETA SFA (www.grcetasfa.com). Pour ces essais Methaneo a notamment participé au développement en partenariat avec un entrepreneur agricole d'une machine spécifique de récupération de coproduits du maïs et du tournesol.

Figure 76 : Exemple de résultats des essais sur la récupération de coproduits du maïs (METHANEO, GRCETA)

	Rendement (TMB/ha)	Rendement récupérateur de rafle (TMB/ha)	Taux de récolte
Broyage + andainage + bottelage	7,1	3,1	58,3%
	6,8		38,9%
Broyage + andainage + ensilage pick up	8,8	2,3	63,4%
	8,0		45,9%
Ensilage barre de coupe à assiettes	5,3	1,7	40,1%
	4,8		27,3%
Barre de coupe + Bottelage	8,1		46,3%
Barre de coupe + ensilage pick up	5,6	2,0	43,6%
	5,5		31,3%

Figure 77 : Résultats des essais de mobilisation de rafles et cannes de maïs (METHANEO et GRCETA)



Des essais similaires ont été réalisés pour les autres coproduits. Les caractéristiques des produits et quantités mobilisables sont présentées en Annexe n°6.

Les essais ont permis de déterminer les conditions de mobilisation des différents coproduits ainsi que les itinéraires techniques les plus performants. Ils ont servi à établir les hypothèses sur la quantité de matière mobilisable et sur les coûts de récolte.

Annexe 8 : Exemple des outils et études de gisements produits en interne pour Methaneo

La mise en place de l'évaluation du potentiel de production dans le Chapitre 1 a donné lieu à une production de bases de données qui ont été travaillées et recoupées soit sur des logiciels type SIG (localisation des gisements) soit sur tableur type « excel » (quantification des gisements et potentiel biogaz). Les outils «tableurs excel » et « SIG » constitués ont permis d'une part la réalisation de l'évaluation présentée dans le Chapitre 1 et d'autre part la mise en place d'outil à usage interne de METHANEO.

- Tableur d'évaluation « excel » :

Les bases de données ont été regroupées au niveau d'un tableur « excel » au sein duquel les calculs de potentiel ont été réalisés. Plusieurs niveaux de détails ont été utilisés dans la compilation des bases de données :

- Echelle nationale pour l'ensemble des coefficients de production d'effluents d'élevage et rendement coproduits, et de caractérisation des biomasses (%MS, %MO, BMP),
- Echelle départementale pour l'ensemble des coefficients sur les pratiques d'élevage (répartition fumier, lisier et temps de stabulation des animaux),
- Echelle cantonale pour la quantification des cheptels et SAU des productions végétales,

L'ensemble des calculs de l'évaluation a été réalisé à l'échelle cantonale, permettant d'avoir une synthèse canton par canton de l'ensemble des productions. Cet outil est composé de différents onglets dont les calculs nous donnent :

- Les tonnages de matière brute pour l'ensemble des cantons par type de production,
- Les tonnages de matière sèche pour l'ensemble des cantons par type de production,
- La production de biogaz pour l'ensemble des cantons par type de production,
- Un onglet de synthèse et de prospection permettant de faire des requêtes et de sélectionner les cantons répondants aux critères choisis (soit par type d'entrants, soit par quantité de production.

Figure 78 : Outil d'évaluation du potentiel biomasse et biogaz à l'échelle cantonale

TMS ISSUE DE L'ELEVAGE															
Département	Code Canton	Nom du Canton	TMS Fumier VL	TMS Lisier VL	TMS total VL	TMS Fumier VA	TMS Lisier VA	TMS total VA	TMS Equidés	TMS Caprins	TMS Ovins	TMS Porcins	TMS Fumier Volailles	TMS Lisier Volailles	TMS total Volailles
01	0101	AMBERIEU-EN-BUGEY	221	14	235	258	1	260	202	21	133	0	450	155	605
01	0102	BAGE-LE-CHATEL	2 124	136	2 261	563	3	566	334	19	37	130	516	178	694
01	0103	BELLEGARDE-SUR-VALSERINE	968	62	1 030	348	2	350	173	12	24	0	1	0	2
01	0104	BELLEY	1 069	69	1 138	366	2	368	356	16	323	0	318	110	428
01	0199	BOURG-EN-BRESSE	170	11	181	8	0	8	9	-	11	0	64	22	86
01	0106	BRENOD	1 455	93	1 548	654	4	658	132	62	226	102	1	0	1
01	0107	CEYZERIAT	2 200	141	2 342	402	2	404	558	298	232	51	62	21	83
01	0108	CHALAMONT	1 931	124	2 056	328	2	330	517	41	76	130	1 301	448	1 749
01	0109	CHAMPAGNE-EN-VALROMEY	2 148	138	2 286	596	3	599	252	51	102	0	207	71	278
01	0110	CHATILLON-SUR-CHALARONNE	6 074	390	6 464	1 272	7	1 279	1 247	691	234	847	1 191	410	1 601
01	0111	COLIGNY	3 447	222	3 669	1 238	7	1 245	731	224	154	505	547	188	735
01	0112	COLLONGES	1 732	111	1 844	33	0	33	148	37	117	0	0	0	1
01	0113	FERNEY-VOLTAIRE	1 509	97	1 606	69	0	70	113	3	104	0	4	1	5
01	0114	GEX	2 157	139	2 296	90	1	91	1 443	90	36	0	21	7	29
01	0115	HAUTEVILLE-LOMPNES	414	27	441	251	1	252	246	1	477	0	3	1	4

TMS ISSUES DES COPRODUITS DE CULTURE

TMS TOTALES

Département	Code Canton	Nom du Canton	TMS Céréales à paille	TMS Menue paille	TMS Paille enfouie	TMS Rafle Maïs	TMS Canne Maïs	TMS Paille de colza	TMS Paille Tournesol	TMS Marcs Vignes	TMS déchets fruits - légumes	TMS Elevages	TMS Cultures	TMS Total (Elevage et culture)
01	0101	AMBERIEU-EN-BUGEY	2 362	886	1 630	3 033	4 809	497	86	1	9	1 455	10 951	12 406
01	0102	BAGE-LE-CHATEL	1 858	697	-	2 343	3 716	166	78	1	102	4 041	7 102	11 143
01	0103	BELLEGARDE-SUR-VALSERINE	835	313	-	33	53	29	-	-	0	1 590	428	2 018
01	0104	BELLEY	1 562	586	-	4 260	6 754	126	46	64	3	2 628	11 839	14 467
01	0199	BOURG-EN-BRESSE	151	57	-	324	513	-	16	-	0	296	910	1 206
01	0106	BRENOD	677	254	-	18	28	-	-	-	-	2 731	299	3 030
01	0107	CEYZERIAT	1 080	405	-	777	1 232	25	10	4	-	3 967	2 453	6 420
01	0108	CHALAMONT	6 710	2 516	3 953	3 323	5 270	1 134	608	-	2	4 898	16 807	21 705
01	0109	CHAMPAGNE-EN-VALROMEY	2 585	969	-	618	980	65	-	5	-	3 568	2 637	6 205
01	0110	CHATILLON-SUR-CHALARONNE	11 750	4 406	3 713	6 092	9 660	2 142	324	1	2	12 363	26 340	38 703
01	0111	COLIGNY	2 984	1 119	-	2 434	3 860	187	12	1	-	7 262	7 614	14 876
01	0112	COLLONGES	2 160	810	400	103	164	209	52	16	2	2 179	1 756	3 935
01	0113	FERNEY-VOLTAIRE	2 192	822	649	299	475	173	-	1	1	1 901	2 419	4 319
01	0114	GEX	2 556	959	-	313	497	108	-	-	1	3 985	1 877	5 862
01	0115	HAUTEVILLE-LOMPNES	277	104	-	12	19	-	-	-	-	1 420	136	1 556

L'ensemble des données de production cantonales ont ensuite été agglomérées à l'échelle départementale et régionale. Les résultats obtenus nous permettent d'avoir une approche quantitative du potentiel de production de biomasse sur l'ensemble du territoire.

Les résultats obtenus à différentes échelles ont permis la constitution de nouvelles bases de données exploitables sous « SIG ».

Figure 79 : Exemple d'évaluation quantitative à l'échelle du départementale (département de l'Yonne)

DEPARTEMENT : 89 YONNE

Département : YONNE 89

SAU totale : 419 410 ha

Surface du département : 7 460 km²

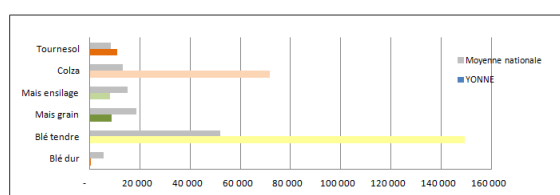
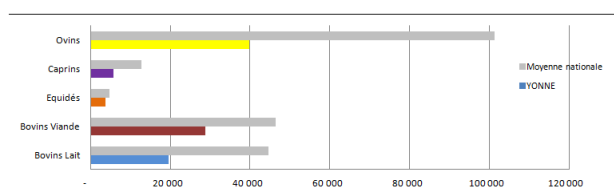
SITUATION DU DEPARTEMENT A L'ECHELLE NATIONALE				
	Nombre de têtes*	Rang du département	Meilleur département	Moyenne nationale
Bovins Lait	19 282	54	MANCHE	262 732
Bovins Viande	28 503	49	SAONE-ET-LOIRE	222 388
Equidés	3 626	55	MANCHE	20 864
Caprins	5 605	43	DEUX-SEVRES	243 401
Ovins	39 507	55	AVEYRON	1 172 424
Volailles (10*3)	2 274	28	COTES-D'ARMOR	37 246
Porcs	82 634	28	COTES-D'ARMOR	2 843 887

	SAU (ha)	Rang du département	Meilleur département	Moyenne nationale
Blé dur	68	44	HAUTE-GARONNE	50 224
Blé tendre	149 117	9	EURE-ET-LOIR	195 012
Mais grain	8 357	47	LANDES	135 635
Mais ensilage	7 762	45	ILLE-ET-VILAINE	86 807
Colza	71 595	1	YONNE	71 595
Tournesol	10 690	19	GERS	61 255
Vignes	6 166	29	GIRONDE	124 934
Carottes	5	70	GIRONDE	2 711
Melons	1	62	DEUX-SEVRES	2 628
Vergers	618	36	DROME	16 316

SITUATION DU DEPARTEMENT A L'ECHELLE NATIONALE				
	Densité (betes/km ²)	Indicateur PP	Indicateur MP	Indicateur GP
Bovins Lait	4,60	8,8	3,9	2,2
Bovins Viande	6,80	17,7	7,9	4,4
Equidés	0,86	10,1	4,5	2,5
Caprins	1,34	42,1	18,7	10,5
Ovins	9,42	126,3	56,1	31,6
Volailles	0,54	31,6	14,0	7,9
Porcs	19,70	65,5	29,1	16,4

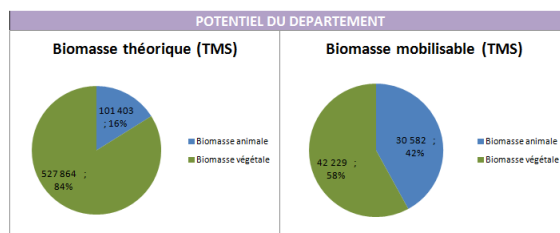
	Densité (ha/km ²)	Indicateur PP	Indicateur MP	Indicateur GP
Menue paille de blé	20,00	5,9	2,6	1,5
Paille de colza	9,60	2,2	1,0	0,6
Canne de maïs	1,12	3,6	1,6	0,9
Rafle de maïs	1,04	3,8	1,7	0,9
Canne de tournesol	1,43	1,6	0,7	0,4

SITUATION DU DEPARTEMENT A L'ECHELLE NATIONALE		
Nombre IAA	Rang	Moyenne nationale
20	62	40



POTENTIEL DU DEPARTEMENT			
	Biomasse théorique (TMS)	Biomasse mobilisable (TMS)	
Biomasse animale	101 403	30 582	
Biomasse végétale	527 864	42 229	
Total :	629 268	72 811	

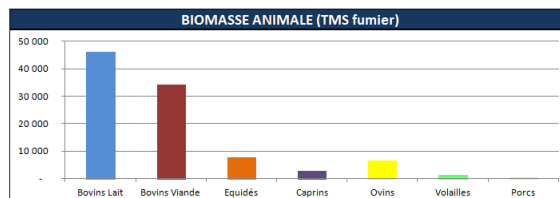
	Biomasse théorique (TMS)	Biomasse mobilisable (TMS)
Projets potentiels	4000 TMS	157



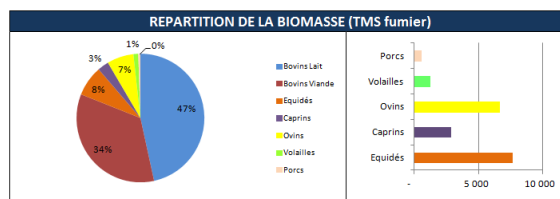
Département : YONNE

SAU totale : 419 410 ha

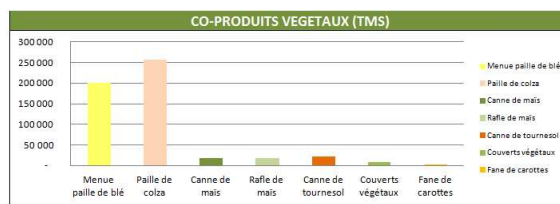
BIOMASSE ANIMALE					
	Nombre de têtes*	Fumiers Total (T)	Lisier Total (m ³)	Fumier mobilisable (T)	Lisier mobilisable (m ³)
Bovins Lait	19 282	231 384	-	69 415	-
Bovins Viande	28 503	142 515	-	42 755	-
Equidés	3 626	21 756	-	6 527	-
Caprins	5 605	8 071	-	2 421	-
Ovins	39 507	18 963	-	5 689	-
Volailles	2 274 033	3 056	0	917	0
Porcs	82 634	1 785	87 460	535	26 238
Total :		427 531	87 460	128 259	26 238



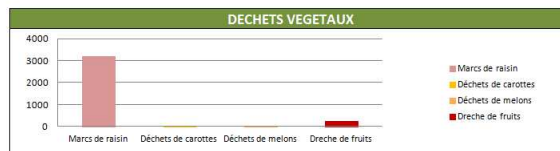
BIOMASSE ANIMALE					
	Nombre de têtes*	Fumiers Total (TMS)	Lisier Total (TMS)	Fumier mobilisable (TMS)	Lisier mobilisable (TMS)
Bovins Lait	19 282	46 277	-	13 883	-
Bovins Viande	28 503	34 204	-	10 261	-
Equidés	3 626	7 615	-	2 844	-
Caprins	5 605	2 825	-	847	-
Ovins	39 507	6 637	-	1 991	-
Volailles	2 274 033	1 223	0	367	0
Porcs	82 634	535	2 624	161	787
Total :		98 780	2 624	29 795	787



CO-PRODUITS VEGETAUX					
	SAU (ha)*	Biomasse théorique (t)	Biomasse théorique (TMS)	Biomasse mobilisable (t)	Biomasse mobilisable (TMS)
Menue paille de blé	149 185	223 778	201 400	17 902	16 112
Paille de colza	71 595	286 380	257 742	22 910	20 619
Canne de maïs	8 357	50 142	18 553	4 011	1 484
Rafle de maïs	8 357	25 071	17 550	2 006	1 404
Canne de tournesol	10 690	42 760	21 380	3 421	1 710
Couverts végétaux	7 762	31 048	7 762	2 484	621
Fane de carottes	5	100	20	8	2
Total :		659 279	524 406	52 742	41 952



DECHETS VEGETAUX					
	SAU (ha)*	Biomasse théorique (t)	Biomasse théorique (TMS)	Biomasse mobilisable (t)	Biomasse mobilisable (TMS)
Marc de raisin	6166	8016	3206	641	257
Déchets de carottes	5	60	5	5	0
Déchets de melons	1	2	0	0	0
Dreche de fruits	618	1236	247	99	20
Total :		9 314	3 458	745	277



Cet outil à plusieurs applications au sein de l'entreprise. En premier lieu il permet de faire un état de l'art des gisements mobilisables et de dégager les grandes tendances des productions du département. Il permet ainsi au développeur en charge de la zone d'avoir une connaissance globale du territoire sur lequel il opère. En second lieu cet outil peut être utilisé pour de la prospection et l'aide à la décision en orientant le choix de développement des futurs projets sur les départements présentant le plus fort potentiel, que ce soit un potentiel quantitatif (par exemple un développement sur les départements avec le plus de biomasse) ou qualitatif (par exemple le développement sur les départements avec le plus de cannes de maïs).

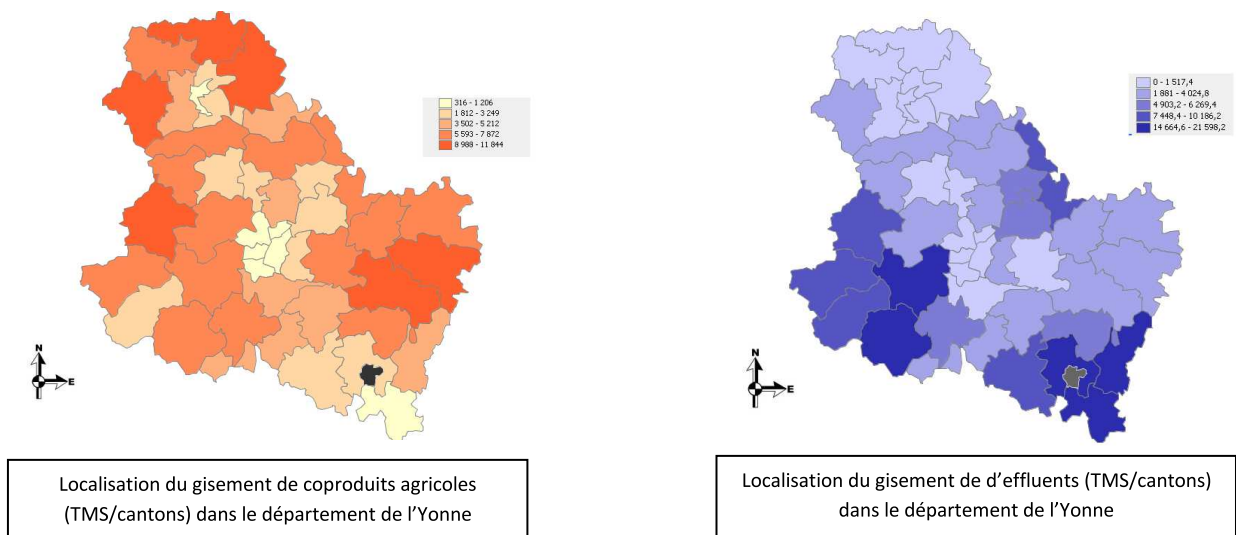
- Outil cartographique « SIG » :

Les résultats de l'évaluation ont été modélisés grâce au logiciel « SIG » QGis, nous permettant d'avoir une approche graphique des résultats. Cette forme de modélisation permet de renseigner la production de biomasse et de biogaz d'un point de vue qualitatif et d'appréhender la nuance des résultats selon l'échelle d'évaluation. Cela nous permet ainsi :

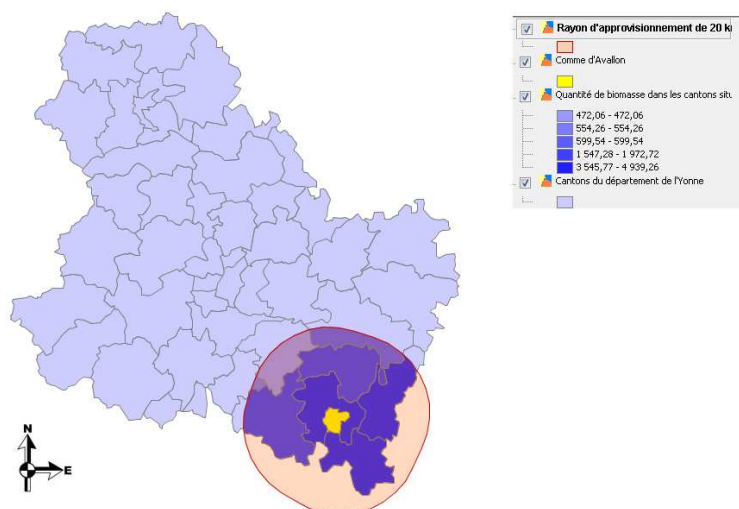
- De comparer et d'évaluer entre elles les différentes productions à l'échelle d'un territoire et de comprendre si certains gisements sont présents de façon homogène ou hétérogène (concentration d'une production animale ou végétale dans un territoire).
- De comparer et d'évaluer entre eux les territoires déterminant ainsi si des zones sont plus favorables que d'autres selon les choix de productions.
- De réaliser une étude de gisement sur un territoire donné.

L'outil « SIG » permet une exploitation très fine des données, soit par l'utilisation de requêtes et la sélection de territoires, soit par la représentation à différentes échelles.

Figure 80 : Exemple d'une étude de gisement à une échelle départementale puis dans un rayon de 20 km autour d'Avallon (échelle territoriale).

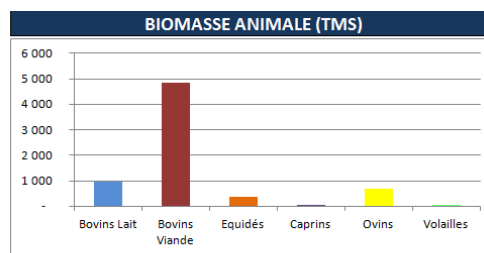


Localisation de la biomasse disponible à l'échelle territoriale de 20 km
autour de la commune d'Avalon

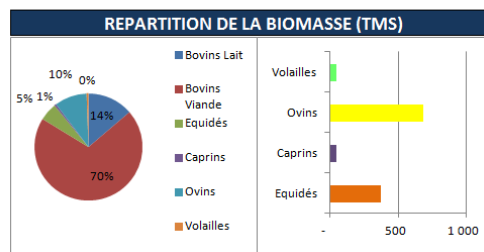


Quantité de biomasse disponible à l'échelle territoriale de 20 km autour
de la commune d'Avalon

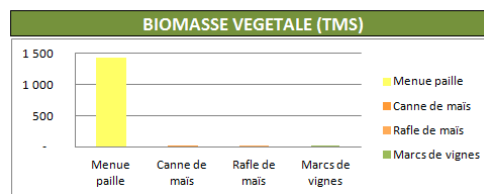
BIOMASSE ANIMALE					
	Nombre de têtes*	Fumiers Total (T)	Lisier Total (m3)	Fumier mobilisable (T)	Lisier mobilisable (m3)
Bovins Lait	1 881	15 803	6 773	4 741	2 032
Bovins Viande	13 411	67 056	-	20 117	-
Equidés	585	3 512	-	1 053	-
Caprins	271	390	-	117	-
Ovins	13 355	6 410	-	1 923	-
Volailles	246 977	332	83	100	25
Porcs	7 555	-	7 996	-	2 399
Total :		93 504	14 852	28 051	4 456



BIOMASSE ANIMALE					
	Nombre de têtes*	Fumiers Total (TMS)	Lisier Total (TMS)	Fumier mobilisable (TMS)	Lisier mobilisable (TMS)
Bovins Lait	1 881	3 161	474	948	142
Bovins Viande	13 411	16 094	-	4 828	-
Equidés	585	1 229	-	369	-
Caprins	271	137	-	41	-
Ovins	13 355	2 244	-	673	-
Volailles	246 977	133	8	40	2
Porcs	7 555	-	240	-	72
Total :		22 996	482	6 899	145

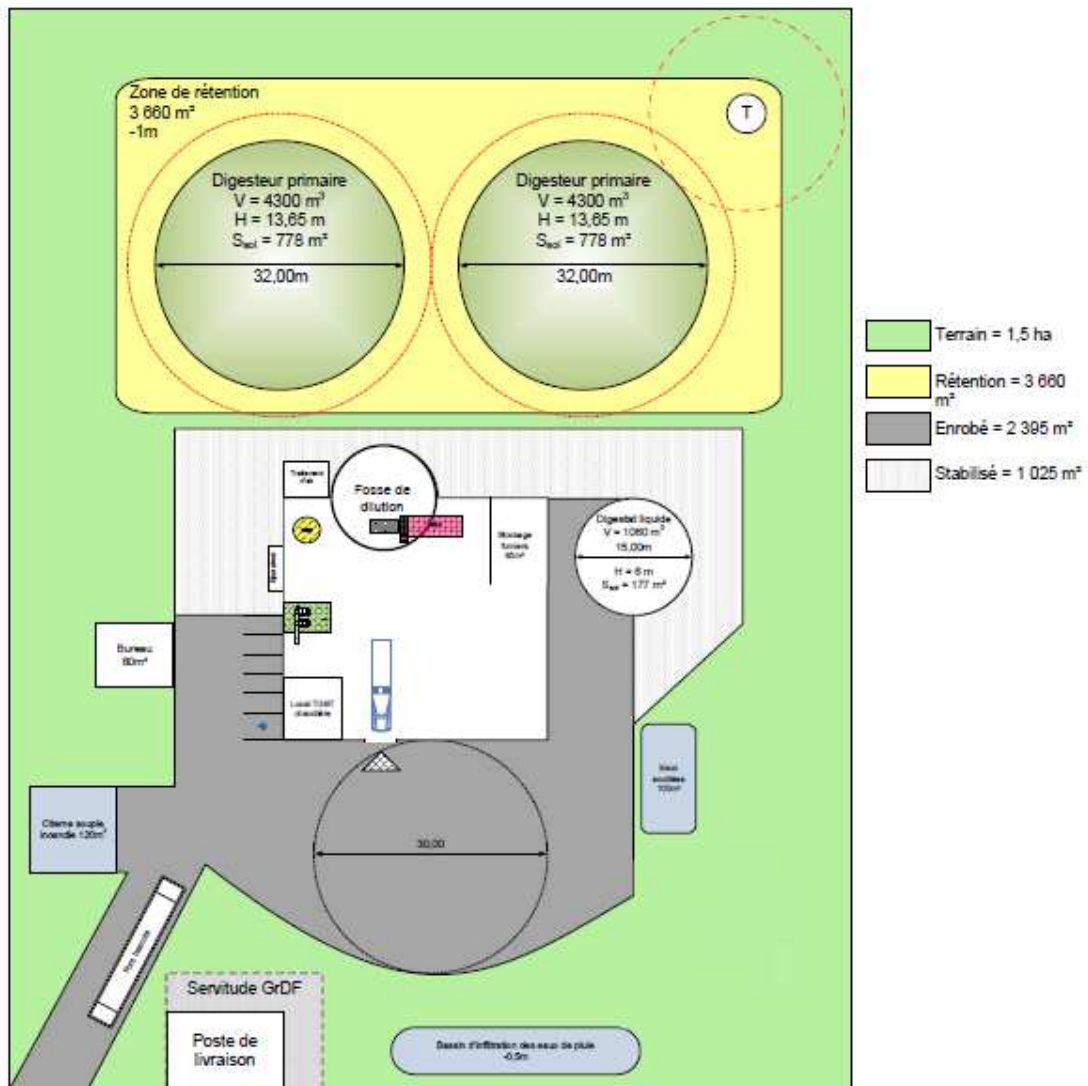


BIOMASSE VEGETALE					
	SAU (ha)*	Biomasse théorique (T)	Biomasse théorique (TMS)	Biomasse mobilisable (T)	Biomasse mobilisable (TMS)
Menue paille	21 125	31 688	28 519	1 584	1 426
Canne de maïs	47	188	94	9	5
Rafle de maïs	47	70	35	4	2
Marc de vignes	143	186	74	9	4
Total :		32 132	28 722	1 607	1 436



L'utilisation couplée des outils de représentation SIG et de simulation biomasse permet de réaliser des études de gisements à l'échelle d'une commune selon le choix d'un rayon d'approvisionnement. Cet outil est principalement utilisé dans la phase d'étude de faisabilité.

Annexe 9 : Exemple d'implantation standard d'un « modèle type » 20 000T GrDF



Annexe 10 : Spécification technique du biométhane et de l'injection réseau

Le biométhane produit sur le site de méthanisation doit répondre à des caractéristiques techniques précises avant d'être injecté sur le réseau. Il doit notamment répondre aux prescriptions techniques du gestionnaire de réseau. Le biométhane doit notamment subir une épuration poussée pour atteindre une composition proche de celle du gaz naturel. L'ensemble des textes réglementaires et techniques se retrouve sur le site www.injectionbiométhane.fr

Prescriptions à respecter :

Caractéristique	Spécification
Pouvoir Calorifique Supérieur (conditions de combustion 0 °C et 1,01325 bar)	Gaz de type H ⁽¹⁾ : 10,7 à 12,8 kWh/m ³ (n) (combustion 25°C : 10,67 à 12,77) Gaz de type B ⁽¹⁾ : 9,5 à 10,5 kWh/m ³ (n) (combustion 25°C : 9,48 à 10,47)
Indice de Wobbe (conditions de combustion 0 °C et 1,01325 bar) ⁽²⁾	Gaz de type H : 13,64 à 15,70 kWh/m ³ (n) (combustion 25°C:13,6 à 15,66) Gaz de type B : 12.01 à 13,06 kWh/m ³ (n) (combustion 25°C : 11,97 à 13,03)
Densité	Comprise entre 0,555 et 0,70
Point de rosée eau	Inférieur à -5°C à la Pression Maximale de Service du réseau en aval du Raccordement ⁽³⁾
Point de rosée hydrocarbures ⁽⁴⁾	Inférieur à -2°C de 1 à 70 bars
Teneur en soufre total	Inférieure à 30 mgS/m ³ (n)
Teneur en soufre mercaptique	Inférieure à 6 mgS/m ³ (n)
Teneur en soufre de H ₂ S + COS	Inférieure à 5 mgS/m ³ (n)
Teneur en CO ₂	Inférieure à 2,5 % (molaire)
Teneur en Tétrahydrothiophène (produit odorisant THT)	Comprise entre 15 et 40 mg/m ³ (n)
Teneur en O ₂	Inférieure à 100 ppmv
Impuretés	Gaz pouvant être transporté, stocké et commercialisé sans subir de traitement supplémentaire
Hg	Inférieur à 1 µg/m ³ (n)
Cl	Inférieur à 1 mg/m ³ (n)
F	Inférieur à 10 mg/m ³ (n)
H ₂	Inférieur à 6 %
NH ₃	Inférieur à 3 mg/m ³ (n)
CO	Inférieur à 2 %
Teneur en poussières Impuretés	Inférieure à 5 mg/m ³ (n) Gaz pouvant être transporté, stocké et commercialisé sans subir de traitement supplémentaire à l'entrée du réseau.

En cas de dysfonctionnement de l'installation ou de non-conformité du biométhane, des éléments de sécurité doivent être prévus pour la gestion du gaz non conforme (Aubry GrDF, colloque ATEE, 2010).

Annexe 11 : Exemple de dimensionnement d'un « modèle type » 20 000 T GrDF

L'ensemble des paramètres permettant l'évaluation technico-économique du Chapitre 3 ont été établis à partir de l'outil de dimensionnement développé par METHANEO. Cet outil reprend poste par poste l'ensemble des bilans matières et énergétiques. Il prend également en compte chacun des postes d'investissement liés à la réalisation du projet tel que décrit dans le Chapitre 3. L'ensemble des coûts d'exploitation relatifs au fonctionnement de l'usine sont pris en compte et le chiffre d'affaire sont également pris en compte. L'exemple présenté ici est celui du scénario CoLbLpMpPa.

Scénario : CoLbLpMpPa

Lisier Bovins	2 000	T
Lisiers porcs	10 000	T
Pailles de céréales et de colza	1 500	T
Menues Pailles	6 500	T

Dimensionnement détaillé du scénario GrDF 20 000 T CoLbLpMpPa

I. DONNEES DE BASE

I.1 Intrants			
	par jour/heure		Par an
Quantité de biomasse fraîche à traiter	55	T/J	20 000 T/an
dont quantité de matières à acheter	54,8	T/J	20 000 T/an
Quantités totales introduites en métha (dilution + recirc.)	182,7	T/J	66 676 T/an
Siscité de la matière à traiter (hors recirculation)	0,0		39%
Quantité de MS à traiter	21,2	T/J	7 730 T/an

II. PRODUCTION

II.1 Production de fertilisants			
Masse de biogaz produit	11,3	T/j	4 138 T/an
Quantité de digestat brut	45,3	T/j	16 538 T/an
II.2 Production énergétique			
Production de biogaz	390	Nm3/h	3 419 963 Nm3/an
Production de méthane	234	Nm3/h	2 051 978 Nm3/an
Production théorique d'énergie	2 328	kW.h/h	20 396 658 kW.h/an
Injection			
Débit moyen de biométhane injecté	212	Nm3/h	1 854 226 Nm3/an
Débit maximal de biométhane injecté	217	Nm3/h	
Capacité maximal d'injection (virtuel pour calcul tarif)	223	Nm3/h	
Quantité totale annuelle injectée (PCI)	2 041	kW.h/h	17 878 079 kW.h/an
Quantité totale annuelle injectée (PCS)	2 217	kW.h/h	19 424 875 kW.h/an

III. BILANS ENERGETIQUES

III.1 Bilan thermique			
Données de production d'énergie thermique		par heure	Par an
Production thermique sous forme d'eau chaude		117 kW.h/h	1 023 546 kW.h/an
Données de consommation d'énergie thermique		par heure	
Thermies pour réchauffage (eau chaude)		61 kW.h/h	538 611 kW.h/an
Pertes au niveau des digesteurs et des canalisations		61 kW.h/h	530 181 kW.h/an
Thermies pour réchauffage eaux de lavage		3 kW.h/h	23 581 kW.h/an
Données de récupération d'énergie thermique		par heure	
Thermies récupérées		8 kW.h/h	68 828 kW.h/an
Bilan		par heure	
Production thermique (eau chaude)		125 kW.h/h	1 092 374 kW.h/an
Valorisation thermique interne (eau chaude)		125 kW.h/h	1 092 374 kW.h/an

III.2 Bilan électrique			
Electricité pour la préparation	128 kW.h/h	382 391	kW.h/an
Electricité pour la méthanisation	71 kW.h/h	217 178	kW.h/an
Electricité pour valorisation du biogaz	155 kW.h/h	919 799	kW.h/an
Electricité pour les équipements communs	26 kW.h/h	128 950	kW.h/an
Consommation totale d'énergie électrique en soutirage		1 648 318	kW.h/an

IV. INVESTISSEMENTS

IV.1. Etudes

Etudes de développement	408 726	Euros
Etudes internes : Methaneo et partenaires	284 203	Euros
Etudes externes hors process	55 262	Euros
Etudes externes liées aux raccordements (GRT, Grdf, Erdg, ...)	14 000	Euros
Etudes externes d'ingénierie process	55 262	Euros

IV.2. Investissements communs

Bâtiment et communs (hors imprévus)	1 818 330	Euros
Achat et aménagement du terrain	374 000	Euros
VRD (pont bascule et clôture compris)	230 447	Euros
Gros Œuvre process	461 668	Euros
Gros Œuvre bâtiment	180 980	Euros
Bâtiments (charpente, bardage, élec, ...)	286 200	Euros
Alimentation électrique process	10 269	Euros
Maîtrise d'Œuvre + Etudes d'ingénieries	92 800	Euros
AMO / Contrôle technique et SPS / assurances	181 966	Euros
Marge d'erreur et imprévus	127 283	Euros

IV.3. Investissements méthanisation

Equipements méthanisation (hors imprévus)	2 134 324	Euros
Reception biomasse (methalipex ou grappin)	160 000	Euros
Digestion et équipements annexes (lot principal)	1 731 712	Euros
Générateur de vapeur / chaudière	30 000	Euros
Séparation de phases (lot principal)	60 278	Euros
Traitement d'air	36 200	Euros
Lavage des camions et des installations	14 500	Euros
Fournitures d'exploitation (outillage, pièces, laboratoire, mobilier, ...)	101 634	Euros
Marge d'erreur et imprévus	149 403	Euros

IV.4. Investissements valorisation du biogaz

Equipements injection biométhane (hors imprévus)	931 393	Euros
Epuration et gazomètre	811 393	Euros
Poste d'injection du biométhane	100 000	Euros
Raccordement / Branchement	20 000	Euros
Marge d'erreur et imprévus	65 198	Euros

IV.6. Investissement Equipements agricoles

Equipements agricoles (hors imprévus)	160 000	Euros
Equipements transport / manutention	160 000	Euros
Marge d'erreur et imprévus	11 200	Euros

Etudes développement	408 726	Euros
Bâtiment et communs	1 818 330	Euros
Equipements process méthanisation	2 134 324	Euros
Equipements valorisation biogaz	931 393	Euros
Equipements agricoles	160 000	Euros
Besoin en fond de roulement	200 174	Euros
Marge d'erreur et imprévus	353 083	Euros
Total investissement méthanisation	6 006 030	Euros

V. CHIFFRE D'AFFAIRE

V.1. Vente d'énergie

Vente de biométhane	10,02 cts€/kW.h	1 946 840	Euros/an
---------------------	-----------------	-----------	----------

V.2. Redevance traitement de déchets

Redevance de traitement de déchets	0	Euros/an
------------------------------------	---	----------

V.3. Vente de fertilisants excédentaires

Vente digestats résiduels après échanges	0	Euros/an
--	---	----------

Total chiffre d'affaire projet		1 946 840	Euros/an
---------------------------------------	--	------------------	-----------------

VI. COÛTS D'EXPLOITATION

VI.1. Coûts variables d'exploitation				
Coûts variables d'exploitation			716 719	Euros/an
Coûts de récolte des coproduits			592 500	Euros/an
Charges de transport			117 527	Euros/an
Charges d'épandage digestats			6 692	Euros/an
Achat d'énergie fossile			0	Euros/an
VI.2. Coûts fixes				
Coûts fixes d'exploitation			439 334	Euros/an
Frais de gestion			39 200	Euros/an
Suivi équipements, forfait maintenance et garantie disponibilité			40 500	Euros/an
Gestion annuelle biomasse / digestat (dont suivi agronomique)			19 400	Euros/an
Reporting, Réglementation et Sécurité			14 900	Euros/an
Conduite quotidienne de l'exploitation et astreinte			60 800	Euros/an
Abonnements divers (elec, gaz, utilités)			101 500	Euros/an
Achat d'électricité			115 382	Euros/an
Primes d'assurances			47 652	Euros/an
VI.3. Coûts de maintenance méthanisation				
	Consommables	Maintenance	Total	
Coûts d'exploitation poste par poste méthanisation	4 088	23 784	27 872	Euros/an
Réception hors SPA et stockage	0	8 400	8 400	Euros/an
Méthanisation	2 736	9 947	12 683	Euros/an
Générateur de vapeurs / Chaudières	0	945	945	Euros/an
Séparation de phases	0	3 199	3 199	Euros/an
Lavage des camions	1 352	152	1 504	Euros/an
Traitement d'air	0	1 140	1 140	Euros/an
VI.4. Coûts de maintenance valorisation du biogaz				
	Consommables	Maintenance	Total	
Coûts d'exploitation poste par poste en injection	865	47 944	48 809	Euros/an
Epuration de biogaz	865	46 894	47 759	Euros/an
Injection du biométhane	0	1 050	1 050	Euros/an
Marge d'erreur et imprévus			0	Euros/an
Coûts variables (biomasse, transports, elec.)			716 719	Euros/an
Coûts fixes (gestion, personnel, assurances, etc.)			439 334	Euros/an
Maintenance des équipements et des installations			76 681	Euros/an
Taxes diverses (CVEA, CFE, foncière, turpe, ...)			46 816	Euros/an
Total coûts d'exploitation			1 279 550	Euros/an
EXCEDENT BRUT D'EXPLOITATION (EBITDA)			667 290	Euros/an
REVENU hors subvention (EBE / investissement)			11,1%	
TEMPS DE RETOUR BRUT sur investissements hors subvention (TRB)			9,0	ans

Annexe 12 : Exemple d'un bilan Diges d'un « modèle type » 20 000 T GrDF

Un bilan environnemental a été réalisé pour chacun des scénarios étudiés dans le Chapitre 3 à partir de l'outil « Bilan DIGES » mis au point par l'ADEME. La comparaison des bilans Diges de chaque scénario nous permet de déterminer les « modèles type » dont l'approvisionnement apporte les meilleures performances environnementales. Le bilan Diges présenté à la suite correspond au scénario CoLbLpMpPa.

Résultats DIGES

12/07/2013 - 12:36

Installation : CoLbLpMpPa

RECAPITULATIF DES DONNEES MODIFIABLES PAR L'UTILISATEUR

Les déchets traités par digestion anaérobie

2000 tonnes de	lisier bovin
10000 tonnes de	lisier porcin
6500 tonnes de	paille
1500 tonnes de	Paille de céréales

composés de

% MS	N (kg / t MS)	% MO/MS	% MO/MB	Pot méth (m3 CH4 MO)	Pot méth2 (m3 CH4 MB)	MO_biod/ MO(%)
9,0	5,2	75,0	6,8	213,0	14,5	41,5%
3,5	2,9	75,0	2,8	290,0	7,5	54,9%
90,0	6,1	95,0	85,5	290,0	248,0	39,2%
90,0	4,3	95,0	85,5	250,0	214,0	73,3%

Couverture des aires de stockage

	Couvert, avec récupération du biogaz	Couvert, sans récupération du biogaz	non couvert, sans récupération du biogaz
Pré-stockage des substrats	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Post-stockage du digestat	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Énergie annuelle valorisée

	kWh
	0
	14 073 381

m³ CH₄ valorisé/h

161,6

Sources énergétiques utilisées antérieurement

	pour l'énergie thermique consommée sur place (%)	pour l'énergie thermique vendue (%)
essence	0,0	0,0
gazole ou fioul domestique	0,0	0,0
fioul lourd	0,0	0,0
gaz naturel	100,0	100,0
électricité	0,0	0,0
charbon	0,0	0,0
GPL	0,0	0,0

Utilisation de l'énergie valorisée

	autoconsommée		vendue		consommée sur place	
	kWh	%	kWh	%	kWh	%
	0,0	20,00	0,0	40,00	0,0	40,00
	2 814 676,2	20,00	11 258 704,8	80,00	0,0	0,00

RESULTATS

Afficher les formules

Emissions GES par l'unité de digestion anaérobie

pré-stockage du déchet		digestion anaérobie		post-stockage - traitement		épandage du digestat	
N ₂ O	CH ₄	N ₂ O	CH ₄	N ₂ O	CH ₄	N ₂ O	CH ₄
0,0	72,2	0,0	0,0	0,0	704,4	209,0	6,2
991,8 tonnes éq. CO₂							

+

Emissions GES dues aux transport des substrats vers l'unité de digestion anaérobie

substrat	digestat
éq. CO ₂	éq. CO ₂
49,5	29,9
79,4 tonnes éq. CO₂	

GES évités par la substitution au traitement des déchets

Emissions évitées en tonnes éq. CO₂ :

stockage		traitement		épandage		CSD		incinération	
N ₂ O	CH ₄	N ₂ O	CH ₄	N ₂ O	CH ₄	N ₂ O	CH ₄	N ₂ O	CH ₄
0,0	288,9	0,0	0,0	166,1	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0
455,5 tonnes éq. CO₂									

GES évités par la substitution du transport pour le traitement de référence

Emissions évitées - transports effectués par le traitement de référence en tonnes éq. CO₂ :

substrats
éq. CO ₂
0,0

0,0 tonnes éq. CO₂

GES évités par la substitution d'énergie

Energie électrique :				Energie thermique :			
valorisée (MWh)	vendue (MWh)	sur place (MWh)	GES évités (t CO ₂)	valorisée (MWh)	vendue (MWh)	sur place (MWh)	GES évités (t CO ₂)
0,0	0,0	0,0	0,0	14 073,4	11 258,7	0,0	2 319,3
Emissions évitées - énergie :				2 319,3 tonnes éq. CO₂			

GES évités par la substitution d'engrais liée à l'épandage du digestat

Emissions évitées - fabrication d'engrais minéral :

123,4 tonnes éq. CO₂

*Nous attirons votre attention sur l'interprétation des résultats.
Par exemple, une incertitude de 20% a pu être obtenue en faisant varier les seuls paramètres de composition des substrats*

Emissions nettes

Emissions nettes :

-1 826,9 tonnes éq. CO₂

● feu vert = gain
● feu rouge = pertes

Modifier

Nouvelle simulation

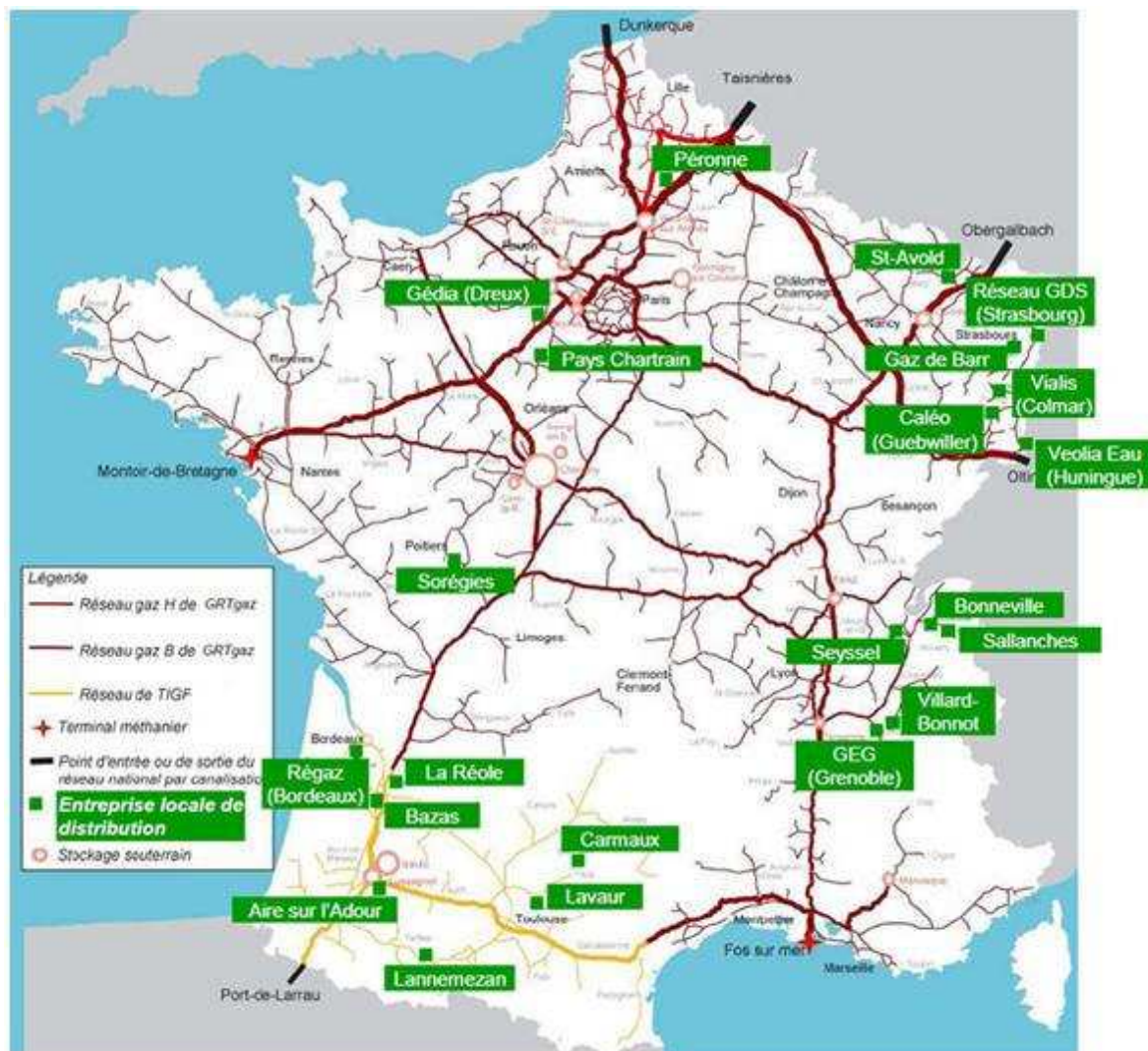
Imprimer

Enregistrer les résultats sous

Annexe 13 : Localisation des réseaux de distribution et transport de gaz naturel en France

La France est un pays dont le réseau de gaz naturel est déployé sur la majeure partie de son territoire. Le réseau est organisé pour assurer le transport du gaz à partir des terminaux méthaniers et des points d'entrée aux frontières. Le gaz est acheminé à 67 bar dans les conduites de et alimente les réseaux de distribution. Un poste de détente est installé pour assurer l'interface entre le réseau de transport et celui de distribution, ramenant le gaz transporté à une pression plus basse de 16 bar.

Figure 81 : Organisation et localisation du réseau de gaz naturel en France (Comité de la Régulation de l'énergie)



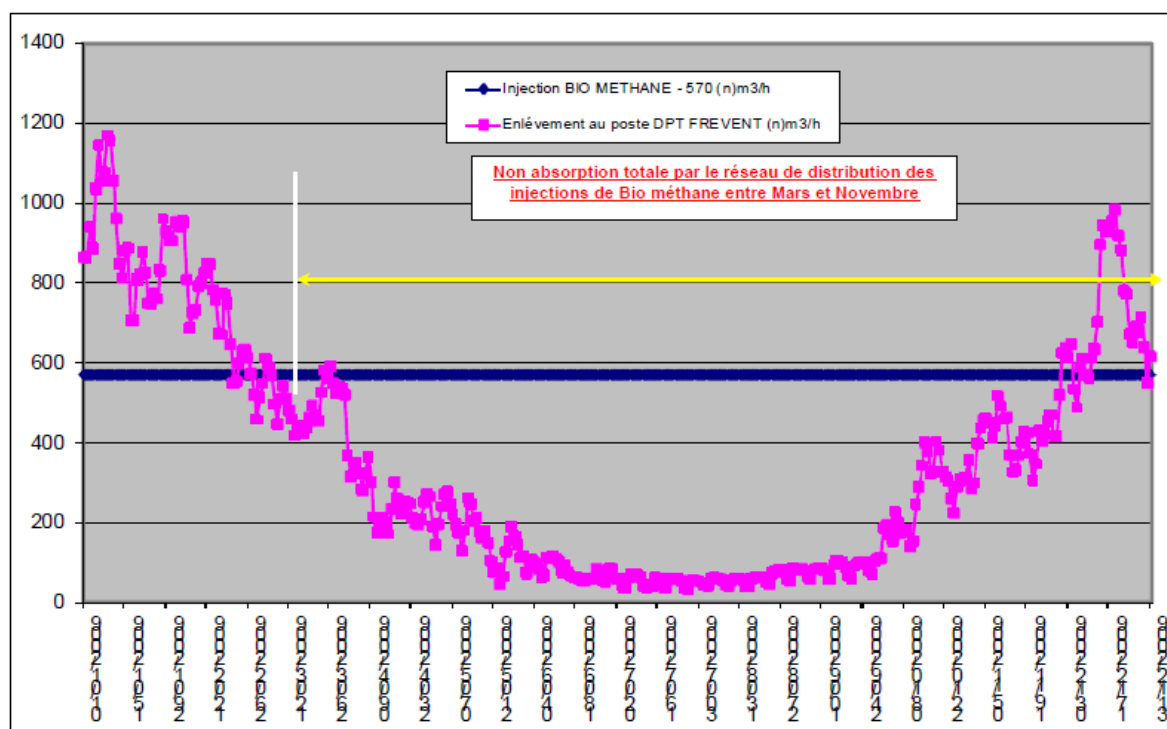
La liste des communes desservies par le réseau de gaz naturel est disponible sur les sites internet des différents opérateurs (www.GRT.com, www.tigf.com, www.grdf.com, www.spegnn.com).

Annexe 14 : Exemple d'étude de faisabilité d'injection réseau

Les gestionnaires de réseaux réalisent des études de faisabilité pour identifier les possibilités techniques de réinjection du biométhane dans les réseaux de gaz naturel. Ces études consistent à évaluer le potentiel d'injection à travers une analyse des consommations de la zone sur une année et de réaliser une approche macro-économique des coûts de raccordement.

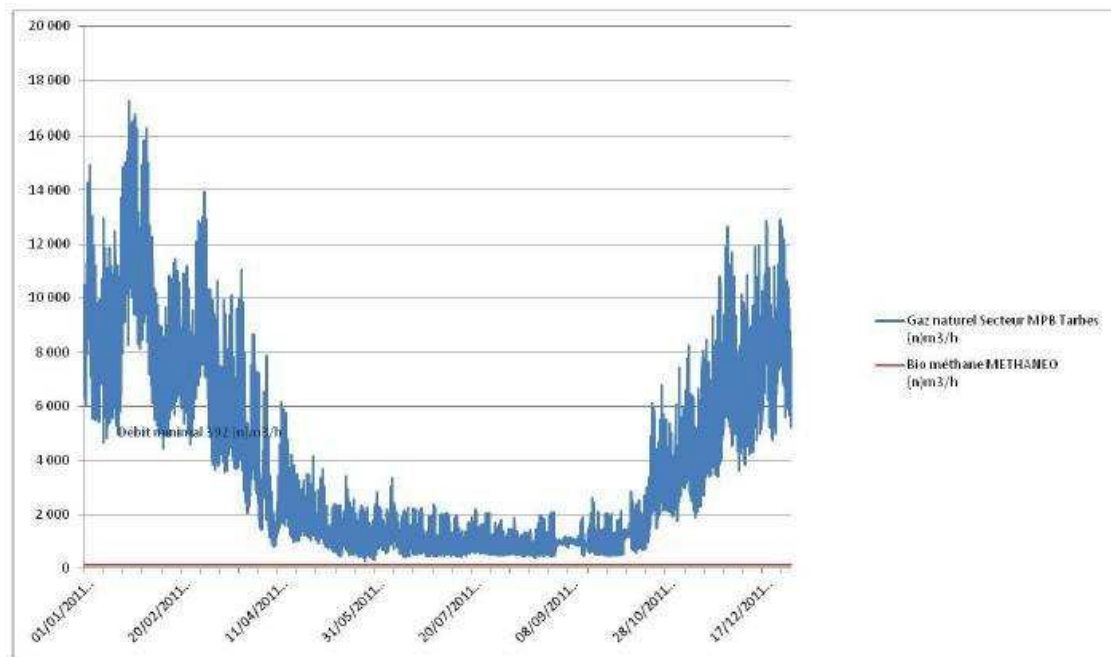
L'analyse de ces études montrent que les consommations gaz ont un profil commun quelque soit la localisation du réseau, avec des consommations en hiver très nettement supérieures à celles de l'été. Ceci étant dû aux consommations des ménages de gaz naturel pour le chauffage durant la période hivernale. Lorsque les consommations de gaz sont importantes en été, cela signifie qu'un industriel est présent sur la boucle du réseau et utilise du gaz pour son fonctionnement (chauffage, process, etc). Le tarif d'injection étant établi sur le débit maximum injecté sur l'année, il est souhaitable pour les porteurs de projets d'injecter les mêmes quantités de gaz en été et en hiver sous peine d'avoir un tarif qui ne soit pas optimal. De ce fait, les consommations en été étant plus faibles, le projet est souvent dimensionné sur le débit possible de réinjection en été (Aubry GrDF, colloque ATEE 2010).

Figure 82 : Exemple d'étude GrDF pour laquelle le débit d'injection est supérieur aux consommations gaz durant la période de l'été



Dans le cas de l'étude présentée en Figure 82, le projet en l'état n'est pas envisageable ; il faut diminuer le débit d'injection.

Figure 83 : Exemple d'étude GrDF avec un débit d'injection inférieur aux consommations de gaz durant les mois d'été



Dans le cas de l'étude présentée en Figure 83, le débit injectable est compatible avec les consommations de gaz durant les périodes d'été. Le débit de biométhane envisagé pourra donc être injecté toute l'année.

Annexe 15 : Synthèse des résultats des scénarios pour les modèles « type » en injection réseau sur le réseau de distribution

CoFclV			CoFclB			CoFvLb			CoLbMp		
Taux de MS avec recirculation entrée de digesteur	13,0%		Taux de MS avec recirculation entrée de digesteur	13,1%		Taux de MS avec recirculation entrée de digesteur	13,1%		Taux de MS avec recirculation entrée de digesteur	13,0%	
Taux de MS actuel en sortie de digesteur	8,5%		Taux de MS actuel en sortie de digesteur	8,6%		Taux de MS actuel en sortie de digesteur	8,6%		Taux de MS actuel en sortie de digesteur	7,2%	
Taux d'amoniac dans les digesteurs (g/l)	2		Taux d'amoniac dans les digesteurs (g/l)	1		Taux d'amoniac dans les digesteurs (g/l)	5		Taux d'amoniac dans les digesteurs (g/l)	0	
Quantité d'eau à ajouter (réseau ou process)	0		Quantité d'eau à ajouter (réseau ou process)	0		Quantité d'eau à ajouter (réseau ou process)	0		Quantité d'eau à ajouter (réseau ou process)	9 000	
Quantité de digestat à recirculer (uniquement digestat liq)	30 000		Quantité de digestat à recirculer (uniquement digestat liq)	31 000		Quantité de digestat à recirculer (uniquement digestat liq)	31 000		Quantité de digestat à recirculer (uniquement digestat liq)	35 000	
	20%			20%			20%			20%	
Quantité théoriquement disponible en T/an	32 860		Quantité théoriquement disponible en T/an	33 362		Quantité théoriquement disponible en T/an	33 362		Quantité théoriquement disponible en T/an	44 255	
Tonnage total	20 000	T	Tonnage total	20 000	T	Tonnage total	20 000	T	Tonnage total	20 000	T
Tonnage de MS	5 800	TMS	Tonnage de MS	5 960	TMS	Tonnage de MS	5 960	TMS	Tonnage de MS	7 470	TMS
Production biogaz	2 050 000	m3/an	Production biogaz	2 109 501	m3/an	Production biogaz	2 109 501	m3/an	Production biogaz	3 302 795	m3/an
Biométhane injecté	123	m3/h	Biométhane injecté	127	m3/h	Biométhane injecté	127	m3/h	Biométhane injecté	200	m3/h
Production énergie primaire	12 226 200	kWh/an	Production énergie primaire	12 581 064	kWh/an	Production énergie primaire	12 581 064	kWh/an	Production énergie primaire	19 697 868	kWh/an
Energie valorisée	11 260 029	kWh/an	Energie valorisée	11 611 790	kWh/an	Energie valorisée	11 611 790	kWh/an	Energie valorisée	18 327 868	kWh/an
Energie élec consommée	1 218 015	kWh/an	Energie élec consommée	1 238 623	kWh/an	Energie élec consommée	1 238 623	kWh/an	Energie élec consommée	1 607 413	kWh/an
Energie transport	10 103	l/an	Energie transport	9 969	l/an	Energie transport	9 969	l/an	Energie transport	11 825	l/an
	106 791	kWh/an		105 376	kWh/an		105 376	kWh/an		124 991	kWh/an
Investissement	6 000 000	€	Investissement	6 000 000	€	Investissement	6 000 000	€	Investissement	6 000 000	€
Vente énergie	1 289 840	€/an	Vente énergie	1 320 224	€/an	Vente énergie	1 320 224	€/an	Vente énergie	1 869 298	€/an
Coûts d'exploitation usine	493 986	€/an	Coûts d'exploitation usine	497 331	€/an	Coûts d'exploitation usine	497 331	€/an	Coûts d'exploitation usine	552 474	€/an
Coûts exploitation transport bioma	119 647	€/an	Coûts exploitation transport bioma	117 970	€/an	Coûts exploitation transport bioma	117 970	€/an	Coûts exploitation transport bioma	141 204	€/an
Coûts de mobilisation biomasse h	8 579	€/an	Coûts de mobilisation biomasse h	7 087	€/an	Coûts de mobilisation biomasse h	7 087	€/an	Coûts de mobilisation biomasse h	552 765	€/an
Chiffre d'Affaire Total	1 289 840	€/an	Chiffre d'Affaire Total	1 320 224	€/an	Chiffre d'Affaire Total	1 320 224	€/an	Chiffre d'Affaire Total	1 869 298	€/an
Coûts d'Exploitation Totaux	622 211	€/an	Coûts d'Exploitation Totaux	622 388	€/an	Coûts d'Exploitation Totaux	622 388	€/an	Coûts d'Exploitation Totaux	1 246 442	€/an
EBE	667 629	€/an	EBE	697 836	€/an	EBE	697 836	€/an	EBE	622 856	€/an
EBE/INV	11,13%		EBE/INV	11,63%		EBE/INV	11,63%		EBE/INV	10,38%	
Ration valorisation énergie	81%		Ration valorisation énergie	82%		Ration valorisation énergie	82%		Ration valorisation énergie	84%	
KWh produits par Kwh dépensé	8,50	kWh/kWh	KWh produits par Kwh dépensé	8,64	kWh/kWh	KWh produits par Kwh dépensé	8,64	kWh/kWh	KWh produits par Kwh dépensé	10,58	kWh/kWh

Référence	Composition des intrants
CoFclV	Fumier Cheval x Lisier Volaille
CoFclB	Fumier Cheval x Lisier Bovin
CoFvLb	Fumier Volaille x Lisier Bovin
CoLbMp	Lisier Bovins x Menues Pailles

CoFvMr			CoPaMr			CoCtMr			CoLpFbPaMr		
Taux de MS avec recirculation entrée de digesteur	12,8%		Taux de MS avec recirculation entrée de digesteur	13,2%		Taux de MS avec recirculation entrée de digesteur	13,4%		Taux de MS avec recirculation entrée de digesteur	13,1%	
Taux de MS actuel en sortie de digesteur	8,8%		Taux de MS actuel en sortie de digesteur	8,8%		Taux de MS actuel en sortie de digesteur	8,5%		Taux de MS actuel en sortie de digesteur	8,4%	
Taux d'amoniac dans les digesteurs (g/l)	2		Taux d'amoniac dans les digesteurs (g/l)	0		Taux d'amoniac dans les digesteurs (g/l)	0		Taux d'amoniac dans les digesteurs (g/l)	0	
Quantité d'eau à ajouter (réseau ou process)	10 000		Quantité d'eau à ajouter (réseau ou process)	10 000		Quantité d'eau à ajouter (réseau ou process)	5 000		Quantité d'eau à ajouter (réseau ou process)	8 000	
Quantité de digestat à recirculer (uniquement digestat liq)	35 000		Quantité de digestat à recirculer (uniquement digestat liq)	45 000		Quantité de digestat à recirculer (uniquement digestat liq)	45 000		Quantité de digestat à recirculer (uniquement digestat liq)	40 000	
	20%			25%			25%			25%	
Quantité théoriquement disponible en T/an	42 045		Quantité théoriquement disponible en T/an	48 344		Quantité théoriquement disponible en T/an	48 050		Quantité théoriquement disponible en T/an	49 022	
Tonnage total	20 000	T	Tonnage total	13 300	T	Tonnage total	17 500	T	Tonnage total	20 400	T
Tonnage de MS	7 500	TMS	Tonnage de MS	7 970	TMS	Tonnage de MS	7 950	TMS	Tonnage de MS	7 990	TMS
Production biogaz	2 372 917	m3/an	Production biogaz	2 794 792	m3/an	Production biogaz	2 972 917	m3/an	Production biogaz	2 898 077	m3/an
Biométhane injecté	138	m3/h	Biométhane injecté	168	m3/h	Biométhane injecté	181	m3/h	Biométhane injecté	173	m3/h
Production énergie primaire	14 152 075	kWh/an	Production énergie primaire	16 668 138	kWh/an	Production énergie primaire	17 730 475	kWh/an	Production énergie primaire	17 284 133	kWh/an
Energie valorisée	12 663 696	kWh/an	Energie valorisée	15 392 780	kWh/an	Energie valorisée	16 568 782	kWh/an	Energie valorisée	15 884 140	kWh/an
Energie élec consommée	1 389 927	kWh/an	Energie élec consommée	1 450 463	kWh/an	Energie élec consommée	1 527 068	kWh/an	Energie élec consommée	1 541 399	kWh/an
Energie transport	11 585	l/an	Energie transport	8 950	l/an	Energie transport	8 988	l/an	Energie transport	11 949	l/an
	122 450	kWh/an		94 606	kWh/an		95 002	kWh/an		126 300	kWh/an
Investissement	6 000 000	€	Investissement	6 000 000	€	Investissement	6 000 000	€	Investissement	6 000 000	€
Vente énergie	1 407 467	€/an	Vente énergie	1 643 536	€/an	Vente énergie	1 736 514	€/an	Vente énergie	1 680 983	€/an
Coûts d'exploitation usine	516 926	€/an	Coûts d'exploitation usine	500 631	€/an	Coûts d'exploitation usine	531 233	€/an	Coûts d'exploitation usine	553 509	€/an
Coûts exploitation transport bioma	137 615	€/an	Coûts exploitation transport bioma	105 105	€/an	Coûts exploitation transport bioma	106 958	€/an	Coûts exploitation transport bioma	142 450	€/an
Coûts de mobilisation biomasse h	21 134	€/an	Coûts de mobilisation biomasse h	381 033	€/an	Coûts de mobilisation biomasse h	484 151	€/an	Coûts de mobilisation biomasse h	405 065	€/an
Chiffre d'Affaire Total	1 407 467	€/an	Chiffre d'Affaire Total	1 643 536	€/an	Chiffre d'Affaire Total	1 736 514	€/an	Chiffre d'Affaire Total	1 680 983	€/an
Coûts d'Exploitation Totaux	675 675	€/an	Coûts d'Exploitation Totaux	986 768	€/an	Coûts d'Exploitation Totaux	1 122 342	€/an	Coûts d'Exploitation Totaux	1 101 025	€/an
EBE	731 792	€/an	EBE	656 768	€/an	EBE	614 172	€/an	EBE	579 958	€/an
EBE/INV	12,20%		EBE/INV	10,95%		EBE/INV	10,24%		EBE/INV	9,67%	
Ration valorisation énergie	79%		Ration valorisation énergie	83%		Ration valorisation énergie	84%		Ration valorisation énergie	82%	
KWh produits par Kwh dépensé	8,37	kWh/kWh	KWh produits par Kwh dépensé	9,96	kWh/kWh	KWh produits par Kwh dépensé	10,21	kWh/kWh	KWh produits par Kwh dépensé	9,52	kWh/kWh

Référence	Composition des intrants
CoFvMr	Fumier Volaille x Marcs raisin
CoPaMr	Paille x Marcs Raisins
CoCtMr	Canne Tournesol x Marcs R
CoLpFbPaMr	Porc-FBovin-Paille-Raisin

CoLvFcMpMr			CoLpBIFvCmRm			CoLbLpMpPa			MpLb		
Taux de MS avec recirculation entrée de digesteur	13,2%		Taux de MS avec recirculation entrée de digesteur	13,3%		Taux de MS avec recirculation entrée de digesteur	13,4%		Taux de MS avec recirculation entrée de digesteur	8,7%	
Taux de MS actuel en sortie de digesteur	8,1%		Taux de MS actuel en sortie de digesteur	8,2%		Taux de MS actuel en sortie de digesteur	7,6%		Taux de MS actuel en sortie de digesteur	5,2%	
Taux d'amoniac dans les digesteurs (g/l)	1		Taux d'amoniac dans les digesteurs (g/l)	1		Taux d'amoniac dans les digesteurs (g/l)	0		Taux d'amoniac dans les digesteurs (g/l)	2	
Quantité d'eau à ajouter (réseau ou process)	8 000		Quantité d'eau à ajouter (réseau ou process)	0		Quantité d'eau à ajouter (réseau ou process)	0		Quantité d'eau à ajouter (réseau ou process)	0	
Quantité de digestat à recirculer (uniquement digestat liq)	40 000		Quantité de digestat à recirculer (uniquement digestat liq)	43 000		Quantité de digestat à recirculer (uniquement digestat liq)	46 000		Quantité de digestat à recirculer (uniquement digestat liq)	0	
	25%			25%			25%			20%	
Quantité théoriquement disponible en T/an	48 663		Quantité théoriquement disponible en T/an	48 589		Quantité théoriquement disponible en T/an	48 231		Quantité théoriquement disponible en T/an	15 999	
Tonnage total	19 300	T	Tonnage total	24 500	T	Tonnage total	20 000	T	Tonnage total	20 001	T
Tonnage de MS	7 945	TMS	Tonnage de MS	7 993	TMS	Tonnage de MS	7 730	TMS	Tonnage de MS	1 801	TMS
Production biogaz	3 148 392	m3/an	Production biogaz	3 178 758	m3/an	Production biogaz	3 419 963	m3/an	Production biogaz	631 194	m3/an
Biométhane injecté	190	m3/h	Biométhane injecté	194	m3/h	Biométhane injecté	212	m3/h	Biométhane injecté	32	m3/h
Production énergie primaire	18 777 008	kWh/an	Production énergie primaire	18 958 115	kWh/an	Production énergie primaire	20 396 658	kWh/an	Production énergie primaire	3 764 443	kWh/an
Energie valorisée	17 440 105	kWh/an	Energie valorisée	17 818 648	kWh/an	Energie valorisée	19 424 875	kWh/an	Energie valorisée	2 920 069	kWh/an
Energie élec consommée	1 584 579	kWh/an	Energie élec consommée	1 641 176	kWh/an	Energie élec consommée	1 648 318	kWh/an	Energie élec consommée	687 923	kWh/an
Energie transport	11 339	l/an	Energie transport	12 938	l/an	Energie transport	9 934	l/an	Energie transport	13 640	l/an
	119 852	kWh/an		136 754	kWh/an		105 002	kWh/an		144 179	kWh/an
Investissement	6 000 000	€	Investissement	6 000 000	€	Investissement	6 000 000	€	Investissement	6 000 000	€
Vente énergie	1 803 272	€/an	Vente énergie	1 829 190	€/an	Vente énergie	1 946 840	€/an	Vente énergie	385 617	€/an
Coûts d'exploitation usine	546 700	€/an	Coûts d'exploitation usine	589 070	€/an	Coûts d'exploitation usine	562 831	€/an	Coûts d'exploitation usine	416 355	€/an
Coûts exploitation transport bioma	135 336	€/an	Coûts exploitation transport bioma	153 282	€/an	Coûts exploitation transport bioma	117 527	€/an	Coûts exploitation transport bioma	163 938	€/an
Coûts de mobilisation biomasse h	385 988	€/an	Coûts de mobilisation biomasse h	466 766	€/an	Coûts de mobilisation biomasse h	599 192	€/an	Coûts de mobilisation biomasse h	48 066	€/an
Chiffre d'Affaire Total	1 803 272	€/an	Chiffre d'Affaire Total	1 829 190	€/an	Chiffre d'Affaire Total	1 946 840	€/an	Chiffre d'Affaire Total	385 617	€/an
Coûts d'Exploitation Totaux	1 068 024	€/an	Coûts d'Exploitation Totaux	1 209 118	€/an	Coûts d'Exploitation Totaux	1 279 550	€/an	Coûts d'Exploitation Totaux	628 359	€/an
EBE	735 248	€/an	EBE	620 072	€/an	EBE	667 290	€/an	EBE	- 242 742	€/an
EBE/INV	12,25%		EBE/INV	10,33%		EBE/INV	11,12%		EBE/INV	-4,05%	
Ration valorisation énergie	84%		Ration valorisation énergie	85%		Ration valorisation énergie	87%		Ration valorisation énergie	55%	
KWh produits par Kwh dépensé	10,23	kWh/kWh	KWh produits par Kwh dépensé	10,02	kWh/kWh	KWh produits par Kwh dépensé	11,08	kWh/kWh	KWh produits par Kwh dépensé	3,51	kWh/kWh

Référence	Composition des intrants
CoLvFcMpMr	LVolailles-FCheval-MenuesP-Raisin
CoLpBIFvCmRm	Porcs-FBovin-Volaille-Maïs
CoLbLpMpPa	LBovins-Porcs-MenuesP-Pailles
MpLb	Lisier Bovins

MpLp			MpLv			MpBl			MpBa		
Taux de MS avec recirculation entrée de digesteur	3,4%		Taux de MS avec recirculation entrée de digesteur	4,9%		Taux de MS avec recirculation entrée de digesteur	14,0%		Taux de MS avec recirculation entrée de digesteur	13,1%	
Taux de MS actuel en sortie de digesteur	1,9%		Taux de MS actuel en sortie de digesteur	3,0%		Taux de MS actuel en sortie de digesteur	9,0%		Taux de MS actuel en sortie de digesteur	8,4%	
Taux d'amoniac dans les digesteurs (g/l)	3		Taux d'amoniac dans les digesteurs (g/l)	16		Taux d'amoniac dans les digesteurs (g/l)	1		Taux d'amoniac dans les digesteurs (g/l)	1	
Quantité d'eau à ajouter (réseau ou process)	0		Quantité d'eau à ajouter (réseau ou process)	0		Quantité d'eau à ajouter (réseau ou process)			Quantité d'eau à ajouter (réseau ou process)		
Quantité de digestat à recirculer (uniquement digestat liq)	0		Quantité de digestat à recirculer (uniquement digestat liq)	0		Quantité de digestat à recirculer (uniquement digestat liq)	15 000		Quantité de digestat à recirculer (uniquement digestat liq)	18 000	
	20%			20%			20%			20%	
Quantité théoriquement disponible en T/an	18 932		Quantité théoriquement disponible en T/an	18 009		Quantité théoriquement disponible en T/an	22 390		Quantité théoriquement disponible en T/an	25 103	
Tonnage total	20 001	T	Tonnage total	20 001	T	Tonnage total	20 000	T	Tonnage total	20 001	T
Tonnage de MS	701	TMS	Tonnage de MS	1 001	TMS	Tonnage de MS	4 600	TMS	Tonnage de MS	4 601	TMS
Production biogaz	273 114	m3/an	Production biogaz	333 690	m3/an	Production biogaz	1 629 167	m3/an	Production biogaz	1 629 523	m3/an
Biométhane injecté	8	m3/h	Biométhane injecté	12	m3/h	Biométhane injecté	94	m3/h	Biométhane injecté	92	m3/h
Production énergie primaire	1 628 853	kWh/an	Production énergie primaire	1 990 125	kWh/an	Production énergie primaire	9 716 350	kWh/an	Production énergie primaire	9 718 475	kWh/an
Energie valorisée	758 621	kWh/an	Energie valorisée	1 124 267	kWh/an	Energie valorisée	8 644 932	kWh/an	Energie valorisée	8 425 721	kWh/an
Energie élec consommée	601 756	kWh/an	Energie élec consommée	616 333	kWh/an	Energie élec consommée	1 077 061	kWh/an	Energie élec consommée	1 095 968	kWh/an
Energie transport	14 430	l/an	Energie transport	14 182	l/an	Energie transport	11 323	l/an	Energie transport	11 246	l/an
	152 527	kWh/an		149 899	kWh/an		119 685	kWh/an		118 866	kWh/an
Investissement	6 000 000	€	Investissement	6 000 000	€	Investissement	6 000 000	€	Investissement	6 000 000	€
Vente énergie	100 182	€/an	Vente énergie	148 468	€/an	Vente énergie	941 891	€/an	Vente énergie	830 448	€/an
Coûts d'exploitation usine	401 293	€/an	Coûts d'exploitation usine	403 839	€/an	Coûts d'exploitation usine	490 467	€/an	Coûts d'exploitation usine	519 043	€/an
Coûts exploitation transport bioma	173 826	€/an	Coûts exploitation transport bioma	170 713	€/an	Coûts exploitation transport bioma	134 919	€/an	Coûts exploitation transport bioma	133 953	€/an
Coûts de mobilisation biomasse h	56 866	€/an	Coûts de mobilisation biomasse h	54 096	€/an	Coûts de mobilisation biomasse h	22 171	€/an	Coûts de mobilisation biomasse h	21 379	€/an
Chiffre d'Affaire Total	100 182	€/an	Chiffre d'Affaire Total	148 468	€/an	Chiffre d'Affaire Total	941 891	€/an	Chiffre d'Affaire Total	830 448	€/an
Coûts d'Exploitation Totaux	631 985	€/an	Coûts d'Exploitation Totaux	628 649	€/an	Coûts d'Exploitation Totaux	647 558	€/an	Coûts d'Exploitation Totaux	674 375	€/an
EBE	- 531 803	€/an	EBE	- 480 181	€/an	EBE	294 333	€/an	EBE	156 073	€/an
EBE/INV	-8,86%		EBE/INV	-8,00%		EBE/INV	4,91%		EBE/INV	2,60%	
Ration valorisation énergie	0%		Ration valorisation énergie	18%		Ration valorisation énergie	77%		Ration valorisation énergie	74%	
KWh produits par Kwh dépensé	1,01	kWh/kWh	KWh produits par Kwh dépensé	1,47	kWh/kWh	KWh produits par Kwh dépensé	7,22	kWh/kWh	KWh produits par Kwh dépensé	6,94	kWh/kWh

Référence	Composition des intrants
MpLp	Lisiers porcs
MpLv	Lisiers de volailles
MpBl	Fumier Bovins Lait
MpBa	Fumier Bovins Allaitants

MpFc			MpFc			MpFo			MpFv		
Taux de MS avec recirculation entrée de digesteur	13,0%		Taux de MS avec recirculation entrée de digesteur	13,0%		Taux de MS avec recirculation entrée de digesteur	13,0%		Taux de MS avec recirculation entrée de digesteur	13,9%	
Taux de MS actuel en sortie de digesteur	8,5%		Taux de MS actuel en sortie de digesteur	8,5%		Taux de MS actuel en sortie de digesteur	8,5%		Taux de MS actuel en sortie de digesteur	9,2%	
Taux d'amoniac dans les digesteurs (g/l)	0		Taux d'amoniac dans les digesteurs (g/l)	0		Taux d'amoniac dans les digesteurs (g/l)	0		Taux d'amoniac dans les digesteurs (g/l)	3	
Quantité d'eau à ajouter (réseau ou process)	5 000		Quantité d'eau à ajouter (réseau ou process)	5 000		Quantité d'eau à ajouter (réseau ou process)	5 000		Quantité d'eau à ajouter (réseau ou process)	5 500	
Quantité de digestat à recirculer (uniquement digestat liq)	35 000		Quantité de digestat à recirculer (uniquement digestat liq)	35 000		Quantité de digestat à recirculer (uniquement digestat liq)	35 000		Quantité de digestat à recirculer (uniquement digestat liq)	38 000	
	20%			20%			20%			25%	
Quantité théoriquement disponible en T/an	39 291		Quantité théoriquement disponible en T/an	39 291		Quantité théoriquement disponible en T/an	39 291		Quantité théoriquement disponible en T/an	38 581	
Tonnage total	20 001	T	Tonnage total	20 001	T	Tonnage total	20 001	T	Tonnage total	12 000	T
Tonnage de MS	7 001	TMS	Tonnage de MS	7 001	TMS	Tonnage de MS	7 001	TMS	Tonnage de MS	6 840	TMS
Production biogaz	2 479 523	m3/an	Production biogaz	2 479 523	m3/an	Production biogaz	2 479 523	m3/an	Production biogaz	2 422 500	m3/an
Biométhane injecté	148	m3/h	Biométhane injecté	148	m3/h	Biométhane injecté	124	m3/h	Biométhane injecté	147	m3/h
Production énergie primaire	14 787 875	kWh/an	Production énergie primaire	14 787 875	kWh/an	Production énergie primaire	14 787 875	kWh/an	Production énergie primaire	14 447 790	kWh/an
Energie valorisée	13 563 305	kWh/an	Energie valorisée	13 563 305	kWh/an	Energie valorisée	11 418 651	kWh/an	Energie valorisée	13 475 059	kWh/an
Energie élec consommée	1 384 217	kWh/an	Energie élec consommée	1 384 217	kWh/an	Energie élec consommée	1 438 248	kWh/an	Energie élec consommée	1 268 451	kWh/an
Energie transport	10 488	l/an	Energie transport	10 488	l/an	Energie transport	10 488	l/an	Energie transport	7 000	l/an
	110 863	kWh/an		110 863	kWh/an		110 863	kWh/an		73 985	kWh/an
Investissement	6 000 000	€	Investissement	6 000 000	€	Investissement	6 000 000	€	Investissement	6 000 000	€
Vente énergie	1 485 519	€/an	Vente énergie	1 485 519	€/an	Vente énergie	1 013 321	€/an	Vente énergie	1 480 405	€/an
Coûts d'exploitation usine	528 340	€/an	Coûts d'exploitation usine	528 340	€/an	Coûts d'exploitation usine	611 175	€/an	Coûts d'exploitation usine	468 762	€/an
Coûts exploitation transport bioma	124 474	€/an	Coûts exploitation transport bioma	124 474	€/an	Coûts exploitation transport bioma	124 474	€/an	Coûts exploitation transport bioma	82 336	€/an
Coûts de mobilisation biomasse h	12 942	€/an	Coûts de mobilisation biomasse h	12 942	€/an	Coûts de mobilisation biomasse h	12 942	€/an	Coûts de mobilisation biomasse h	1 743	€/an
Chiffre d'Affaire Total	1 485 519	€/an	Chiffre d'Affaire Total	1 485 519	€/an	Chiffre d'Affaire Total	1 013 321	€/an	Chiffre d'Affaire Total	1 480 405	€/an
Coûts d'Exploitation Totaux	665 756	€/an	Coûts d'Exploitation Totaux	665 756	€/an	Coûts d'Exploitation Totaux	748 590	€/an	Coûts d'Exploitation Totaux	552 841	€/an
EBE	819 763	€/an	EBE	819 763	€/an	EBE	264 731	€/an	EBE	927 565	€/an
EBE/INV	13,66%		EBE/INV	13,66%		EBE/INV	4,41%		EBE/INV	15,46%	
Ration valorisation énergie	82%		Ration valorisation énergie	82%		Ration valorisation énergie	67%		Ration valorisation énergie	84%	
KWh produits par Kwh dépensé	9,07	kWh/kWh	KWh produits par Kwh dépensé	9,07	kWh/kWh	KWh produits par Kwh dépensé	7,37	kWh/kWh	KWh produits par Kwh dépensé	10,04	kWh/kWh

Référence	Composition des intrants
MpFc	Fumier Cheval
MpFc	Fumiers de Chèvres
MpFo	Fumiers d'Ovins
MpFv	Fumiers de volailles

MpCm		MpRm		MpPa		MpMp	
Taux de MS avec recirculation entrée de digesteur	13,2%	Taux de MS avec recirculation entrée de digesteur	13,4%	Taux de MS avec recirculation entrée de digesteur	13,5%	Taux de MS avec recirculation entrée de digesteur	13,5%
Taux de MS actuel en sortie de digesteur	7,5%	Taux de MS actuel en sortie de digesteur	8,2%	Taux de MS actuel en sortie de digesteur	8,4%	Taux de MS actuel en sortie de digesteur	7,4%
Taux d'amoniac dans les digesteurs (g/l)	0	Taux d'amoniac dans les digesteurs (g/l)	0	Taux d'amoniac dans les digesteurs (g/l)	0	Taux d'amoniac dans les digesteurs (g/l)	0
Quantité d'eau à ajouter (réseau ou process)	12 000	Quantité d'eau à ajouter (réseau ou process)	15 000	Quantité d'eau à ajouter (réseau ou process)	10 000	Quantité d'eau à ajouter (réseau ou process)	15 000
Quantité de digestat à recirculer (uniquement digestat liq)	40 000	Quantité de digestat à recirculer (uniquement digestat liq)	40 000	Quantité de digestat à recirculer (uniquement digestat liq)	49 000	Quantité de digestat à recirculer (uniquement digestat liq)	40 000
	20%		20%		25%		20%
Quantité théoriquement disponible en T/an	46 369	Quantité théoriquement disponible en T/an	43 764	Quantité théoriquement disponible en T/an	48 441	Quantité théoriquement disponible en T/an	43 279
Tonnage total	16 000 T	Tonnage total	11 400 T	Tonnage total	8 885 T	Tonnage total	8 500 T
Tonnage de MS	8 000 TMS	Tonnage de MS	7 980 TMS	Tonnage de MS	7 997 TMS	Tonnage de MS	7 650 TMS
Production biogaz	3 480 000 m3/an	Production biogaz	3 158 750 m3/an	Production biogaz	3 165 281 m3/an	Production biogaz	3 512 625 m3/an
Biométhane injecté	211 m3/h	Biométhane injecté	190 m3/h	Biométhane injecté	194 m3/h	Biométhane injecté	215 m3/h
Production énergie primaire	20 754 720 kWh/an	Production énergie primaire	18 838 785 kWh/an	Production énergie primaire	18 877 737 kWh/an	Production énergie primaire	20 949 296 kWh/an
Energie valorisée	19 360 751 kWh/an	Energie valorisée	17 439 837 kWh/an	Energie valorisée	17 769 975 kWh/an	Energie valorisée	19 684 688 kWh/an
Energie élec consommée	1 638 313 kWh/an	Energie élec consommée	1 508 514 kWh/an	Energie élec consommée	1 496 323 kWh/an	Energie élec consommée	1 548 706 kWh/an
Energie transport	10 160 l/an	Energie transport	10 109 l/an	Energie transport	7 603 l/an	Energie transport	8 651 l/an
	107 388 kWh/an		106 850 kWh/an		80 360 kWh/an		91 445 kWh/an
Investissement	6 000 000 €	Investissement	6 000 000 €	Investissement	6 000 000 €	Investissement	6 000 000 €
Vente énergie	1 944 728 €/an	Vente énergie	1 806 813 €/an	Vente énergie	1 832 392 €/an	Vente énergie	1 971 001 €/an
Coûts d'exploitation usine	539 676 €/an	Coûts d'exploitation usine	500 183 €/an	Coûts d'exploitation usine	490 401 €/an	Coûts d'exploitation usine	495 697 €/an
Coûts exploitation transport bioma	120 544 €/an	Coûts exploitation transport bioma	117 269 €/an	Coûts exploitation transport bioma	86 896 €/an	Coûts exploitation transport bioma	100 560 €/an
Coûts de mobilisation biomasse h	819 106 €/an	Coûts de mobilisation biomasse h	581 291 €/an	Coûts de mobilisation biomasse h	620 273 €/an	Coûts de mobilisation biomasse h	647 336 €/an
Chiffre d'Affaire Total	1 944 728 €/an	Chiffre d'Affaire Total	1 806 813 €/an	Chiffre d'Affaire Total	1 832 392 €/an	Chiffre d'Affaire Total	1 971 001 €/an
Coûts d'Exploitation Totaux	1 479 327 €/an	Coûts d'Exploitation Totaux	1 198 743 €/an	Coûts d'Exploitation Totaux	1 197 570 €/an	Coûts d'Exploitation Totaux	1 243 593 €/an
EBE	465 401 €/an	EBE	608 070 €/an	EBE	634 822 €/an	EBE	727 408 €/an
EBE/INV	7,76%	EBE/INV	10,13%	EBE/INV	10,58%	EBE/INV	12,12%
Ration valorisation énergie	85%	Ration valorisation énergie	84%	Ration valorisation énergie	86%	Ration valorisation énergie	86%
KWh produits par Kwh dépensé	11,09 kWh/kWh	KWh produits par Kwh dépensé	10,80 kWh/kWh	KWh produits par Kwh dépensé	11,27 kWh/kWh	KWh produits par Kwh dépensé	12,00 kWh/kWh

Référence	Composition des intrants
MpCm	Cannes de maïs
MpRm	Rafles de maïs
MpPa	Pailles de céréales et de colza
MpMp	Menues Pailles

Annexe 16 : Caractéristiques techniques des racks de transport de biométhane

Le transport de biométhane comprimé est une technique utilisée dans plusieurs pays Européens. Elle est notamment utilisée pour avitailler des flottes captives fonctionnant au GNV ou Bio-GNV. En Suède, cette technique est également utilisée pour alimenter des usines en gaz naturel ne disposant pas de canalisations à proximité. Plusieurs études se sont intéressées à la valorisation du biométhane et à son transport (Leigneil 2007 ; ALE 08 2009).

Le transport de biométhane en rack de bouteilles consiste à comprimer à 200 bar le biométhane en sortie d'épuration dans des containers amovibles. Ceci permet d'optimiser les capacités de stockage, en diminuant le volume grâce à la compression. Une fois remplis, les containers peuvent être transportés par route jusqu'au lieu de consommation ou de valorisation du biométhane (Figure 84 et Figure 85).

Figure 84 : Exemple d'un rack biométhane containerisé chargé sur un camion porteur (ALE 08, 2009)



- Camion déchargeant une remorque de bouteilles de GNV en Suède (Processkontroll AB) -

Figure 85 : Exemple d'un rack biométhane mobile tracté par un véhicule (ALE 08, 2009)



- Remorque d'approvisionnement, distribuée par Dynetek Industries Ltd -

Les données techniques et économiques prises en compte dans le Chapitre 2 sont issues de l'étude ALE 08 et de consultations réalisées auprès de l'équipementier Luxfer Gas Cylinders (Figure 86).

Figure 86 : Caractéristiques et capacités de stockage des racks biométhane selon les équipementiers (ALE 08, 2009)

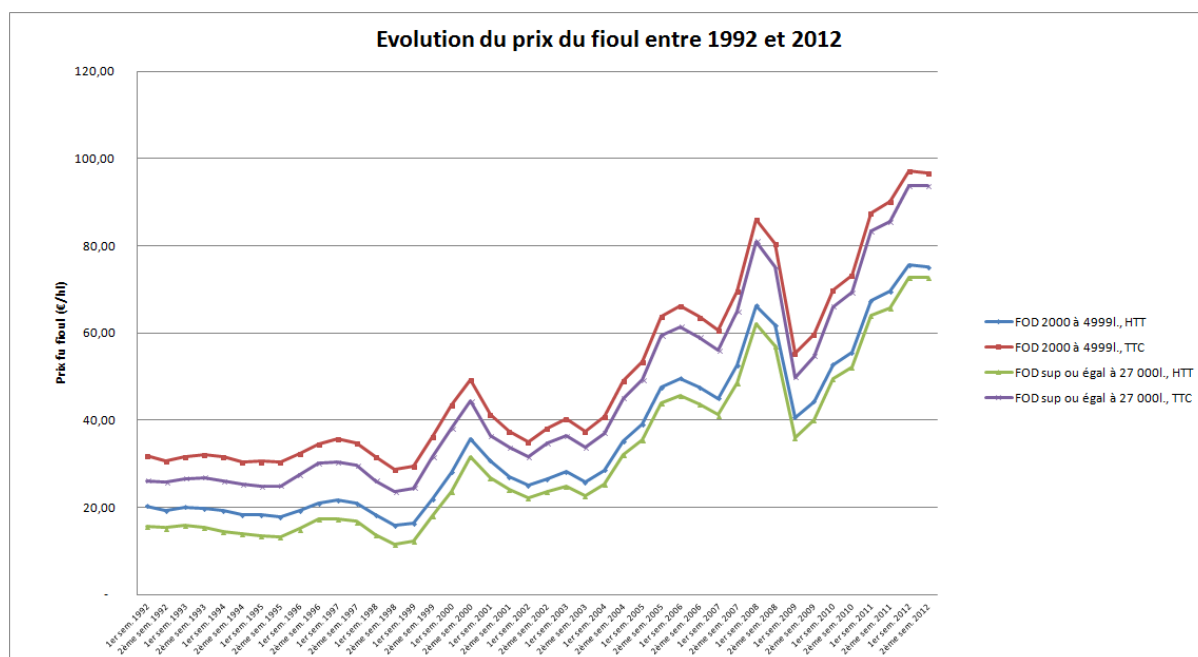
Caractéristiques	Luxfer ISO Containers 10'	Luxfer ISO Containers 20'	Luxfer ISO Containers 40'	Dynetech 1	Dynetech 2	Dynetech 3	Stockage* acier+ distribution
Nombre de bouteilles	28	63	125	4	8	12	20
Contenance d'une bouteille (litres)	205	205	205	260	260	260	80
Pression (bars)	200	200	200	223	223	223	200
Volume de gaz stocké par bouteille (Nm ³)	50	50	50	72,5	72,5	72,5	20
Volume total de gaz stocké (Nm ³)	1 400	3 150	6 250	290	580	870	400
Equivalent pleins VL (60 l) (volume utile 60 %)	56	126	250	12	23	35	16
Prix en euros	96 420	188 920	296 742	35 600	49 315	63 000	20 000
Prix / m ³ de gaz stocké	69	60	47	123	85	72	50

Annexe 17 : Données prises en compte dans l'évaluation de l'autonomie

L'évaluation du Chapitre 4 a été réalisée en prenant en compte un certain nombre de variables :

- Les évolutions de prix du fioul, de l'azote et du grain sont celles observées sur la période de 1998 à 2012,
- Les coûts de production moyens et marges brutes des différentes cultures,
- La production énergétique, azote et biomasse de la légumineuse,
- Le prix de vente de biométhane

Evolution du prix du fioul entre 1992 et 2012 : source statistiques du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie.



Evolution du prix de l'azote entre 1998 et 2012 : source statistiques de l'INSEE.

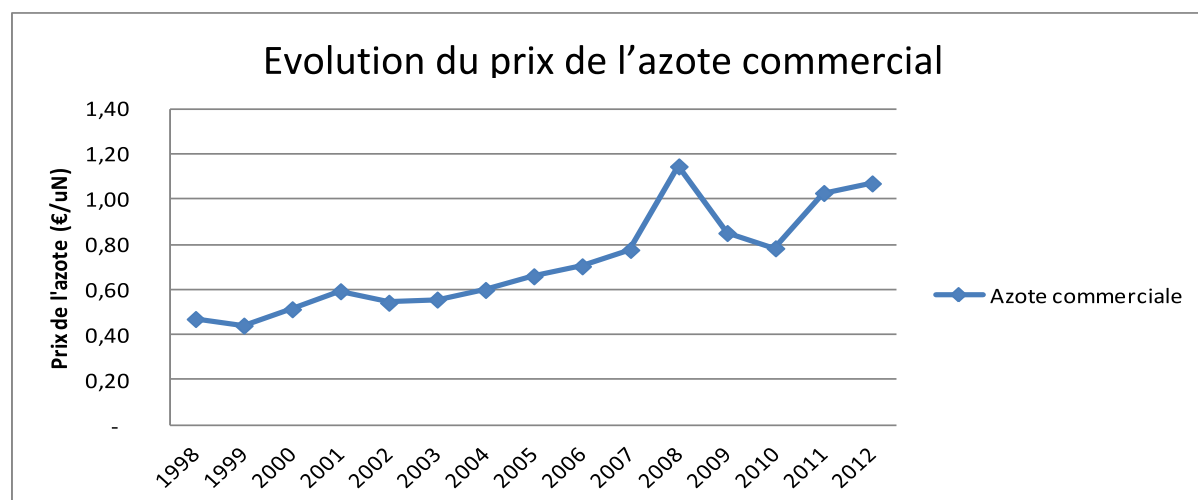


Tableau de synthèse du fioul agricole et de l'azote entre 1998 et 2012 (MEDDE et INSEE)

Produit	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Fioul (€/l)	0,30	0,33	0,46	0,39	0,37	0,39	0,45	0,59	0,65	0,65	0,83	0,58	0,72	0,89	0,97
Azote (€/uN)	0,47	0,44	0,51	0,59	0,54	0,56	0,60	0,66	0,70	0,78	1,15	0,85	0,78	1,03	1,07

Evolution du prix du grain 1998 et 2012 : source statistiques de France AgriMer

	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
	€/T	€/T	€/T	€/T	€/T	€/T	€/T	€/T	€/T	€/T	€/T	€/T	€/T	€/T	€/T
Prix vente Colza	249	214	185	213	242	262	264	207	220	262	395	319	282	437	448
Prix de vente Blé	125	111	117	110	111	106	137	101	105	143	238	146	120	226	199
Prix de vente Orge	114	107	114	109	101	93	119	94	94	125	202	109	88	183	186
Prix de vente Maïs	95	76	84	88	91	92	86	65	71	101	123	124	102	170	189

Hypothèses de calcul prises en compte selon la configuration de rendement des exploitations :

	Haut rendement et reliquat important	Haut rendement et reliquat faible	Bas rendement et reliquat important	Bas rendement et reliquat faible
	Besoin de la culture	Besoin de la culture	Besoin de la culture	Besoin de la culture
	<i>kgN/ha</i>	<i>kgN/ha</i>	<i>kgN/ha</i>	<i>kgN/ha</i>
Colza	213	253	55	95
Blé	160	190	115	155
Orge	104	134	115	145
Maïs grain	155	195	55	95

	Haut rendement	Bas rendement	Consommation carburant*	Coût de production hors carburant, azote et travail**
	Rendement	Rendement		
	<i>TMS/ha</i>	<i>TMS/ha</i>	<i>l/ha</i>	<i>€/ha</i>
Colza	4,5	3,0	100	294
Blé	8,0	6,5	100	304
Orge	8,0	6,5	100	128
Maïs grain	11,0	7,0	100	540

* hypothèses de travail prise à partir des données bibliographiques AGRESTE, étude INRA Scees, étude de la Chambre d'Agriculture de l'Ain,

** hypothèses de travail prises à partir des données bibliographiques de la Chambre d'Agriculture de Poitou Charentes, ADEME

	(eq)lfioul/TMS**	uN/ha***	TMS/an***	uN/TMS
Luzerne	290,00	445,00	12	37
Vesce-triticales	290,00	400,00	12	33

hypothèses prises à partir des données bibliographiques E. Tribou, étude Chambre Agriculture de l'Aube,
 *** étude Vertes & al

Efficacité de l'azote du digestat****	75%
**** D'après des essais réalisés par Methaneo	
Prix de vente du biométhane (€/eq litre fioul)	0,80

Exemple détaillé de l'évaluation de l'autonomie d'une ferme en monoculture de maïs (bas rendement et fourniture du sol faible sur une base de prix 2012).

0% d'autonomie 100% fossile

	SAU	Besoin des cultures	Besoin en carburant	Azote produit par digestat	Biométhane produit	Besoin azote chimique	Besoin fioul
	ha	UN/an	l/an	uN/an	eq/an	uN/an	l/an
Maïs grain	100	9 500	10 000				
Luzerne	-	-	-	-	-		
Total	100	9 500	10 000	-	-	9 500	10 000

	Coût d'azote chimique	Coût en carburant	Coût hors carburant et azote	Chiffre d'affaire	Marge brute	Marge brute
	€/an	€/an	€/an	€/an	€/an	€/ha
Maïs grain			53 960	132 472		
Luzerne			-	-		
Total	10 165	9 688	53 960	132 472	58 659	587

100% autonomie carburant, 50% autonomie azote

	SAU	Besoin des cultures	Besoin en carburant	Unités produites par le digestat	Biométhane produit	Besoin azote chimique	Besoin fioul
	ha	UN/an	l/an	uN/an	eq/an	uN/an	l/an
Maïs grain	88	8 317	8 754				
Luzerne	12	-	623	4 157	43 346		
Total	100	8 317	9 377	4 157	43 346	4 160	-

		Coût d'azote chimique	Coût en carburant	Coût hors carburant et azote	Chiffre d'affaire	Marge brute	Marge brute
		€/an	€/an	€/an	€/an	€/an	
Maïs grain				47 239	115 972		
Luzerne				-	-		
Total		4 451	7 502	47 239	115 972	56 780	568

100% autonomie carburant et azote

	SAU	Besoin des cultures	Besoin en carburant	Unités produite par le digestat	Biométhane produit	Besoin azote chimique	Besoin fioul
	ha	UN/an	l/an	uN/an	eql/an	uN/an	l/an
Maïs grain	78	7 396	7 786				
Luzerne	22	-	1 107	7 390	77 059		
Total	100	7 396	8 893	7 390	77 059	6	-

		Coût d'azote chimique	Coût en carburant	Coût hors carburant et azote	Chiffre d'affaire	Marge brute	Marge brute
		€/an	€/an	€/an	€/an	€/an	
Maïs grain				42 011	103 138		
Luzerne				-	-		
Total		6	7 114	42 011	103 138	54 006	540

Annexe 18 : Evaluation de l'autonomie avec un mélange vesce/triticales

Tableau : Part de cultures dédiées vesce/triticales nécessaire à l'autonomie pour une exploitation de 100 ha

Rendements de cultures bas	Besoins uN Tot (uN)	Fournitures du sol (uN)	Dose à apporter (uN)	Surface de l'exploitation (ha)	Dose totale à apporter pour l'exploitation (kgN/an)	Part de culture dédiée en luzerne
Maïs	175	80-120	95-55	100	6 983 - 4 546	17%-26%
Colza	195	40-80	155-115	100	8 856 - 7 188	28%-33%
Blé	195	50-80	145-115			
Orge	150	50-80	99-70			

Rendements de cultures élevés	Besoins uN Tot (uN)	Fournitures du sol (uN)	Dose à apporter (uN)	Surface de l'exploitation (ha)	Dose totale à apporter pour l'exploitation (kgN/an)	Part de culture dédiée en luzerne
Maïs	275	80-120	195-155	100	11 213 - 9 765	37%-42%
Colza	293	40-80	253-213	100	11 146 - 9 927	37%-42%
Blé	240	50-80	190-160			
Orge	184	50-80	134-104			

Exemple détaillé de l'évaluation de l'autonomie d'une ferme en monoculture de maïs avec un mélange vesce/triticales (bas rendement et fourniture du sol faible sur une base de prix 2012).

0% d'autonomie 100% fossile

	SAU	Besoin des cultures	Besoin en carburant	Unités produites par le digestat	Biométhane produit	Besoin azote chimique	Besoin fioul
	ha	kgN/an	l/an	kgN/an	eqL/an	kgN/an	l/an
Maïs grain	100	9 500	10 000				
Luzerne	-	-	-	-	-	-	-
Total	100	9 500	10 000	-	-	9 500	10 000

		Coût d'azote chimique	Coût en carburant	Coût de production hors carburant et azote	Chiffre d'affaire	Marge brute	
		€/an	€/an	€/an	€/an	€/an	
Maïs grain				53 960	132 472		
Luzerne				-	-		
Total		10 165	9 688	53 960	132 472	58 659	587

100% autonomie carburant, 50% autonomie azote

	SAU	Besoin des cultures	Besoin en carburant	Unités produite par le digestat	Biométhane produit	Besoin azote chimique	Besoin fioul
	ha	kgN/an	l/an	kgN/an	eql/an	kgN/an	l/an
Maïs grain	85	8 037	8 460				
Luzerne	15	-	770	4 043	53 592		
Total	100	8 037	9 230	4 043	53 592	3 995	-

		Coût d'azote chimique	Coût en carburant	Coût de production hors carburant et azote	Chiffre d'affaire	Marge brute	
		€/an	€/an	€/an	€/an	€/an	
Maïs grain				45 650	112 071		
Luzerne				-	-		
Total		4 274	7 384	45 650	112 071	54 763	548

100% autonomie carburant et azote

	SAU	Besoin des cultures	Besoin en carburant	Unités produite par le digestat	Biométhane produit	Besoin azote chimique	Besoin fioul
	ha	kgN/an	l/an	uN/an	eql/an	uN/an	l/an
Maïs grain	74	6 983	7 350				
Luzerne	27	-	1 325	6 956	92 220		
Total	100	6 983	8 675	6 956	92 220	26	-

		Coût d'azote chimique	Coût en carburant	Coût de production hors carburant et azote	Chiffre d'affaire	Marge brute	
		€/an	€/an	€/an	€/an	€/an	
Maïs grain				39 661	97 367		
Luzerne				-	-		
Total		28	6 940	39 661	97 367	50 738	507