



EVALUATION MULTI-INDICATEURS DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE L'INJECTION DU BIOMETHANE DANS LE RESEAU DE GAZ NATUREL À TRAVERS UNE COMBUSTION EN CHAUDIÈRE POUR LA PRODUCTION DE CHALEUR

Approches par allocation et par substitution avec extension de frontières

Auteurs : Léa BOUNHOURE (Agrosolutions), Maylis CHARTIER KASTLER (Agrosolutions), Valentin MERAI (Agrosolutions), Alexandre MORENO (Agrosolutions), Mickaël POURCELOT (Agrosolutions), Anne DE LA BACHELLERIE (CGI Business Consulting), Abdeljelil KHALSI (CGI Business Consulting), Meryll PASQUET (CGI Business Consulting), Benjamin SIMON (CGI Business Consulting).

Octobre 2023

TABLE DES MATIERES

1. OBJECTIFS ET ENJEUX DE L'ETUDE.....	8
1.1. CONTEXTE DE L'ETUDE.....	8
1.1.1. Contexte.....	8
1.1.2. Revue critique de l'étude.....	8
1.2. OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	9
1.2.1. Analyse de six filières de production de biométhane français.....	9
1.2.2. Intégration dans les bases de données.....	9
2. CHAMP DE L'ETUDE	11
2.1. DEFINITION DU SYSTEME ET UNITE FONCTIONNELLE.....	11
2.2. LA GESTION DE LA MULTIFONCTIONNALITE DE LA METHANISATION.....	13
2.2.1. Généralités.....	13
2.2.2. Gestion de la multifonctionnalité dans les bases de données.....	14
2.2.3. Gestion de la multifonctionnalité au sein de l'étude.....	14
2.3. CRITERES DE COUPURE ET D'EXCLUSION.....	19
2.4. EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX.....	19
2.4.1. Base Empreinte et méthode IPCC 2021 - 100 ans : Changement climatique.....	19
2.4.2. Résultats Multi-indicateurs et méthode EF 3.0.....	20
2.4.3. Base INIES et norme NF EN 15804+A2 / CN : Changement climatique.....	22
2.4.4. Base INIES et norme NF EN 15804+A2 : Autres indicateurs.....	23
2.5. EVALUATION DE LA QUALITE DES DONNEES	24
2.6. ENUMERATION DES ANALYSES DE SENSIBILITE	27
3. DESCRIPTION DES 6 FILIERES DE PRODUCTION DE BIOMETHANE CONSIDEREES : PRESENTATION GENERALE, PERIMETRE ET FONCTIONS ASSOCIEES	27
3.1. FILIERE AGRICOLE AUTONOME.....	32
3.1.1. Présentation générale de la filière.....	32
3.1.2. Périmètre et fonctions.....	34
3.2. FILIERE AGRICOLE TERRITORIAL.....	37
3.2.1. Présentation générale de la filière.....	37
3.2.2. Périmètre et fonctions.....	37
3.3. FILIERE INDUSTRIEL TERRITORIAL.....	38
3.3.1. Présentation générale de la filière.....	38
3.3.2. Périmètre et fonctions.....	38
3.4. FILIERE BIODECHETS.....	40
3.4.1. Présentation générale de la filière.....	40
3.4.2. Périmètre et fonctions.....	40
3.5. FILIERE ISDND.....	43
3.5.1. Présentation générale de la filière.....	43
3.5.2. Périmètre et fonctions.....	44
3.6. FILIERE STEU.....	45
3.6.1. Présentation générale de la filière.....	45
3.6.2. Périmètre et fonctions.....	46
4. INVENTAIRE DES DONNEES UTILISEES	48
4.1. DEFINITION DU MIX DE PRODUCTION DE BIOMETHANE.....	48
4.2. DONNEES ET HYPOTHESES DE TRAVAIL COMMUNES A CHAQUE FILIERE.....	49
4.2.1. Empreinte environnementale des substrats.....	49
4.2.2. Composition du biométhane.....	49
4.2.3. Emissions fugitives et pertes.....	50

4.2.4.	<i>Epuration du biogaz avant injection</i>	52
4.2.5.	<i>Injection</i>	56
4.2.6.	<i>Réseau de transport et de distribution</i>	57
4.2.7.	<i>Combustion</i>	58
4.3.	DONNEES ET HYPOTHESES DE TRAVAIL SPECIFIQUES AUX FILIERES AGRICOLE AUTONOME, AGRICOLE TERRITORIAL ET INDUSTRIEL TERRITORIAL.....	58
4.3.1.	<i>Rappel des mix d'intrants</i>	58
4.3.2.	<i>Potentiels méthanogènes et composition des différents biogaz</i>	59
4.3.3.	<i>Gestion des substrats</i>	60
4.3.4.	<i>Transport et stockage des substrats</i>	67
4.3.5.	<i>Prétraitement des substrats</i>	69
4.3.6.	<i>Digestion et torchage</i>	71
4.3.7.	<i>Traitement de l'air</i>	72
4.3.8.	<i>Epuration</i>	72
4.4.	DONNEES ET HYPOTHESES DE TRAVAIL SPECIFIQUES AUX FILIERES BIODECHETS, ISDND ET STEU	73
4.4.1.	<i>Biodéchets</i>	73
4.4.2.	<i>ISDND</i>	75
4.4.3.	<i>STEU</i>	77
4.5.	FACTEURS D'ALLOCATION : DONNEES ECONOMIQUES, PHYSIQUES ET ENERGETIQUES.....	78
4.5.1.	<i>Données économiques</i>	78
4.5.2.	<i>Données de flux physiques</i>	82
4.5.3.	<i>Facteurs d'allocation économique</i>	83
5.	METHODE PAR EXTENSION DE FRONTIERE ET SUBSTITUTION, DONNEES SPECIFIQUES	86
5.1.	PRINCIPE ET PERIMETRE DE LA METHODE DE L'EXTENSION DE FRONTIERE ET DE LA SUBSTITUTION	86
5.2.	EXTENSION DE FRONTIERE : VALORISATION AGRONOMIQUE DU DIGESTAT	89
5.2.1.	<i>Valorisation agronomique du digestat pour les filières AA, AT et IT</i>	89
5.2.2.	<i>Cas spécifique pour la filière Biodéchets</i>	93
5.3.	CALCULS DES IMPACTS EVITES.....	94
5.3.1.	<i>Procédés alternatifs à la fonction « traiter des déchets »</i>	94
5.3.2.	<i>Procédés alternatifs à la fonction « Produire du digestat utilisé comme un fertilisant »</i>	101
6.	RESULTATS ET INTERPRETATION - METHODE PAR ALLOCATION ECONOMIQUE.....	106
6.1.	RESULTATS SUR L'INDICATEUR DES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE	106
6.1.1.	<i>Résultats du mix de production du biométhane en France</i>	106
6.1.2.	<i>Résultats par filière</i>	107
6.2.	RESULTATS MULTI-INDICATEURS (METHODE EF 3.0)	121
6.2.1.	<i>Résultats du mix de production du biométhane en France</i>	121
6.2.2.	<i>Résultats par filière</i>	124
7.	ANALYSES DE SENSIBILITE	133
7.1.	MODIFICATION DU MIX D'INTRANTS	135
7.2.	MODIFICATION DE LA PROPORTION CIVE D'HIVER CIVE D'ETE	138
7.3.	AUTOCONSOMMATION EN BIOMETHANE POUR LE PRE-TRAITEMENT	140
7.4.	MODIFICATION DU STOCKAGE DU DIGESTAT	142
7.5.	VARIATION DU PRIX DU DIGESTAT.....	147
7.6.	VARIATION DES TAUX DE PERTE DE METHANE	149
8.	RESULTATS ET INTERPRETATION - METHODE PAR EXTENSION DE FRONTIERE ET SUBSTITUTION	157
8.1.	RESULTATS SUR L'INDICATEUR DES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE	157
9.	LIMITES ET PERSPECTIVES	163
10.	CONCLUSIONS.....	165

LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Schéma macro simplifié des différentes filières de production de biométhane en France.	12
Figure 2 - Schéma simplifié de l'approche par substitution/Extension de frontière	15
Figure 3 - Schéma simplifié de l'approche par allocation économique	16
Figure 4 - Schéma explicatif de la méthode d'allocation économique du biométhane exemple selon deux filières : Agricole Autonome et Biodéchets.....	17
Figure 5 - Périmètre des étapes prises en compte pour les filières Agricole Autonome, Agricole Industriel et Agricole Territorial	35
Figure 6 - Schéma du périmètre d'étude de la filière Déchets ménagers /Biodéchets.	41
Figure 7 - Schéma du principe de fonctionnement d'une ISDND	43
Figure 8 - Schéma du périmètre d'étude de la filière ISDND (<i>partie encadrée</i>).....	44
Figure 9 - Schéma global du fonctionnement d'une station d'épuration	45
Figure 10 - Schéma du périmètre d'étude de la filière STEU (<i>partie encadrée en rouge</i>)	47
Figure 11 - Evolution annuelle du nombre total de sites d'injection de biométhane en service.	48
Figure 12 - Répartition de la production annuelle du mix de biométhane en France en 2021 (GWh/an).	49
Figure 13 - Schéma simplifié du process d'épuration membranaire.	53
Figure 14 - Schéma simplifié du process de PSA.	54
Figure 15 - Schéma simplifié du process de lavage à l'eau.	55
Figure 16 - Schéma simplifié du process de cryogénie.	55
Figure 17 - Schéma de la méthode par extension de frontière et substitution, appliquée à la filière biométhane	88
Figure 18 - Résultats pour la méthode par allocation économique de la filière biométhane	106
Figure 19 : Contribution des émissions de gaz à effet de serre au changement climatique pour l'ensemble des filières	107
Figure 20 - Résultats pour la méthode par allocation économique de la filière AA	109
Figure 21 – Contribution des émissions de gaz à effet de serre au changement climatique pour la filière AA (séquestration de CO ₂ exclue).....	110
Figure 22 - Résultats pour la méthode par allocation économique de la filière AT.....	111
Figure 23 – Contribution des émissions de gaz à effet de serre au changement climatique pour la filière AT AA (séquestration de CO ₂ exclue)	111
Figure 24 - Résultats pour la méthode par allocation économique de la filière IT	113
Figure 25 - Contribution des émissions de gaz à effet de serre au changement climatique pour la filière IT	113
Figure 26 - Résultats pour la méthode par allocation économique de la filière ISDND.....	114
Figure 27 – Contribution des émissions de gaz à effet de serre au changement climatique pour la filière ISDND.....	115
Figure 28 - Résultats pour la méthode par allocation économique de la filière STEU.....	116
Figure 29 – Contribution des émissions de gaz à effet de serre au changement climatique pour la filière STEU.....	117
Figure 30 - Résultats pour la méthode par allocation économique de la filière déchets ménagers/biodéchets	118
Figure 31 – Contribution des émissions de gaz à effet de serre au changement climatique pour la filière Biodéchets.....	118
Figure 32 : Comparaison des filières - contribution des différents postes à l'indicateur Impact sur le changement climatique.....	119
Figure 33 – Contribution des émissions et de la séquestration de gaz à effet de serre au changement climatique pour l'ensemble des filières	120
Figure 34 – Contribution des fuites de méthane biogénique, du niveau de la digestion à l'injection, au changement climatique pour l'ensemble des filières	121

Figure 35 : Construction des facteurs de pondération pour chaque catégorie d'impact de la méthodologie EF3.0 pour la conception du score unique (//doc.agribalyse.fr/documentation/methodologie-acv)	122
Figure 36 : Contribution relative des filières au score unique de la filière biométhane (méthode EF3.0)	123
Figure 37 - Contribution relative des catégories d'impact au score unique de la méthode EF3.0	124
Figure 38 - Comparaison des scores uniques et des contributions de chaque catégorie d'impact pour chaque filière.....	125
Figure 39 - Comparaison des scores uniques et des contributions de chaque poste d'impact pour chaque filière.....	126
Figure 40 - Résultats EF3.0 pour la méthode par allocation économique de la filière AA.....	127
Figure 41 - Résultats EF3.0 pour la méthode par allocation économique de la filière AT	128
Figure 42 - Résultats EF3.0 pour la méthode par allocation économique de la filière IT	129
Figure 43 - Résultats EF3.0 pour la méthode par allocation économique de la filière ISDND.....	130
Figure 44 - Résultats EF3.0 pour la méthode par allocation économique de la filière STEU.....	131
Figure 45 - Résultats EF3.0 pour la méthode par allocation économique de la filière Biodéchets	132
Figure 46 - Analyse comparative entre le scénario de référence et la modification du mix d'intrants pour la filière AA et AT (IPCC2021).....	137
Figure 47 - Impacts de l'évolution du mix d'intrants par étapes du cycle de vie pour la filière AA (IPCC2021)	138
Figure 48 - Analyse comparative entre le scénario de référence et la modification de la proportion CIVE d'hiver versus CIVE d'été pour les filières AA et AT (IPCC2021)	140
Figure 49 - Analyse comparative entre le scénario de référence utilisant du gaz naturel et le scénario d'autoconsommation du biométhane produit pour les filières AT, IT et Biodéchets (IPCC2021).....	141
Figure 50 - Impacts de l'utilisation de l'autoconsommation de biométhane par étapes du cycle de vie pour la filière AT, IT et Biodéchets (IPCC2021)	142
Figure 51 - Analyse comparative entre le scénario de référence utilisant un stockage couvert sans récupération de biogaz et les scénarios alternatifs de stockage ouvert et couvert avec récupération du biogaz pour la filière AA (IPCC2021).....	143
Figure 52 - Impacts de la modification du mode de stockage des digestats pour la filière AA (IPCC2021)	144
Figure 53 - Analyse comparative entre le scénario de référence utilisant un stockage couvert sans récupération de biogaz et les scénarios alternatifs de stockage ouvert et couvert avec récupération du biogaz pour la filière AT (IPCC2021)	145
Figure 54 - Impacts de la modification du mode de stockage des digestats pour la filière AT (IPCC2021)	146
Figure 55 - Analyse comparative entre le scénario de référence utilisant un stockage couvert avec récupération de biogaz et le scénario alternatif de stockage ouvert pour la filière IT (IPCC2021)	147
Figure 56 - Analyse comparative entre le scénario de référence avec un prix du digestat de 1,73€/kg N et le scénario alternatif avec un prix de 2,76€/kg N pour les filières AA, AT et IT (IPCC2021)	148
Figure 57 - Impacts de l'augmentation du prix du digestat de 60% pour les filières AA, AT et IT (IPCC2021)	149
Figure 58 - Impacts de l'évolution des pertes de méthane selon le scénario « fuites à la torchère », le scénario « Réglementation ICPE 2025 », le scénario « Meilleures pratiques atteignables » et le scénario « Valeur pivot » pour l'ensemble des filières (IPCC2021)	151
Figure 59 - Impacts de la mise en place bonnes pratiques pour l'ensemble des filières (IPCC2021)	153
Figure 60 - Impacts de la mise en place des meilleures pratiques atteignables pour l'ensemble des filières (IPCC2021)	155
Figure 61 - Impacts d'une variation de taux de fuite à la valeur pivot pour les filières AA, AT et IT (IPCC2021)	156
Figure 62 - Impacts sur le changement climatique des filières AA, AT et IT pour la méthode par substitution (IPCC 2021)	157

Figure 63 - Impacts sur le changement climatique de la filière AA pour la méthode par substitution (IPCC 2021).....	158
Figure 64 - Impacts sur le changement climatique de la filière AT pour la méthode par substitution (IPCC 2021).....	160
Figure 65 - Impacts sur le changement climatique de la filière IT pour la méthode par substitution (IPCC 2021).....	162

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Présentation de quelques intérêts et limites des méthodes de gestion de la multifonctionnalité retenues	17
Tableau 2 - Potentiel de Réchauffement climatique de la méthode IPCC 2021 100 ans.....	20
Tableau 3 - Indicateurs d'impacts de la méthode EF3.0	20
Tableau 4 - Potentiel de Réchauffement climatique de la méthode EF 3.0.....	22
Tableau 5 - Potentiel de réchauffement climatique selon la norme 15804 A2	22
Tableau 6 - Notation moyenne des données par filière en fonction des critères de la matrice de pedigree	25
Tableau 7 - Récapitulatif des fonctions, cofonctions et du périmètre par filière pour la méthode par allocation économique.....	30
Tableau 8 - Récapitulatif des fonctions, cofonctions et du périmètre par filière pour la méthode par substitution et extension de frontière	31
Tableau 9 - Spécifications et composition retenue dans le modèle pour le biométhane injecté en France	50
Tableau 10 - Données retenues pour les émissions fugitives et les pertes.	50
Tableau 11 - Part du biogaz produit envoyé en torchère selon la filière considérée (%)	51
Tableau 12 - Caractéristiques d'injection sur les réseaux de gaz.....	57
Tableau 13 - Potentiel méthanogène des filières	59
Tableau 14 - Composition des biogaz bruts pour les filières AA, AT et IT.....	60
Tableau 15 - Hypothèses de l'itinéraire technique retenues concernant la conduite des différents types de CIVE.	63
Tableau 16 - Hypothèses de l'itinéraire technique utilisé depuis Agribalyse 3.0 pour les cultures dédiées	66
Tableau 17 - Distance parcourue par type de substrat et type de véhicule associé.....	67
Tableau 18 - Modèles d'émissions lors du stockage des effluents pour 180 jours.....	68
Tableau 19 - Durée de stockage des effluents (en jours) entre un scénario avec et sans méthanisation..	69
Tableau 20 - Facteur de réduction des émissions en fonction du temps de stockage des effluents	69
Tableau 21 - Proportion des systèmes de stockage des lisiers couverts	69
Tableau 22 - Données utilisées pour le poste de digestion	71
Tableau 23 - Données utilisées pour le poste de traitement de l'air	72
Tableau 24 - Répartition des technologies d'épuration par filières AA, AT et IT	73
Tableau 25 - Potentiel de production de biogaz et de biométhane pour la filière Biodéchets	73
Tableau 26 - Composition du biogaz brut pour la filière Biodéchets.....	74
Tableau 27 - Composition du biogaz brut pour la filière ISDND	76
Tableau 28 - Compositions des biogaz bruts pour la filière STEU	77
Tableau 29 - Prix d'achats du biométhane par filière	79
Tableau 30 - Prix de prestation de mise à disposition de digestat par filière	80

Tableau 31 - Prix des unités fertilisantes.....	80
Tableau 32 - Quantité et prix des unités fertilisantes par tonne de digestat	81
Tableau 33 - Données économiques retenues pour le digestat	82
Tableau 34 - Prix des redevances déchets	82
Tableau 35 - Données volumiques ou massiques	83
Tableau 36 - Facteurs d'allocation économique pour la filière Agricole Autonome.....	83
Tableau 37 - Facteurs d'allocation économique pour la filière Agricole Territorial.....	84
Tableau 38 - Facteurs d'allocation économique pour la filière Industriel Territorial	84
Tableau 39 - Facteurs d'allocation économique pour la filière Biodéchets	84
Tableau 40 - Facteurs d'allocation économique pour les filières ISDND et STEU	84
Tableau 41 - Synthèse des étapes prises en compte dans la méthode par extension de frontière et par substitution	87
Tableau 42 - Facteurs d'émissions (sans application du facteur d'abattement) lors du stockage des digestats bruts, liquides et solides pour 180 jours.	89
Tableau 43 - Facteurs d'émissions des digestats à l'épandage	90
Tableau 44 - Facteurs d'abattement des émissions de NH ₃ en fonction des techniques d'épandage	91
Tableau 45 - Valeurs seuils en ETM des épandages de matières organiques fixées par la norme NF U44-051	92
Tableau 46 - Rattachement des substrats des mix d'intrants de chaque filière aux données de la bibliographie.....	92
Tableau 47 - Composition des intrants en ETM	93
Tableau 48 - Composition du digestat en ETM par filière.....	93
Tableau 49 - Hypothèse du devenir des substrats - hors méthanisation.....	95
Tableau 50 - Facteurs d'émissions au stockage des effluents.....	96
Tableau 51 - Ensemble des données liées à l'épandage du fumier et du lisier sans méthanisation	97
Tableau 52 - Teneur en azote des effluents.....	98
Tableau 53 - Données utilisées pour la fabrication des composts.....	99
Tableau 54 - Composition en azote des composts.....	99
Tableau 55 - Composition en azote des boues de STEU	101
Tableau 56 - Composition en azote des résidus de culture	101
Tableau 57 - Valeurs de l'azote assimilable et des MFE d'un digestat moyen des filières AA, AT, IT.....	103
Tableau 58 - Coefficient d'équivalence minérale pour les effluents et les composts.....	104
Tableau 59 - Résultats du calcul de P ₂ O ₅ et K ₂ O minéral évités pour les filières AA, AT et IT	104
Tableau 60 - Facteurs d'émissions à l'épandage des engrais minéraux.....	105
Tableau 61 - Facteurs d'émissions du biométhane selon les filières de production et toutes filières confondues avec la méthode IPCC 2021	108
Tableau 62 : Comparaison des filières - contribution des différents postes à l'indicateur Impact sur le changement climatique.....	119
Tableau 63 - Evolution du mix d'intrants des filières AA et AT pour l'analyse de sensibilité sur la proportion de CIVE.....	133
Tableau 64 : Choix réalisés pour l'évolution des proportions de la filière AT pour l'analyse de sensibilité concernant la proportion de CIVE dans le mix.....	134

1. Objectifs et enjeux de l'étude

1.1. Contexte de l'étude

1.1.1. Contexte

Avec plus de 1 100 projets inscrits au registre des capacités, la filière d'injection du biométhane est bien partie pour atteindre l'objectif fixé par la Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTEPCV) en août 2015, de 10 % de gaz renouvelable dans les réseaux à l'horizon 2030. En 2022, c'est la seule filière ENR en avance sur son objectif inscrit dans la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE).

Les performances du biométhane en termes de réduction des émissions de GES sont souvent mises en avant, afin de fonder la nécessité de son essor et la volonté collective de le privilégier vis-à-vis du gaz naturel fossile.

Par ailleurs, au vu des enjeux environnementaux et énergétiques actuels, de l'évolution des pratiques de production et leur amélioration, de la diversité des sous-filières, de la réglementation qui ne cesse de se renforcer pour rendre le biométhane encore plus vertueux, l'évaluation des impacts de ce dernier doivent être constamment mis à jour dans un souci de transparence et d'accompagnement à son expansion.

Pour ce faire, plusieurs analyses de cycle de vie (ACV) ont été effectuées depuis 2017. L'ACV réalisée en 2020 sur la base de données 2017 par QUANTIS et ENEA Consulting a calculé un facteur d'émission de la filière biométhane française de 44,1 gCO₂e/kWh PCI de biométhane produit en France, injecté dans les réseaux gaziers et consommé en chaudière. L'actuelle ACV, qui fait l'objet de ce rapport, est une mise à jour permettant de disposer d'hypothèses sourcées et plus récentes. Il s'agit d'une ACV attributionnelle, menée d'une part selon une approche par allocation et d'autre part selon une approche par substitution et extension de frontière. Elle vise par ailleurs à alimenter les bases de données suivantes : la Base Empreinte, la base INIES et Ecoinvent.

1.1.2. Revue critique de l'étude

D'après les normes ISO 14040¹ et ISO 14044², la revue critique est « un processus permettant de vérifier si une analyse du cycle de vie a satisfait aux exigences de méthodologie, de données, d'interprétation et de communication et si elle est conforme aux principes de l'analyse du cycle de vie ». Le processus et le bon déroulement de la revue critique s'appuie sur la norme ISO 14071³.

Les objectifs de cette revue critique étaient de vérifier si la présente étude répond aux exigences suivantes :

- Les méthodes utilisées pour la réalisation de l'analyse du cycle de vie sont :
 - o Cohérentes avec les normes internationales ISO 14040 et ISO 14044,
 - o Valables d'un point de vue scientifique et technique,
- Les données utilisées sont appropriées et raisonnables par rapport aux objectifs de l'étude,
- Le rapport d'étude est transparent et cohérent,
- Les interprétations reflètent les limites identifiées et les objectifs de l'étude.

La revue critique a été réalisée par un panel d'experts externes et indépendants de l'équipe projet. Le comité de revue critique est constitué de 3 membres :

¹ [ISO - ISO 14040:2006 - Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre](#)

² [ISO 14044:2006 - Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Exigences et lignes directrices](#)

³ [ISO 14071:2006 - Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Processus de revue critique et compétences des vérificateurs: Exigences et lignes directrices supplémentaires à l'ISO 14044:2006](#)

- Aurélie PERRIN, EVEA, experte ACV et présidente du comité de revue critique,
- Audrey ROUSSEAU, S3D, experte méthanisation et agronomie,
- Etienne LEES-PERASSO, consultant indépendant, expert ACV et vérificateur habilité INIES.

La revue critique atteste de la crédibilité de l'étude. Cependant, elle ne justifie pas une validation de l'intégration des données dans les différentes bases de données : Base Empreinte et Ecoinvent. Ce choix repose sur le comité de gouvernance ou comité technique de chaque base de données qui devra valider la conformité des données en fonction de ses propres règles. Concernant la base INIES, la présence d'un vérificateur habilité au sein du panel d'experts permet de s'assurer du respect des règles du programme.

1.2. Objectifs de l'étude

1.2.1. Analyse de six filières de production de biométhane français

Depuis les ACV menées par QUANTIS et ENEA Consulting (étude publiée en 2017), la typologie des sites d'injection de biométhane français a été mise à jour dans le panorama des gaz renouvelables⁴. En effet, la répartition des filières a été remaniée et une nouvelle disposition est désormais valable. L'ancienne filière Agricole Territorial, qui représentait un poids très important, a été divisée en 3 sous-filières : Agricole Autonome (AA), Agricole Territorial (AT), Industriel Territorial (IT).

Les filières ISDND (Installations de Stockage de Déchets Non Dangereux) et STEU (Stations d'Épuration des Eaux Usées) n'ont pas été modifiées.

Cependant, les filières Traitement des Ordures Ménagères (sans tri à la source) et Gestion des biodéchets ménagers (avec tri à la source) sont désormais regroupées en une seule filière : Déchets ménagers / Biodéchets. Ce choix repose sur le fait qu'à partir du 1^{er} janvier 2024, les particuliers disposeront de solutions de tri à la source de leurs biodéchets⁵. De fait, l'importance de la filière sans tri à la source diminuera à l'avenir.

Ainsi, les six filières modélisées sont :

- Agricole Autonome (AA)
- Agricole Territorial (AT)
- Industriel Territorial (IT)
- Installations de Stockage de Déchets Non Dangereux (ISDND)
- Stations d'Épuration des eaux Usées (STEU)
- Déchets ménagers / biodéchets

Chacune de ces filières et les données associées sont décrites dans la suite du rapport.

1.2.2. Intégration dans les bases de données

L'étude d'ACV effectuée doit permettre d'actualiser les valeurs associées au biométhane dans les bases de données citées en 1.1.1. Le nouveau facteur d'émission du biométhane injecté et consommé en France sera proposé courant 2023 pour intégration à la Base Empreinte après validation par l'ADEME.

⁴ [GRT et al., Panorama des gaz renouvelables en 2021, 2021](#)

⁵ [Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, Ministère de la Transition énergétique, Biodéchets](#)

Par ailleurs, le deuxième objectif de cette étude consiste à proposer l'intégration de différents indicateurs environnementaux dans la Base INIES, base de données de référence pour la réalisation d'ACV dans le secteur du bâtiment.

Enfin, cette étude vise par ailleurs, à alimenter la Base de données EcolInvent. Ce processus d'intégration est toutefois géré directement avec EcolInvent, y compris la revue critique et ne sera donc pas détaillé ici.

2. Champ de l'étude

2.1. Définition du système et unité fonctionnelle

La production de biométhane va dépendre du type et de la quantité d'intrants qui sont utilisés au sein de l'unité. Ces caractéristiques peuvent être assez hétérogènes d'une unité à une autre. C'est pourquoi les unités sont regroupées en 6 grandes catégories (comme présentées plus haut, en 1.2.1) qui tiennent compte de cette diversité. De manière générale, des processus identiques se retrouvent entre les 6 filières.

L'unité fonctionnelle est la référence quantitative à laquelle toutes les composantes du cycle de vie, les calculs d'inventaire et l'évaluation des impacts se rapportent. Ce paramètre doit être clairement défini dans l'espace et dans le temps, et être mesurable.

Dans le cadre de cette étude, la filière biométhane a une fonction principale qui consiste à produire du biométhane gazeux et à l'injecter dans les réseaux de gaz français. Puisque le biométhane est 100% miscible avec le gaz naturel, il peut être injecté dans le même réseau et répondre aux mêmes usages que le gaz naturel. Ce biométhane a, par conséquent, une vocation énergétique uniquement. L'usage du biométhane à travers le bioGNV (Gaz Naturel Véhicule) ou encore du biogaz à travers l'électricité, la chaleur ou la cogénération (valorisation à la fois de l'électricité et de la chaleur) ne sont pas étudiés ici. Cette étude étant une mise à jour des précédentes études d'ACV réalisées par QUANTIS – ENEA Consulting et dans un souci de maintenir une continuité avec les travaux précédents, l'unité fonctionnelle adoptée dans le cadre de cette ACV est la suivante :

Produire, injecter et consommer 1kWh PCI de biométhane issu de déchets ou de cultures en France à travers une combustion en chaudière pour la production de chaleur

L'étude couvre une utilisation de biométhane injecté à travers une combustion en chaudière (consommation résidentielle et industrielle). Les autres usages du biométhane telles que la mobilité, ne sont pas couverts par cette étude.

Le schéma ci-dessous (

Figure 1) est une représentation macro simplifiée des différentes filières et de leurs processus :

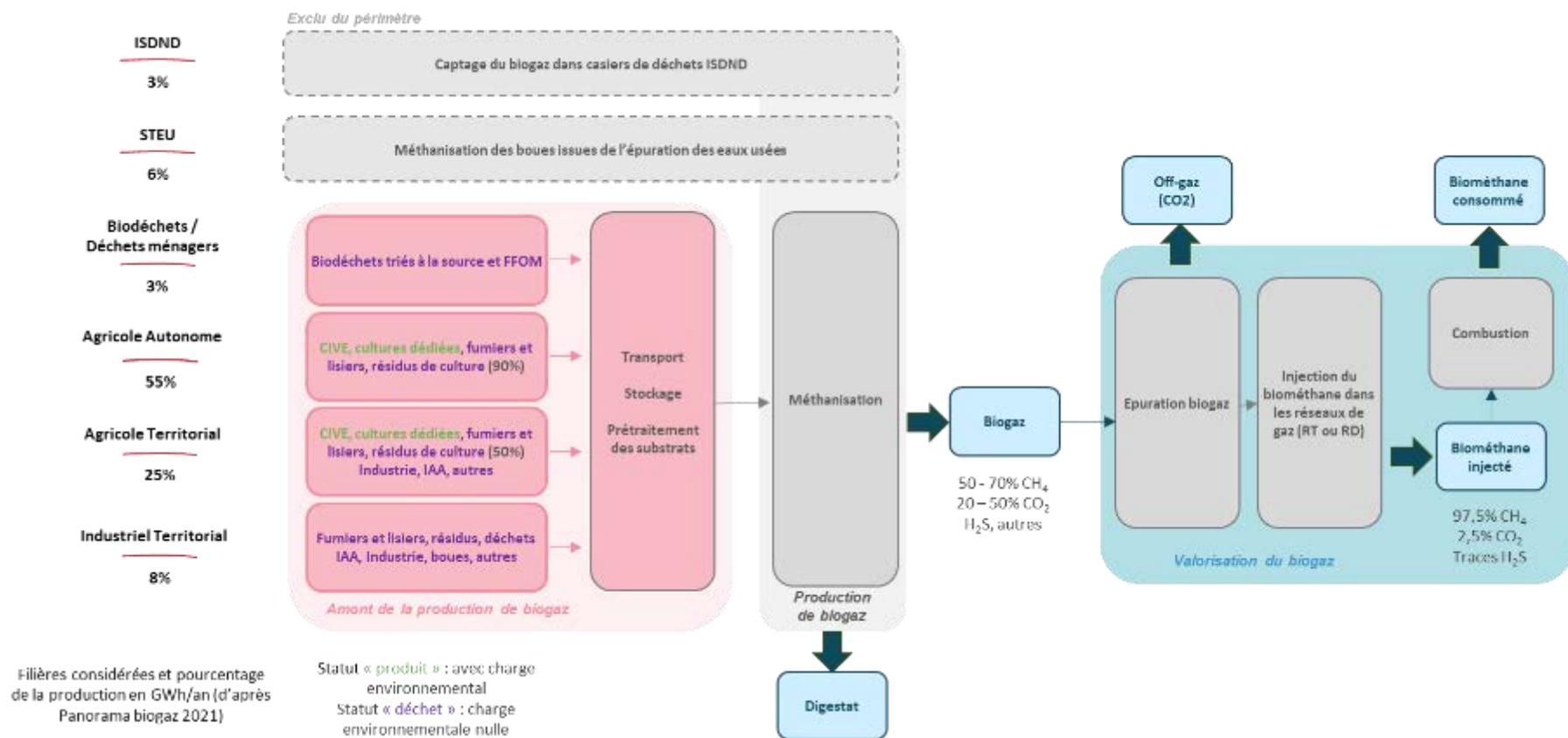


Figure 1 - Schéma macro simplifié des différentes filières de production de biométhane en France.

Cette étude rend compte des impacts liés à un seul service, celui décrit dans l'unité fonctionnelle. Par ailleurs, ce procédé de méthanisation rend d'autres services. Certaines filières de production de biométhane présentent d'autres fonctions dites secondaires telles que :

- La production de digestat avec des valeurs fertilisantes en NPK ;
- La production d'off-gaz (CO₂) ;
- Le traitement des déchets ;
- L'élimination du gaz de décharge ;
- L'hygiénisation des déchets (dépendant de la composition du mix d'intrants).

Il existe **plusieurs méthodes pour prendre en compte la multifonctionnalité** de ce procédé qui sont présentées ci-après.

2.2. La gestion de la multifonctionnalité de la méthanisation

2.2.1. Généralités

Un produit ou service peut remplir plusieurs fonctions, c'est la multifonctionnalité. Il peut s'avérer complexe de répartir les impacts entre ces différentes fonctions. La norme ISO 14044 précise trois méthodes mobilisables pour gérer la multifonctionnalité. Ces méthodes sont hiérarchisées car elles ne se valent pas en termes de robustesse scientifique, de pertinence ou de complexité de mise en œuvre. L'objet de cette partie du rapport est ainsi de présenter ces méthodes et de justifier les choix effectués en termes de gestion de la multifonctionnalité pour la méthanisation.

Il est premièrement recommandé que l'allocation soit évitée autant que possible en :

- Divisant le processus élémentaire à affecter en deux sous-processus ou plus et en recueillant les données d'intrants et d'extrants rattachées à ces sous-processus,
- Etendant le système de produits pour y inclure les fonctions supplémentaires des coproduits (méthode par substitution).

Néanmoins lorsque l'allocation est inévitable, il convient que les intrants et les extrants du système soient répartis entre ces différents produits ou fonctions d'une manière qui reflète les relations physiques sous-jacentes existant entre eux.

Finalement, lorsqu'une relation physique seule ne peut pas être établie ou utilisée comme base de l'allocation, il convient que les intrants soient affectés entre les produits et les fonctions d'une manière qui reflète d'autres relations mutuelles. Par exemple, des données d'intrants et d'extrants pourraient être allouées entre coproduits proportionnellement à la valeur économique des produits.

Le choix de la méthode de gestion de la multifonctionnalité a donc reposé sur la hiérarchisation proposée par la norme ISO14044 mais également sur des contraintes inhérentes à l'étude que sont les objectifs de mise à jour du facteur d'émission calculé dans la précédente étude réalisée par QUANTIS - ENEA Consulting⁶ et ceux d'intégration dans les bases de données Empreinte, INIES et Ecoinvent.

⁶ QUANTIS – ENEA Consulting, Evaluation multi-indicateurs des impacts environnementaux de l'injection du biométhane dans le réseau de gaz en appliquant une approche d'allocation, 2021

2.2.2. Gestion de la multifonctionnalité dans les bases de données

La Base Empreinte de l'ADEME construit sa base de données sur une logique attributionnelle. C'est-à-dire que les facteurs d'émissions fournis dans la base font référence à des ACV au système statique dans le temps. À l'inverse d'une ACV consécutielle qui analyse les impacts environnementaux consécutifs d'un changement de pratiques dans un système et qui dès lors amène une notion temporelle pour passer d'un système à un autre. Trois méthodes sont mobilisables pour gérer la multifonctionnalité de la méthanisation au sein de la base de données, mais certaines demandent des étapes de vérification supplémentaires :

- Répartition des impacts en fonction de processus distincts,
- Extension des frontières et /ou substitution,
- Allocation (massique, économique...) pertinente liée à l'unité fonctionnelle du produit ou service,

La méthode par extension de frontières et substitution demande de définir avec précision les fonctions du co-produit considéré et d'intégrer de nouvelles frontières d'études, ce qui peut apporter davantage d'incertitudes à l'étude. Cette méthode est de manière générale moins utilisée car elle complexifie l'interprétation des résultats.

La base INIES repose sur la norme EN 15804+A2 qui demande également à employer la méthode par allocation avec critère physique en priorité dans le cas où les coproduits génèrent de faibles différences de revenus. L'allocation économique doit-être utilisée dans les autres cas.

2.2.3. Gestion de la multifonctionnalité au sein de l'étude

Dans le cadre de cette étude, le processus de méthanisation possède deux fonctions communes à toutes les filières que sont la génération via le procédé de digestion de deux co-produits distincts : le biométhane et le digestat. A noter qu'une troisième fonction est à comptabiliser pour la filière biodéchets : la fonction de traitement des déchets. Pour toutes les filières, les deux co-produits sont générés en même temps lors de la digestion et ce processus ne peut être subdivisé en deux sous-processus distincts. Dans ce cas, la gestion de la multifonctionnalité est inévitable, soit par l'extension de frontière (méthode par substitution), soit par une allocation. Chacune des méthodes répond à différents enjeux et impactera les paramètres de la modélisation et le choix des hypothèses. L'un des enjeux de cette étude est la répartition des impacts environnementaux entre chacune des fonctions de la méthanisation.

La **méthode par substitution**, intègre les fonctions additionnelles remplies par les coproduits ou les cofonctions dans les frontières du système d'étude, et vise ainsi à substituer l'utilisation d'un produit existant par celle du coproduit ou des cofonctions intégrés dans le cas où ils répondent à la même fonction (Figure 2). Les impacts environnementaux engendrés par la production et l'utilisation du produit de base sont alors remplacés par ceux du coproduit. La substitution nécessite l'utilisation d'un coproduit moyen représentatif du marché. Elle peut s'accompagner d'une extension de frontière qui permet justement d'intégrer les étapes de valorisation / utilisation des coproduits au sein du système⁷.

Par exemple, dans la filière biométhane, le coproduit tel que le digestat, grâce à sa fonction d'apport de matières fertilisantes, peut se substituer à l'utilisation d'un engrais minéral de synthèse moyen (représentatif du marché) utilisé dans le scénario de référence. En effet, la substitution des impacts doit être réalisée par rapport à un scénario de référence dont les hypothèses sont statuées au préalable.

⁷ QUANTIS – ENEA Consulting, Evaluation multi-indicateurs des impacts environnementaux de l'injection du biométhane dans le réseau de gaz en appliquant une approche d'allocation, 2021

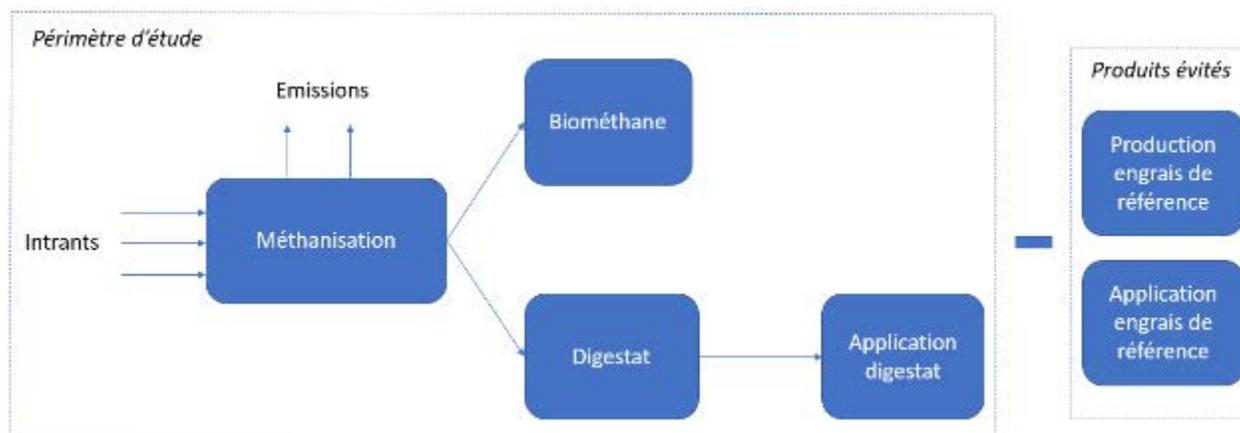


Figure 2 - Schéma simplifié de l'approche par substitution/Extension de frontière

Cette méthode a été sélectionnée car elle est applicable et répond aux exigences de la norme ISO 14044.

Cette approche permet de gérer la multifonctionnalité de la filière biométhane en rendant compte de ses services, par le biais du digestat et possiblement de mesurer des impacts évités par sa production. Néanmoins, cette méthode n'est pas suffisante car elle ne permet pas d'intégrer un jeu de données dans la base de données INIES. C'est également une méthode plus complexe à appliquer et très sensible aux choix du scénario de référence qui est substitué, d'autant plus lorsque l'étude ACV a pour objectif d'être représentative d'une filière. Pour ces raisons, une méthode d'allocation a été sélectionnée pour compléter l'étude.

La **méthode par allocation** permet d'attribuer les flux entrants et sortants du système étudié, et par conséquent ses impacts, entre le système du produit « principal » et le ou les systèmes de coproduits ou cofonctions (fonctions secondaires) associés. Cette répartition des flux s'effectue grâce à des facteurs d'allocation basés selon des critères économiques, massiques ou encore énergétiques. Le poids de chaque fonction est alors déterminé par des calculs au prorata du poids des coproduits ou des cofonctions par rapport au produit analysé. Une partie de la charge environnementale du produit analysé est finalement allouée au coproduit ou à la cofonction via ces facteurs.

La filière biométhane permet de produire de l'énergie mais également de traiter des déchets et de produire des matières fertilisantes (cofonctions). Par conséquent, la méthode par allocation est utilisée pour ne pas allouer l'ensemble des impacts environnementaux à la production de biométhane (Figure 3).

Par exemple, dans le cas d'une allocation économique, le calcul du prorata économique dépend de la valeur du produit au kg (avec pP : prix du produit et mP : masse du produit) et la valeur du coproduit au kg (avec pCP : prix du coproduit et mCP : masse du coproduit), la relation est la suivante :

$$\% \text{ économique} = \frac{mP \times pP}{(mP \times pP) + (mCP \times pCP)}$$

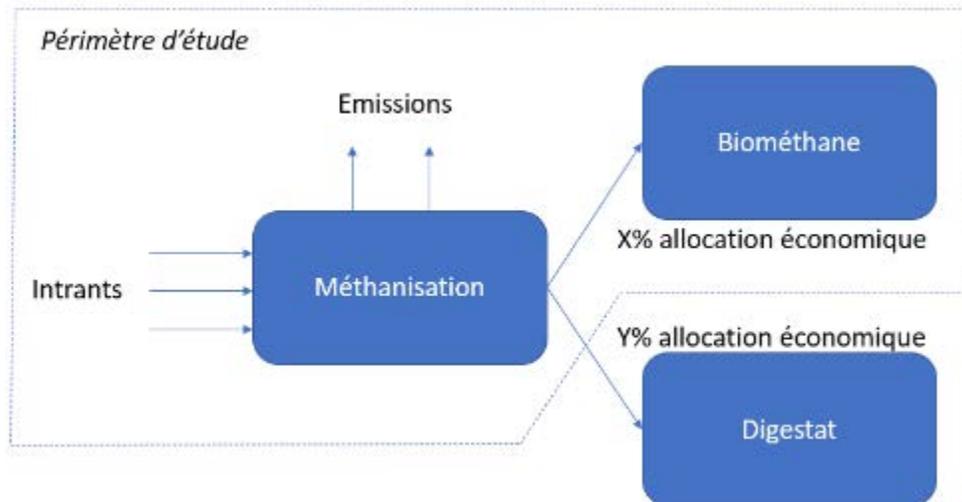


Figure 3 - Schéma simplifié de l'approche par allocation économique

Le même principe est applicable à la **méthode d'allocation massique**, si ce n'est que c'est la proportion du poids du coproduit par rapport au produit qui est alors utilisée comme critère d'affectation. Cette logique s'emploie également avec l'**allocation énergétique** qui se base sur le contenu en énergie du coproduit en comparaison au produit⁸.

L'allocation massique ne semble pas adaptée pour cette étude, étant donné le différentiel important des fonctions des co-produits en jeu, et de leur nature physique (gaz et solide). De même, l'allocation énergétique est moins pertinente car le digestat n'est jamais utilisé comme ressource énergétique. De plus, ces méthodes physiques (allocation massique et énergétique) ne permettent pas de gérer les fonctions additionnelles comme le traitement des déchets. Pour ces raisons, une allocation économique semble plus adaptée à la filière biométhane, d'autant qu'elle permet d'intégrer la base de données Empreinte et INIES et que cette approche était déjà utilisée dans l'étude préalable réalisée par QUANTIS - ENEA Consulting⁹.

Pour employer la **méthode d'allocation économique**, la valeur économique de chaque fonction secondaire est mesurée pour en déduire sa proportion par rapport au prix de vente du produit principal. Ensuite, ce pourcentage sera déduit de la charge environnementale du biométhane pour être alloué à la fonction secondaire calculée (Figure 4). Les données économiques utilisées dans cette étude sont présentées en section 4.5.2 et les facteurs d'allocation économique en section 4.5.3.

La Figure 4 montre les étapes et fonctions prises en compte dans le cas de l'allocation économique pour la filière AA et Biodéchets. Ces deux filières sont ici prises comme exemple, le raisonnement est identique pour les autres filières. La méthanisation remplit 4 fonctions, qui seront davantage décrites dans la suite de l'étude. Les impacts ne sont répartis que sur 3 de ces 4 fonctions. En effet, la production d'off gaz n'étant pour le moment pas suffisamment mature, elle n'est pas considérée dans l'allocation. Les étapes intégrées dans le périmètre de chaque filière peuvent varier : la filière biodéchets n'est pas concernée par les émissions liées aux productions agricoles, étant donné que les intrants ne proviennent pas d'exploitations agricoles. De même, le digestat produit est de qualité variable par rapport aux autres filières, d'où sa faible valeur économique et son plus faible taux d'allocation (étude QUANTIS – ENEA Consulting 2021⁹).

⁸ [Jean-Marc ENGASSER, Analyse du Cycle de Vie - Application aux Bioproduits, Allocation des impacts](#)

⁹ QUANTIS – ENEA Consulting Evaluation multi-indicateurs des impacts environnementaux de l'injection du biométhane dans le réseau de gaz en appliquant une approche d'allocation, 2021

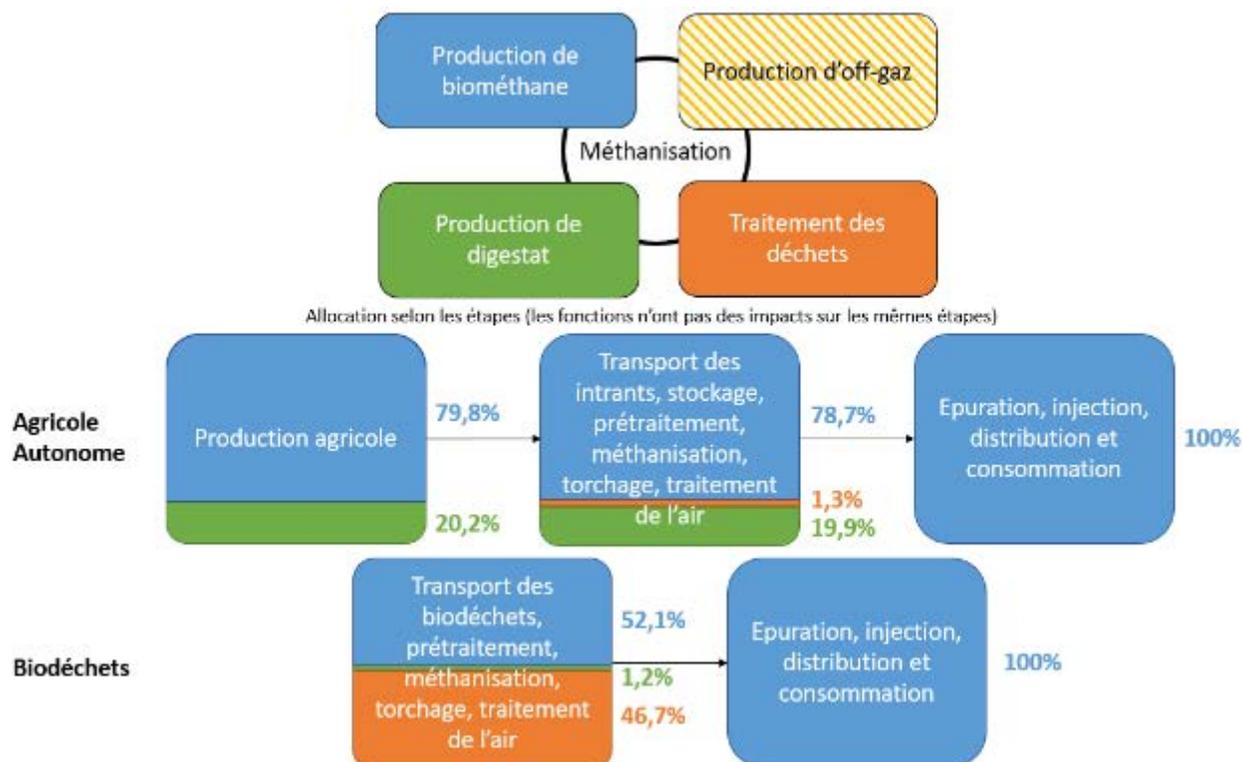


Figure 4 - Schéma explicatif de la méthode d'allocation économique du biométhane exemple selon deux filières : Agricole Autonome et Biodéchets

Certains intérêts et limites des méthodes d'allocation prises en compte dans le cadre de cette étude sont présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1 - Présentation de quelques intérêts et limites des méthodes de gestion de la multifonctionnalité retenues^{10,11}

	Intérêt	Limites
Allocation économique	Faciliter d'application, les produits, coproduits, fonctions ou cofonctions ont majoritairement tous une valeur économique.	Influence des prix de marché : elle peut être variable dans le temps tandis que l'impact environnemental ne change pas. Exemple : une même étude réalisée en année N pourra montrer des résultats différents en année N+3 si le marché a été sujet à une forte évolution des prix.
	Possibilité de fixer un prix représentatif du marché moyen sur une certaine période.	Impact environnemental pas toujours corrélé au prix.
		L'évolution des prix influence la manière dont sera valorisé le coproduit, sa fonction et son utilisation peuvent évoluer.
Extension de frontière	Mesure un impact plus global en considérant davantage d'externalités du	Plus de complexité dans la modélisation des impacts, en élargissant les frontières il y a

¹⁰ C. Chen et al., LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling: An application to mineral additions in concrete, 2010

¹¹ Kodera Keiji, Analysis of allocation methods of bioethanol LCA, 2007

avec substitution	produit, de l'activité ou du service en élargissant le périmètre.	plus de paramètres à considérer, et des choix critiques sur les filières à substituer qui peuvent augmenter les incertitudes de manière conséquente. L'étude devient très sensible aux choix méthodologiques de la modélisation de la filière substituée.
	Plus appropriée pour les systèmes étudiés avec des coproduits qui au long de leur cycle de vie, seront utilisés à la place d'autres produits ou matières dans des processus.	Demande une importante quantité de données.
		Utilisation d'un produit de référence

En synthèse, pour prendre en compte à la fois :

- i) La hiérarchisation proposée par la norme ISO 14044,
- ii) L'objectif d'intégration dans les bases de données Empreinte, INIES et Ecoinvent,
- iii) La volonté de représenter au mieux la mise à jour des impacts de l'étude QUANTIS – ENEA Consulting,

L'étude actuelle mesure d'une part, l'impact de la filière biométhane à travers une méthode par allocation économique et d'autre part, à travers la méthode d'extension de frontière avec substitution.

2.3. Critères de coupure et d'exclusion

L'étape d'ICV au sein d'une ACV dresse la liste exhaustive des intrants et sortants dans les frontières du système étudié. Pour simplifier la construction de l'ICV, des critères de coupure peuvent être employés afin de définir si un intrant ou sortant est pertinent à inclure dans l'analyse ou si au contraire, il peut être exclu. Les critères sont des pourcentages seuils, qui peuvent être fixés en fonction de la masse, de l'énergie ou encore de la portée environnementale des produits¹². En effet, certains composants chimiques présents en très faible quantité dans un processus pourraient être exclus de l'ICV si la règle de coupure était fixée uniquement selon un critère de masse. Pour autant, le poids de ces composants dans les résultats d'impact environnemental pourrait être bien plus important que leur proportion massique dans l'ICV.

La Base Empreinte exige une règle de coupure massique de maximum 5%. Néanmoins, si un produit avec une masse inférieure au critère de coupure engendre un impact carbone non négligeable, il doit alors être inclus¹³.

Concernant la base de données Ecoinvent, sa version 3 n'applique aucune règle stricte quant au critère de coupure¹⁴. Les jeux de données doivent être aussi complets que possibles et intégrer l'ensemble des intrants et sortants connus.

Compte tenu des exigences de la Base Empreinte, le critère de coupure doit être au maximum fixé à 5%. Le critère de coupure retenu dans cette étude est un **critère de coupure environnemental de 1%** qui permet de considérer un ICV plus exhaustif.

2.4. Evaluation des impacts environnementaux

2.4.1. Base Empreinte et méthode IPCC 2021 - 100 ans : Changement climatique

La méthode IPCC 2021 - 100 ans est la méthode de caractérisation des émissions de gaz à effet de serre requise pour la soumission des données à la Base Empreinte et développée pour le GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat).

Pour pouvoir comparer l'impact des différents GES sur le réchauffement climatique, le PRG (Potentiel de Réchauffement Global) à 100 ans est utilisé comme facteur de caractérisation. Chaque GES dispose d'un PRG à 100 ans (Tableau 2). La multiplication de la quantité émise d'un gaz par le PRG de ce gaz donne une valeur dite en équivalent CO₂ noté CO₂e. Dans cette méthode, le dioxyde de carbone biogénique n'a aucun impact, qu'il soit séquestré ou émis. Utiliser cette approche a du sens pour le biométhane dont le dioxyde de carbone biogénique capté à l'origine, sera rapidement relargué dans l'atmosphère lors de la combustion.

$$\text{Emissions gaz (en g CO}_2\text{e)} = \text{Emissions gaz (en g)} * \text{PRG (gaz)}$$

¹² [UVED, Méthodologie de l'Analyse du Cycle de Vie \(ACV\), Critère de coupure, 2012](#)

¹³ [Base Carbone, Procédure d'évaluation et de validation de données, 2018](#)

¹⁴ [Ecoinvent, Overview and methodology – Data quality guideline for the ecoinvent database version 3, 2013](#)

Tableau 2 - Potentiel de Réchauffement climatique de la méthode IPCC 2021 100 ans

Gaz	Potentiel de réchauffement climatique (PRG) à 100 ans (IPCC 2021)
Dioxyde de carbone fossile – CO _{2f}	1
Dioxyde de carbone biogénique – CO _{2b}	0
Méthane – CH _{4f}	29,8
Méthane biogénique – CH _{4b}	27
Protoxyde d'azote – N ₂ O	273
Gaz fluorés	Divers

2.4.2. Résultats Multi-indicateurs et méthode EF 3.0

La **méthode EF 3.0** est une méthode s'inscrivant dans le programme PEF (Product Environmental Footprint) développé au niveau européen par le JRC (Joint Research Center). L'objectif primordial de ce programme est de réduire les impacts environnementaux des biens et services au sein de l'Union Européenne en tenant compte des activités de la chaîne d'approvisionnement (depuis l'extraction des matières premières, en passant par la production, l'utilisation et la gestion des déchets ultimes). Ce programme vise ainsi à définir un cadre méthodologique pour harmoniser les pratiques de modélisation ACV pour différents secteurs, mais également de produire une méthode de calcul d'impact de référence au niveau européen. Cette méthode, nommée EF, permet de quantifier les impacts environnementaux des produits (biens ou services) à travers **15 indicateurs**, et s'appuie sur des méthodes de calcul d'impact existantes et sur des normes internationales (Tableau 3).

Tableau 3 - Indicateurs d'impacts de la méthode EF3.0

Indicateur d'impact	Détails	Unité	Méthode
Changement climatique	Indicateur le plus connu, correspond à la modification du climat, affectant l'écosystème global.	kg CO ₂ eq	Modèle de base 100 ans de l'IPCC (basé sur IPCC 2013 modifié par le JRC)
Particules fines	Les particules fines pénètrent dans les organismes, notamment via les poumons. Elles ont un effet sur la santé humaine.	disease incidence	Particulate Matter méthode recommandé par l'UNEP (UNEP 2016)
Épuisement des ressources en eau	Correspond à la consommation d'eau et son épuisement dans certaines régions. Cette catégorie tient compte de la rareté (cela a plus d'impact de consommer un litre d'eau au Maroc qu'en Bretagne).	m ³ world eq	AWARE recommandé par l'UNEP, 2016
Épuisement des ressources énergétiques	Correspond à l'épuisement des ressources énergétiques non renouvelables : charbon, gaz, pétrole, uranium, etc.	MJ	CML 2002 (Guinée et al., 2002) et van Oers et al. 2002.
Usage des terres	Les terres sont une ressource finie, qui se partage entre milieux "naturels" (forêt), productifs (agricultures) et urbains. L'usage des terres et les habitats déterminent dans une large mesure la biodiversité. Cette catégorie reflète donc l'impact d'une activité sur la dégradation des terres, en référence à « l'état naturel ».	point	Soil quality index base sur LANCA (Beck et al. 2010 and Bos et al. 2016)

Épuisement des ressources - minéraux	Correspond à l'épuisement des ressources minérales non renouvelables : cuivre, potasse, terres rares, sable, etc.	kg Sb eq	CML 2002 (Guinée et al., 2002) et van Oers et al. 2002.
Appauvrissement de la couche d'ozone	La couche d'ozone est située en haute altitude dans l'atmosphère, elle protège des rayons ultra-violet solaires. Son appauvrissement augmente l'exposition de l'ensemble des êtres vivants à ces radiations négatives (cancérogènes en particulier).	kg CFC-11 eq	Steady-state Ozone Depletion Potential (WMO 1999)
Acidification	Résulte d'émissions chimiques dans l'atmosphère qui se redéposent dans les écosystèmes. Cette problématique est connue en particulier via le phénomène des pluies acides.	mol H+ eq	Accumulated Exceedance (Seppälä et al. 2006, Posch et al, 2008)
Radiation ionisante, effet sur la santé	Correspond aux effets de la radioactivité. Cet impact correspond aux déchets radioactifs résultants de la production de l'électricité nucléaire.	kBq U235 eq	Human health effect model développé par Dreicer et al. 1995 (Frischknecht et al, 2000)
Formation photochimique d'ozone	Correspond à une dégradation de la qualité de l'air, principalement via la formation de brouillard de basse altitude nommé "smog". Il a des conséquences néfastes sur la santé.	kg NMVOC eq	LOTOS-EUROS model (Van Zelm et al, 2008) implémenté dans ReCiPe 2008
Eutrophisation, terrestre	Comme dans l'eau, l'eutrophisation terrestre correspond à un enrichissement excessif du milieu, en azote en particulier, conduisant à un déséquilibre et un appauvrissement de l'écosystème. Ceci concerne principalement les sols agricoles.	mol N eq	Accumulated Exceedance (Seppälä et al. 2006, Posch et al, 2008)
Eutrophisation, marine	Correspond à un enrichissement excessif des milieux naturels en nutriments, ce qui conduit à une prolifération et une asphyxie (zone morte). C'est ce phénomène qui est à l'origine des algues vertes.	kg N eq	EUTREND model (Struijs et al, 2009) implémenté dans ReCiPe
Eutrophisation, eau douce	Correspond à un enrichissement excessif des milieux naturels en nutriments, ce qui conduit à une prolifération et une asphyxie (zone morte). C'est ce phénomène qui est à l'origine des algues vertes. On peut le retrouver en rivière et en lac également.	kg P eq	EUTREND model (Struijs et al, 2009) implémenté dans ReCiPe
Ecotoxicité d'eau douce,	Indicateurs de toxicité via la contamination de l'environnement. Ces indicateurs sont encore peu robustes actuellement.	CTUe	USEtox model, (Rosenbaum et al, 2008)
Effets toxicologiques sur la santé humaine : substances non-cancérogènes et substances cancérogènes (2 indicateurs séparés)	Impact sur la santé lié à l'exposition de la population générale aux contaminants chimiques via les pollutions du milieu (air, eau, sol). Ces contaminants émis dans l'environnement sont notamment des pesticides, des métaux lourds ou encore des polluants industriels.	CTUh	USEtox model (Rosenbaum et al, 2008)

Dans la méthode EF 3.0, le dioxyde de carbone biogénique est comptabilisé pour 0, à l'instar de la méthode IPCC (Tableau 4).

Tableau 4 - Potentiel de Réchauffement climatique de la méthode EF 3.0

Gaz	Potentiel de réchauffement climatique (PRG) à 100 ans (EF3.0)
Dioxyde de carbone fossile – CO ₂ f	1
Dioxyde de carbone biogénique – CO ₂ b	0
Méthane – CH ₄ f	36,8
Méthane biogénique – CH ₄ b	34
Protoxyde d'azote – N ₂ O	298
Gaz fluorés	Divers

2.4.3. Base INIES et norme NF EN 15804+A2 / CN : Changement climatique

La base INIES fournit des Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) de produits de construction et des Profils Environnementaux Produits (PEP) pour les équipements du bâtiment. Cette base de données suit la norme européenne NF EN 15804+A2 :2019 et son complément national NF EN 15804 /CN:2016 pour les produits de construction. Les données à intégrer dans la base INIES doivent aussi respecter les principes de l'ACV décrits par les normes internationales ISO 14040 et ISO 14044.

La méthode de calcul utilisée est la méthode *Method Ev-DEC EN15804+A2 EPD ei3,8 SP9,4 V1,11*, diffusée par le cabinet EVEA. Au total, **39 indicateurs sont calculés**, dont 4 indicateurs de changement climatique.

Le modèle est basé sur la méthode IPCC 2013, mais comprend des ajouts de facteurs calculés par le JRC et des corrections effectuées par EVEA pour bien correspondre à la norme. L'approche sur le carbone biogénique est également différente. En effet, selon la norme EN 15804, les émissions de carbone biogénique provoquent la même quantité de changement climatique que le carbone fossile, mais peuvent être neutralisées en prenant en compte le CO₂ capté dans l'atmosphère, notamment grâce à la photosynthèse.

L'indicateur « changement climatique » est ainsi divisé en 4 indicateurs, dont le premier est la somme des 3 suivants :

- Potentiel de réchauffement global - total (PRG-total)
- Potentiel de réchauffement global - combustibles fossiles (PRG-fossile)
- Potentiel de réchauffement global - biogénique (PRG-biogénique)
- Potentiel de réchauffement global - occupation des sols et transformation de l'occupation des sols (PRG-luluc)

Le Tableau 5 suivant détaille les PRG des GES selon la méthode 15804 A2.

Tableau 5 - Potentiel de réchauffement climatique selon la norme 15804 A2

Gaz	PRG-total	PRG-fossile	PRG-biogénique	PRG-luluc
Dioxyde de carbone fossile – CO ₂ f	1	1	NC	NC

Dioxyde de carbone biogénique – CO ₂ b	1	NC	1	NC
Dioxyde de carbone capté dans l'air	-1	NC	-1	NC
Dioxyde de carbone – transformation des sols	1	NC	NC	1
Dioxyde de carbone – stocké dans le sol ou la biomasse	-1	NC	NC	-1
Monoxyde de carbone	1.57	1.57	NC	NC
Monoxyde de carbone, biogénique	1.57	1.57	1.57	NC
Monoxyde de carbone, transformation des sols	1.57	NC	NC	1.57
Méthane – CH ₄ f	36.75	36.75	NC	NC
Méthane biogénique – CH ₄ b	36.75	NC	36.75	NC
Méthane, transformation des sols	36.75	NC	NC	36.75
Protoxyde d'azote – N ₂ O	298	298	NC	NC
Gaz fluorés	Divers	Divers	NC	NC

2.4.4. Base INIES et norme NF EN 15804+A2 : Autres indicateurs

L'ensemble des indicateurs considérés dans la norme NF EN 15804+A2¹⁵ + CN sont détaillés ci-dessous. À savoir que dans le cadre de cette ACV, toutes les catégories d'impacts ne présentent pas nécessairement de résultats. En effet, la filière biométhane et les émissions qu'elle engendre n'affectent pas toutes les catégories d'impacts de la même manière. Les catégories pour lesquelles les impacts resteront minimes ou inexistantes ne sont pas développées dans les résultats, par souci de simplification et clarté.

- Changement climatique (en kgCO₂ éq) :
 - o Changement climatique – total
 - o Changement climatique – combustibles fossiles
 - o Changement climatique – biogénique
 - o Changement climatique – occupation des sols et transformation de l'occupation des sols
- Appauvrissement de la couche d'ozone (en kg CFC 11 éq),
- Acidification (en mole H⁺ éq),
- Eutrophisation :
 - o Eutrophisation aquatique – eaux douces (en kg PO₄ éq),
 - o Eutrophisation aquatique – marine (en kg N éq),
 - o Eutrophisation – terrestre (en mole N éq),
- Formation d'ozone photochimique (kg COVNM éq),
- Epuisement des ressources abiotiques :

¹⁵ EVEA, Guide d'utilisation des méthodes de calcul pour la réalisation de déclarations environnementales de produits (EPD / PEP) EN 15804+A2 / PEP ECOPASSPORT ED4, 2022

- o Epuisement des ressources abiotiques – minéraux et métaux (en kg Sb éq),
 - o Epuisement des ressources abiotiques – combustibles fossiles (en MJ, PCI),
- Besoin en eau (m³ de privation éq dans le monde),
- Emission de particules fines (en incidence de maladie),
- Rayonnements ionisants, santé humaine (en kBq ²³⁵U éq),
- Ecotoxicité - eaux douces (en CTUe),
- Toxicité humaine (en CTUh) :
 - o Toxicité humaine - effets cancérigènes,
 - o Toxicité humaine, effets non cancérigènes,
- Impacts liés à l'occupation des sols/Qualité du sol (sans dimension),
- Utilisation de ressources renouvelables (en MJ, PCI) :
 - o Utilisation d'énergie primaire renouvelable hors ressources renouvelables utilisées comme matières premières,
 - o Utilisation de ressources primaires renouvelables utilisées en tant que matières premières,
 - o Utilisation totale des ressources d'énergie primaire renouvelables (énergie et ressources d'énergie primaire utilisées comme matières premières),
 - o Utilisation de combustibles secondaires renouvelables,
- Utilisation de ressources non renouvelables (en MJ, PCI) :
 - o Utilisation d'énergie primaire non renouvelable hors ressources non renouvelables utilisées comme matières premières,
 - o Utilisation de ressources primaires non renouvelables utilisées en tant que matières premières,
 - o Utilisation totale des ressources d'énergie primaire non renouvelables (énergie primaire et ressources d'énergie primaire utilisées comme matières premières),
 - o Utilisation de combustibles secondaires non renouvelables,
- Utilisation de matières secondaires (en kg),
- Utilisation nette d'eau douce (en m³),
- Déchets (en kg) :
 - o Déchets dangereux éliminés,
 - o Déchets non dangereux éliminés,
 - o Déchets radioactifs éliminés,
- Composants destinés à la réutilisation (en kg),
- Matériaux destinés au recyclage (en kg),
- Matériaux destinés à la récupération d'énergie (en kg),
- Énergie fournie à l'extérieur (en MJ, PCI).

Norme française NF EN 15804/CN :

- Énergie fournie à l'extérieur (en MJ, PCI) :
 - o Electricité,
 - o Vapeur,
 - o Gaz de process.

2.5. Evaluation de la qualité des données

La qualité des résultats et la pertinence des conclusions de l'ACV dépendent grandement de la fiabilité et de la représentativité des données utilisées. Il est donc important de s'assurer que ces données respectent certaines exigences spécifiées en accord avec l'objectif de l'étude.

Selon la norme ISO 14044, les exigences relatives à la qualité des données doivent au minimum en assurer la cohérence avec les objectifs affichés de l'étude. Cette qualité des données se doit d'être explicite et transparente pour que l'interprétation des résultats et les conclusions de l'étude puissent être proportionnées.

L'évaluation de la qualité des données peut se faire sur deux types de données :

- Les données d'activité, c'est-à-dire les données maîtrisées par le commanditaire de l'étude faisant partie du périmètre de collecte de données ;
- Les données d'arrière-plan, c'est-à-dire les données issues de bases de données ACV telles que Ecoinvent, non maîtrisées par le commanditaire, comme le facteur d'émission du mix électrique français par exemple.

La matrice de pedigree utilisée comme base des critères de notation de la qualité des données est la matrice proposée par Ecoinvent 3, 2016 (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Elle repose sur 5 critères de qualité, notés chacun de 1 à 5 (1 = meilleure qualité et 5 = moins bonne qualité) :

- **Fiabilité** : les données sont-elles issues de mesure ? Sont-elles vérifiées ? Sont-elles issues d'hypothèses ? Ce critère renvoie à la précision de la valeur de la donnée ;
- **Exhaustivité** : l'échantillon de l'étude est-il représentatif de l'ensemble de la filière ? De tous les sites ou seulement d'un échantillon de sites pertinents ? Ou encore, représentative d'un seul site ? Ce critère renvoie une indication sur la complétude de l'étude ;
- **Représentativité temporelle** : les données sont-elles récentes ou bien anciennes ? Ce critère renvoie à l'âge de la donnée ;
- **Représentativité géographique** : les données représentent-elles la zone étudiée (ici, la France) ou bien une zone plus large, ou encore une zone différente ? Ce critère renvoie à la provenance géographique de la donnée.
- **Représentativité technologique** : les données proviennent-elles bien de la technologie modélisée ? Des proxys ont-ils été utilisés pour modéliser la filière ? Ce critère renvoie au niveau d'adéquation entre les données utilisées et l'itinéraire technique modélisé.

L'ensemble des données de l'étude ont été notées en respectant les exigences de notation expliquées ci-dessus. Pour simplifier l'interprétation, une synthèse de cette notation de la qualité de l'étude est fournie selon les filières et les critères dans le Tableau . L'échelle de notation de la matrice de Pedigree va de 1 à 5 avec une notation de 1 pour un niveau de qualité très élevé, et de 5 pour un niveau de qualité très faible.

Tableau 6 - Notation moyenne des données par filière en fonction des critères de la matrice de pedigree

Filière	Fiabilité (données)	Complétude (données)	Représentativité temporelle (Données)	Représentativité géographique (données)	Représentativité technologique (données)
AA	2	3	2	2	1
AT	2	3	2	2	1
IT	2	3	2	2	1
Biodéchets	3	3	3	2	2
ISDND	1	2	3	1	1
STEU	1	2	3	1	1

Globalement, la notation des données de l'ACV de la filière biométhane injecté montre une hétérogénéité en fonction des filières. A savoir qu'entre les filières AA, AT et IT, dans l'ensemble, les sources utilisées selon les variables sont identiques. Elles peuvent tout de même évoluer dans le cas des filières biodéchets, ISDND et STEU.

Concernant les données utilisées pour le mix d'intrants, toutes les filières utilisent les mêmes sources, les données sont considérées comme moyennement fiables et complètes, cela est dû à l'hétérogénéité des intrants : nombreux types de fumiers existants avec différents degrés de compaction et une composition variable selon les niveaux de production des élevages, de même pour les lisiers et également pour les déchets d'industries agroalimentaires très diversifiés. Les données de composition des intrants sont cependant, précises (originaires de Méthasim). Elles disposent toutes d'une très bonne représentativité géographique, temporelle, et technologique, puisque les sources utilisées sont françaises, récentes et décrivent le fonctionnement des unités de méthanisation en injection.

Pour la composition du biogaz, les données sont fiables mais avec un degré d'exhaustivité faible étant donné la difficulté à obtenir des données de composition de l'ensemble des sites de la filière et indirectement en lien avec l'hétérogénéité des mix d'intrants au sein des exploitations qui vont influencer la composition du biogaz. Toutefois, leur représentativité technologique et géographique est très bonne.

En ce qui concerne le transport des intrants, cette étape concerne quatre filières (ISDND et STEU n'intègrent pas cette étape dans leur périmètre d'étude) qui utilisent des sources similaires. Les données sont moyennes en termes de fiabilité, d'exhaustivité et de représentativité temporelle. Cela s'explique par les différents moyens de transport et les différentes données de distance selon les types d'intrants qui sont parfois des données originaires des retours d'expérience des précédentes études QUANTIS - ENEA Consulting. La représentativité géographique et technologique est cependant bonne.

A l'étape de stockage des intrants, la qualité des données de l'ensemble des critères est globalement bonne, les notes oscillent entre une qualité moyenne et qualité très bonne. Effectivement, l'enquête de terrain commanditée par GRDF¹⁶ auprès de plusieurs unités de méthanisation en injection a permis d'obtenir des données récentes et représentatives des différentes filières concernées par ce poste. De plus, de nombreux calculs reposent sur des facteurs d'émissions récents tels que ceux publiés par l'European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) et l'European Environment Agency (EEA). Etant donné que ces émissions concernent des intrants et des molécules identiques d'une filière à l'autre, la notation évolue peu entre les filières concernées.

L'étape de pré-traitement possède en moyenne une bonne qualité des données, les données sont fiables. Dans l'ensemble, elles sont récentes et représentatives géographiquement et technologiquement. L'exhaustivité selon la source peut atteindre une note moyenne.

A l'étape de digestion, la qualité des données est évaluée entre bonne et moyenne. Certaines données sont des hypothèses, qui par conséquent, obtiennent des notes plus basses. La plupart des données sont tirées de documents de l'ADEME et de l'INRAE.

Au torchage, la majorité des variables sont tirées de calcul. La notation des données est en moyenne bonne pour l'ensemble des filières concernées.

Pour ce qui est de l'étape de traitement de l'air, quelques sources sont tirées des anciennes études ACV de QUANTIS - ENEA Consulting. Par conséquent, les données peuvent parfois être anciennes et ne pas

¹⁶ GRDF, Enquête producteurs biométhane, 2022

concerner avec exactitude les filières étudiées dans la présente ACV, au vu des différences de périmètre d'étude. Des données ont également pu être collectées via l'enquête de GRDF auprès des producteurs de biométhane, permettant ainsi d'obtenir une bonne notation à partir des critères de notation de la matrice.

Concernant l'épuration, pour toutes les filières concernées, les sources de données sont identiques. La qualité des données est de moyenne à très bonne. Les mêmes conclusions s'appliquent à l'étape d'injection qui emploient les mêmes sources.

Ainsi, pour toutes les données utilisées dans la méthode par substitution, trois filières sont concernées : AA, AT et IT. Cette partie possède de nombreux calculs, qui utilisent pour la plupart les données décrites précédemment ainsi que de nouvelles données récentes, tirées du CIRAD, de l'INRAE et de l'ADEME. Ces nouvelles ressources bibliographiques sont identiques entre les trois filières.

Pour résumé, la qualité des données de l'étude est bonne et permet de réaliser une étude ACV en accord avec les objectifs affichés.

2.6. Enumération des analyses de sensibilité

Plusieurs hypothèses ou données ont été utilisées pour déterminer les paramètres de cette étude. Le recours à des analyses de sensibilité permet de mesurer l'influence de certains paramètres sur les résultats afin d'émettre un avis critique, quant à la donnée ou l'hypothèse choisie et de déterminer le poids de ce paramètre dans la modélisation. La vérification de l'influence de ces paramètres détermine aussi le niveau de confiance nécessaire autour des données qui le caractérise. Dans le but de fiabiliser les résultats, il est nécessaire de minimiser les incertitudes sur les paramètres clés.

Six analyses de sensibilité ont été simulées :

1. Variation des proportions des intrants pour les filières AA et AT (CIVE et effluents)
2. La variation des proportions dans l'assolement de CIVE d'hiver et d'été : AA et AT ;
3. L'autoconsommation de biogaz pour l'étape d'hygiénisation à la place du gaz naturel pour toutes les filières avec des intrants hygiénisés ;
4. La variation du type de stockage du digestat pour les filières : AA, AT et IT ;
5. La variation du prix du digestat pour toutes les filières concernées : AA, AT et IT ;
6. La variation des taux de pertes de méthane : toutes les filières. (4 scénarios)

Certaines analyses de sensibilité sont composées de plusieurs scénarios dans lesquelles les valeurs des paramètres fluctuent. Les hypothèses et valeurs utilisées sont présentées en détail dans le chapitre 7 du rapport. Les analyses ont principalement été réalisées avec la méthode par allocation économique, hormis pour l'analyse 4 et un scénario de l'analyse 6 qui sont modélisés par substitution et extension de frontière, en utilisant la méthode de caractérisation IPCC 2021 – 100 ans.

3. Description des 6 filières de production de biométhane considérées : présentation générale, périmètre et fonctions associées

Recensant 365 unités d'injection fin 2021, la filière française d'injection de gaz renouvelable à partir de la méthanisation peut être segmentée en 6 typologies¹⁷ selon l'origine des intrants, le fonctionnement de la structure et les gestionnaires (cf. partie 1.2.1).

L'objectif de cette partie est de :

- i) Décrire de manière générale les six filières françaises de production de biométhane ;
- ii) Décrire le périmètre de chaque filière afin de visualiser les grandes étapes considérées dans l'ACV ;
- iii) Définir les fonctions de chaque filière (produire du digestat, de l'énergie et du CO₂, traiter des déchets).

Les périmètres du processus considérés sont construits pour chaque filière à partir de la fonction principale et des cofonctions et varient en fonction de l'approche par allocation (Tableau 7 - Récapitulatif des fonctions, cofonctions et du périmètre par filière pour la méthode par allocation économique) ou par substitution et extension de périmètre (

¹⁷ [MéthaFrance, Les typologies des installations](#)

Tableau 8 - Récapitulatif des fonctions, cofonctions et du périmètre par filière pour la méthode par substitution et extension de frontière). Ceci s'explique par une gestion différenciée de la multifonctionnalité (cf partie 2.2.3).

Le détail des données et hypothèses de travail retenues dans le cadre de cette étude seront présentées dans la partie 4.

Tableau 7 - Récapitulatif des fonctions, cofonctions et du périmètre par filière pour la méthode par allocation économique

		AA	AT	IT	ISDND	STEU	BD
Périmètre	Production Agricole	X	X				
	Transport des intrants, stockage, prétraitement, Méthanisation, torchage, traitement de l'air	X	X	X			X
	Epuration, Injection, Distribution, Consommation	X	X	X	X	X	X
Fonction Principale	Production de biométhane	X	X	X			
	Traitement des déchets				X		
	Epuration des eaux usées					X	
	Gestion des déchets ménagers (tri à la source)						X
Co-fonction	Production de Biométhane				X	X	X
	Production de biogaz	X	X	X	X	X	X
	Production de digestat (fertilisant)	X	X	X	Il est produit, mais n'est pas intégré dans le périmètre d'étude		
	Traitement des déchets et gestion des effluents d'élevage	X	X	X			
	Production d'off-gaz (CO ₂)	Aucune allocation n'est faite sur le CO ₂ , il est produit mais n'est pas valorisé.					

Tableau 8 - Récapitulatif des fonctions, cofonctions et du périmètre par filière pour la méthode par substitution et extension de frontière

		AA	AT	IT	ISDND	STEU	BD
Périmètre	Production Agricole	X	X				
	Transport des intrants, stockage, prétraitement, Méthanisation, torchage, traitement de l'air	X	X	X			
	Epuration, Injection, Distribution, Consommation	X	X	X			
	Stockage et Epanchage du digestat	X	X	X			
Fonction Principale	Production de biométhane	X	X	X			
	Traitement des déchets				X		
	Epuration des eaux usées					X	
	Gestion des déchets ménagers (tri à la source)						X
Co-fonction	Production de Biométhane				X	X	X
	Production de biogaz	X	X	X	X	X	X
	Production de digestat (fertilisant)	X	X	X	Il est produit, mais n'est pas intégré dans le périmètre d'étude		
	Traitement des déchets et gestion des effluents d'élevage	X	X	X			
	Production d'off-gaz (CO ₂)	Aucune allocation n'est faite sur le CO ₂ , il est produit mais n'est pas valorisé.					

Ces fonctions et les périmètres considérés seront détaillés plus précisément pour chaque filière, au sein de la description de chaque filière.

3.1. Filière Agricole Autonome

3.1.1. Présentation générale de la filière

Définition

Les installations de la filière Agricole Autonome (AA) appartiennent soit à un ou plusieurs exploitants agricoles, soit à une unique structure agricole. A la différence de la filière Agricole Territoriale (AT), les intrants des unités de méthanisation doivent à **plus de 90%** (en masse) provenir de matières agricoles produites sur des exploitations⁴.

Parc des installations

En fin d'année 2021, le nombre de sites d'injection de la filière AA s'élève à 230. La production d'énergie de l'ensemble de ces sites représente 55% de l'énergie du parc d'injection de biométhane soit 3 549 GWh/an, ce qui en fait la filière la plus importante⁴. En mai 2022, d'après l'Open Data Réseau Energie (ODRE)¹⁸, la filière se compose de 261 installations dont 229 (88%) injectent le biométhane dans le réseau de distribution et 32 (12%) dans le réseau de transport.

Performance technique

En moyenne, les sites d'injection de la filière AA produisent 15,4 GWh/an⁴ (production annuelle prévisionnelle de 2021), soit une capacité d'injection moyenne dans le réseau de 172,3 Nm³/h. Cette valeur a été calculée à partir de capacité maximale de production des sites de méthanisation, des hypothèses du Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS) du biométhane, de la durée de fonctionnement annuel d'une unité présentée dans le panorama des gaz renouvelables 2021 et de la Cmax, qui correspond à la capacité maximale de production. Elle est utilisée dans la partie 4.5.1 afin d'en déduire les facteurs d'allocation économique, en particulier le prix de vente du kWh PCS de biométhane livré.

La formule de calcul est la suivante :

$$PRa = Cmax \times PCS_{\text{biométhane}} \times Tf$$

$$Cmax = \frac{PRa}{PCS_{\text{biométhane}} \times Tf}$$

Avec :

- Cmax : Capacité maximale de production (Nm³/h) du site ;
- PCS_{biométhane} : Pouvoir Calorifique Supérieur du biométhane = 10,9 kWh /Nm³ ⁴;
- Tf : Temps de fonctionnement annuel du site en heures = 8 200 h ⁴;
- PRa : Production annuelle prévisionnelle.

Dans cette étude, le procédé de méthanisation retenu en filière AA est celui par voie liquide infiniment mélangé en régime mésophile^{19, 20}.

Données économiques

¹⁸ [ODRE, Points d'injection de Biométhane en France en service, 2022](#)

¹⁹ [INRAE Transfert, Analyse du Cycle de Vie du biométhane issu de ressources agricoles, 2021](#)

²⁰ [Infometha, Méthanisation en voie liquide](#)

Il existe plusieurs tarifs de vente du MWh PCS du biométhane qui sont applicables en fonction de l'année de signature du contrat d'achat du biométhane injecté. Les tarifs successifs ont été fixés par différents arrêtés, deux sont présentés ici à titre indicatif afin de mettre en perspective le contexte économique de la filière. Les données économiques utilisées dans le cadre de la méthode par allocation sont, quant à elles, présentées au chapitre 4.5.1.

1. Le **premier tarif** concerne les installations qui ont signé un contrat d'achat *avant le 23 novembre 2020*. Ses modalités ont été définies par **l'arrêté du 23 novembre 2011**²¹. Il permet une valorisation de biométhane sur 15 ans.

Le tarif initial de rachat du MWh PCS de biométhane en AA peut être compris dans une fourchette alors entre 84€ et 125€, en fonction :

- De la capacité maximale de production (un tarif de référence compris entre 64 et 95€/MWh),
- D'une prime pour le traitement des déchets de l'agriculture et de l'agroalimentaire qui s'élève entre 20€ et 30€/MWh.

2. Le **second tarif**, concerne les installations qui ont signé un contrat d'achat *à partir du 24 novembre 2020* et qui présentent une capacité maximale de production inférieure ou égale à 300 Nm³/h ou, qui ont signé un contrat d'achat *à partir du 14 décembre 2021* et d'une production annuelle prévisionnelle inférieure ou égale à 25 GWh/an. Ce sont respectivement les **arrêtés du 23 novembre 2020**²² et **du 13 décembre 2021**²³ qui fixent les modalités de ce tarif qui permet une valorisation de biométhane sur 15 ans.

Dans le cadre de ces deux arrêtés, le tarif initial de rachat du MWh PCS de biométhane en AA peut être compris dans une fourchette entre 96€ et 132€, en fonction :

- De la capacité maximale de production ou de la production prévisionnelle annuelle (un tarif de référence compris entre 86 et 122€/MWh),
- D'une prime « effluents d'élevage » qui peut atteindre 10€/MWh pour les installations avec au moins 60% d'effluents d'élevage dans leur mix d'intrants⁴.

²¹ [Légifrance, Arrêté du 23 novembre 2011 fixant les conditions d'achat du biométhane injecté dans les réseaux de gaz naturel](#)

²² [Légifrance, Arrêté du 23 novembre 2020 fixant les conditions d'achat du biométhane injecté dans les réseaux de gaz naturel, 2020](#)

²³ [Légifrance, Arrêté du 13 décembre 2021 fixant les conditions d'achat du biométhane injecté dans les réseaux de gaz naturel](#)

3.1.2. Périmètre et fonctions

Description du mix d'intrants

Comme décrit plus haut, 90% (en masse) des intrants en filière AA proviennent des matières agricoles. Le mix de substrats qui entre dans le méthaniseur se répartit selon 6 catégories d'intrants^{24, 25, 26, 27} :

- 60% d'effluents d'élevage (fumiers de bovin et lisiers de porc) ;
- 15% de Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique (CIVE) comprenant des CIVE d'hiver (mélange de triticale, seigle, avoine) et des CIVE d'été (maïs, sorgho) ;
- 9% de résidus de cultures ;
- 6,5% de cultures dédiées (maïs) ;
- 8,5% de déchets d'industries agroalimentaires ;
- 1% de déchets verts.

Toutefois, l'Observatoire régionale de la méthanisation en région Grand Est²⁸ de l'ADEME indique un mix d'intrants différent de celui utilisé dans l'étude, avec une moindre proportion d'effluents d'élevage. Ces éléments reflétant une diversité géographique des systèmes agricoles sont étudiés dans le cadre des analyses de sensibilités (cf. section **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Pour compléter, la proportion d'effluents d'élevage est également plus faible dans l'étude de l'ADEME suivante : Synthèse finale des installations de biométhane en projets, 2021²⁴ .

Périmètre de la filière

En ce qui concerne l'amont de la filière (Figure 5), le périmètre de la filière s'arrête à la collecte et transport des intrants du méthaniseur. Une exception est cependant faite sur les CIVE et les cultures dédiées, dont la production est vouée à la méthanisation : les étapes de leur production sont donc intégrées dans les frontières de l'étude. A l'inverse, les autres substrats possédant un statut de déchet, leur charge environnementale est donc nulle.

En ce qui concerne l'aval de la filière (Figure 5), deux produits sont considérés en sortie du digesteur : le biogaz et le digestat. Le biogaz produit est épuré afin d'obtenir d'une part, du biométhane et d'autre part, des off-gaz (composés essentiellement de dioxyde de carbone biogénique).

- Pour les off-gaz, le périmètre se termine à leur production ;
- Pour le biométhane, le périmètre se termine à sa combustion en chaudière après avoir été injecté dans le réseau ;
- Pour le digestat, avec l'approche par allocation, le périmètre s'arrête à la production du digestat en sortie de digesteur où une partie des impacts de la méthanisation est allouée au digestat en proportion de sa valeur économique. Dans le cas de la méthode par extension de frontières avec substitution le périmètre est étendu à sa valorisation, c'est-à-dire de sa gestion (post-traitement éventuel, stockage, transport) jusqu'à son épandage.

²⁴ ADEME, Synthèse finale des installations de biométhane en projets, 2021

²⁵ AREC IDF, Bilan de fonctionnement 2020 des unités de méthanisation en Île-de-France, 2022

²⁶ DREAL Bretagne, Synthèse des bilans de fonctionnement des unités de méthanisation sur l'année 2019 en Bretagne, 2019

²⁷ DREAL Pays de la Loire, Analyse des bilans de fonctionnement 2019 des installations de la filière biogaz en Pays de la Loire, 2021

²⁸ ADEME Grand Est, [Observation régionale de la méthanisation en région Grand Est - synthèse régionale - édition 2022 \(données 2021\), 2022](#)

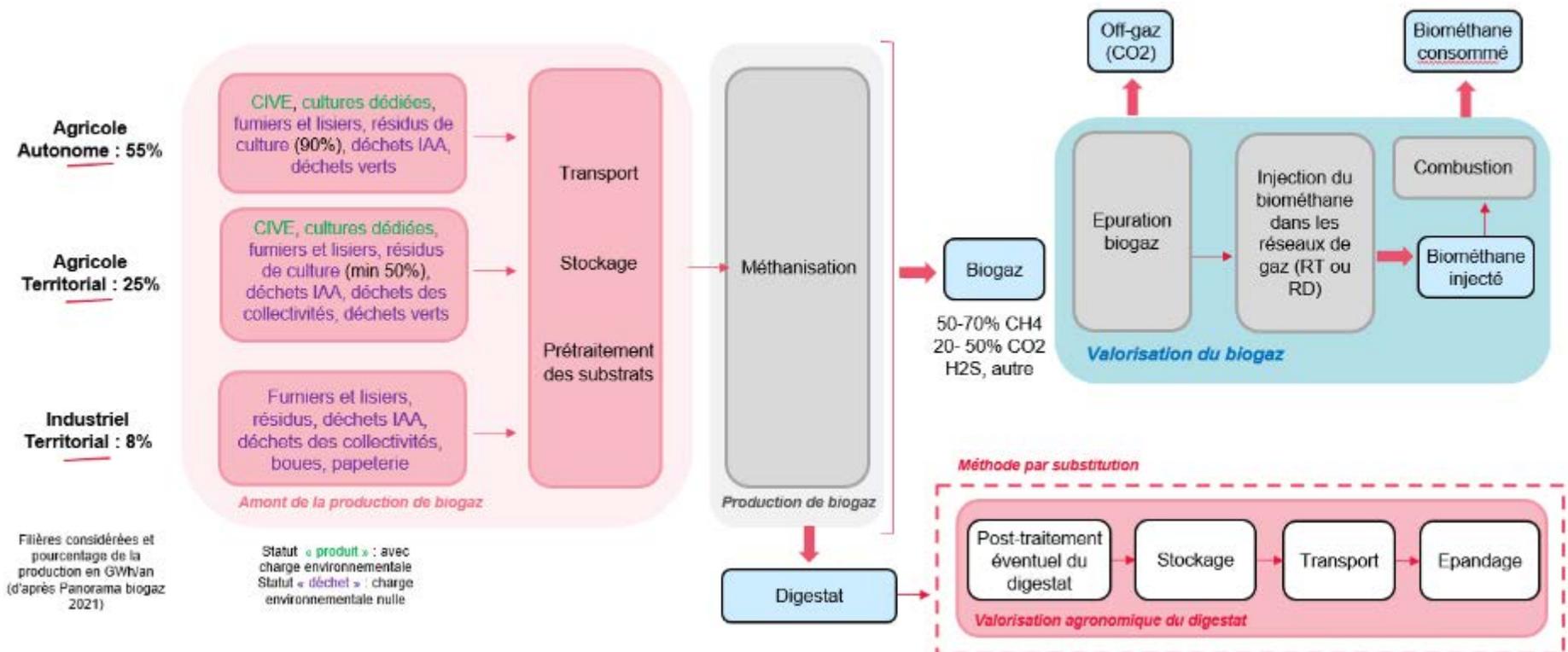


Figure 5 - Périmètre des étapes prises en compte pour les filières Agricole Autonome, Agricole Industriel et Agricole Territorial

Fonctions de la filière

Un site d'injection au sein de la filière AA remplit plusieurs fonctions. La fonction « principale » est la production d'énergie à partir de biométhane. A travers cette production de biométhane, des fonctions « secondaires » sont également réalisées comme : le traitement des déchets et la gestion des effluents d'élevage, la production de biogaz, la production de CO₂ (off-gaz) à partir du biogaz et enfin, la production de digestat composé de matières fertilisantes en NPK en sortie de digesteur.

3.2. Filière Agricole Territorial

3.2.1. Présentation générale de la filière

Définition

Les installations de la filière Agricole Territorial (AT), comme pour la filière AA, appartiennent à un ou plusieurs exploitants agricoles, ou à une structure agricole. A la différence de la filière AA, les intrants des unités de méthanisation doivent à **plus de 50%** (en masse) provenir de matières agricoles produites sur des exploitations. Le reste des intrants comprend des déchets du territoire⁴.

Parc des installations

En fin d'année 2021, le nombre de sites d'injection de la filière AT s'élève à 79. Ils produisent 25% de l'énergie du parc d'injection de biométhane, soit 1 604 GWh/an, ce qui en fait la deuxième filière productrice de biométhane injecté⁴. En mai 2022, d'après l'Open Data Réseau Energie (ODRE)¹⁸, la filière se compose de 84 sites dont 72 (86%) injectent le biométhane dans le réseau de distribution et 12 (14%) dans le réseau de transport.

Performance technique

En moyenne, les sites d'injection de la filière AT produisent 20,3 GWh/an (production annuelle prévisionnelle de 2021), soit une capacité d'injection moyenne dans le réseau de 227,1 Nm³/h. Cette valeur a été calculée à partir des hypothèses de fonctionnement des sites énoncées dans le panorama du gaz renouvelable 2021. Comme pour la filière AA, le calcul repose sur la formule présentée dans la partie 3.1.1³².

De même que pour la filière AA, le procédé de méthanisation retenu en filière AT est celui par voie liquide infiniment mélangé en régime mésophile.

3.2.2. Périmètre et fonctions

Description du mix d'intrants

Comme décrit précédemment, 50% (en masse) des intrants en filière AT proviennent des matières agricoles. Le mix de substrats qui entre dans le méthaniseur se compose de 7 catégories d'intrants^{24 25 26 27} :

- 40% d'effluents d'élevage (fumiers de bovin et lisiers de porc) ;
- 20% de CIVE comprenant des CIVE d'hiver (mélange de triticales, seigle, avoine) et des CIVE d'été (maïs, sorgho) ;
- 18% de déchets d'industries agroalimentaires (dont 2% de Sous-Produits ANimaux (SPAN)) ;
- 7% de résidus de cultures ;
- 4% de cultures dédiées (maïs) ;
- 7% de biodéchets ménagers ;
- 4% de déchets verts.

Périmètre de la filière

Le périmètre de la filière AT ne diffère pas de celui en AA (cf. partie 0, Figure 5).

Fonctions de la filière

Les sites d'injection en AT remplissent les mêmes fonctions que ceux en AA (cf. partie 0).

3.3. Filière Industriel Territorial

3.3.1. Présentation générale de la filière

Définition

La filière Industriel Territorial (IT) est apparue dans la nouvelle classification des unités de production de biométhane. Cette dernière a la particularité d'être portée par un développeur de projet ou par un ou plusieurs industriels. Cette filière se distingue également par les tonnages importants et la diversité des intrants incorporés (déchets issus d'IAA, qui rendent les matières agricoles non majoritaires dans la ration). En effet, la filière IT intègre une grande variété de déchets méthanisables : des déchets d'industrie agro-alimentaires, des matières issues ou non d'exploitations agricoles, des biodéchets⁴ ...

Parc des installations

Avec seulement 13 unités en service (au 31 décembre 2021)¹⁸ dont 6 raccordées au réseau de transport, la filière représente un poids énergétique de 8% sur l'ensemble du parc. Deux nouvelles unités ont été raccordées au réseau de distribution pendant le printemps 2022, ramenant le nombre total d'unités à 15.

Performance technique

Les capacités maximales d'injection des unités de méthanisation appartenant à la filière IT sont très variables : elles vont de 10 GWh/an jusqu'à 107 GWh/an pour la plus grande, ce qui explique en partie le nombre important d'unités raccordées au réseau de transport. En moyenne, les sites d'injection de la filière IT produisent 38,2 GWh/an (production annuelle prévisionnelle de 2021)¹⁸, ce qui en fait la filière ayant la capacité de production annuelle moyenne la plus élevée parmi les six.

Par ailleurs, le procédé de méthanisation retenu pour cette filière est celui par voie liquide infiniment mélangé en régime mésophile.

3.3.2. Périmètre et fonctions

Description du mix d'intrants

Les intrants utilisés en IT sont diversifiés et les proportions de chaque intrant varient beaucoup d'une installation à une autre. Etant donné le faible nombre d'unités, chaque ration a été étudiée, en s'appuyant sur les éléments contenus dans les dossiers d'enregistrement et les enquêtes de suivi existantes en 2021 menées par l'ADEME. Par conséquent, aucune proportion de CIVE n'est intégrée au mix de cette filière. L'étude des sources disponibles en 2021, a permis de proposer par la suite, un mix moyen utilisé dans le cadre de l'ACV.

Le mix moyen d'intrants retenu est composé à 37% (en masse) de matières agricoles et 63% (en masse) de matières non agricoles. Le mix de substrats qui entre dans le méthaniseur se compose de 10 catégories d'intrants^{24 25 26 27} :

- 34,8 % d'effluents d'élevage (fumiers de bovin et lisiers de porc) ;
- 2,4 % de résidus de cultures ;
- 34,4 % de boues de STEU et boues issues des IAA ;
- 6,1 % de SPAN et déchets C3 ;
- 2,2 % de biodéchets ;
- 0,7 % de résidus issus de la transformation de pomme de terre et féculerie ;

- 1,8 % d'amidonnerie ;
- 8,6 % de corps gras végétaux (huiles et graisses) ;
- 8,1 % de restes issus de la transformation de fruits et légumes ;
- 0,9 % de déchets de papeterie.

Périmètre de la filière

Le périmètre de la filière IT ne diffère pas de celui en AA (cf. partie 0, Figure 5).

Fonctions de la filière

Une unité d'injection IT, de la même manière que pour une unité AA ou AT, remplit plusieurs fonctions. Sa fonction « principale » est la production d'énergie à partir de biométhane. Par ailleurs, à travers cette production de biométhane, des fonctions « secondaires » sont également réalisées telles que : le traitement des déchets, la gestion des effluents d'élevage, la production de biogaz, la production de CO₂ et d'off gaz, ou encore, la production de digestat composé de matières fertilisantes en NPK en sortie de digesteur.

3.4. Filière biodéchets

3.4.1. Présentation générale de la filière

Définition

Comme expliqué précédemment, dans la nouvelle typologie des filières de production de biométhane français, les deux anciennes filières : Gestion des biodéchets ménagers (avec tri à la source) et Traitement Mécano Biologique (TMB) des Ordures Ménagères (sans tri à la source) ont été regroupées en une même catégorie : Biodéchets.

La catégorie Gestion des biodéchets ménagers (avec tri à la source) permet d'extraire, après une collecte séparative à la source, les biodéchets. Lorsque bien triés par les citoyens, les biodéchets peuvent être valorisés par compostage ou méthanisation pour être épandus sur les sols.

Aujourd'hui, les biodéchets sont majoritairement collectés en mélange avec les ordures ménagères et finissent en centre d'enfouissement ou en incinération. Le tri à la source permet ainsi d'éviter une part importante des impacts de ces filières en les orientant vers des filières de recyclage.

Les biodéchets sont également appelés Fraction Fermentescible des Ordures Ménagères (FFOM) lorsque issus de TMB. La réglementation actuelle ne s'orientant pas en faveur du développement de la sous-filière Traitement Mécano Biologique (TMB) des Ordures Ménagères (sans tri à la source)^{29,30}, les spécificités de la sous-filière Traitement Mécano Biologique (TMB) des Ordures Ménagères (sans tri à la source), sont peu représentatives (seulement 3 sites en 2021). Elles n'ont pas été prises en compte dans le cadre des modélisations ACV.

Parc des installations

La filière Déchets ménagers/Biodéchets comptait 6 unités au 31 décembre 2021 et représente un poids énergétique de 3 % sur l'ensemble du parc⁴. Une nouvelle unité de faible capacité a été raccordée au réseau pendant le printemps 2022¹⁸.

Par ailleurs, des échanges avec la filière ont permis de distinguer les sites mettant en place un tri à la source (*CVO, METHAVALOR-SYDEME, Modul'O YVELINES, Terres d'Aquitaine*) et ceux fonctionnant avec le TMB (*SYMEVAD, OCTEVA, ECOCEA*). Ainsi, la catégorie « tri à la source » représente un poids de 53,76% en termes de capacité, comparée à la catégorie TMB qui, elle, représente 46,24%.

Performance technique

Sur l'ensemble de la filière, les capacités d'injection des unités sont variables, allant de 4 à 60 GWh/an. De la même manière que pour la filière IT, la filière Déchets ménagers/Biodéchets repose sur un nombre réduit d'unités mais à forte capacité : en effet, la filière se place en 2^{ème} position en termes de production annuelle prévisionnelle moyenne par installation avec 35,5 GWh/an en 2021⁴

3.4.2. Périmètre et fonctions

Description de la méthodologie retenue

Concernant l'étude ACV, la filière Déchets ménagers/Biodéchets modélisée correspond à la catégorie « Gestion des biodéchets ménagers (avec tri à la source) » de l'étude précédente réalisée par QUANTIS –

²⁹ [Décret n° 2021-855 du 30 juin 2021 relatif à la justification de la généralisation du tri à la source des biodéchets et aux installations de tri mécano-biologiques](#)

³⁰ [Arrêté du 7 juillet 2021 pris en application de l'article R. 543-227-2 du code de l'environnement](#)

ENEA Consulting 2021⁹ (cf. partie 1.2.1). La filière Déchets ménagers/Biodéchets intègre le transport et le prétraitement des biodéchets, non pris en compte lors des dernières ACV faites par QUANTIS.

Périmètre de la filière

La filière de traitement des biodéchets ménagers est la filière de récupération de la partie déjà triée des déchets ménagers. Le tri est effectué directement chez les particuliers : seuls les biodéchets sont envoyés dans la filière. C'est pourquoi cette filière intègre également une fonction de gestion des déchets ménagers.

Avant d'être envoyés à l'unité de méthanisation, les biodéchets subissent un prétraitement. Puis, vient l'étape de méthanisation permettant de produire du biogaz et du digestat. Le biogaz est ensuite épuré pour donner le biométhane et l'off-gaz.

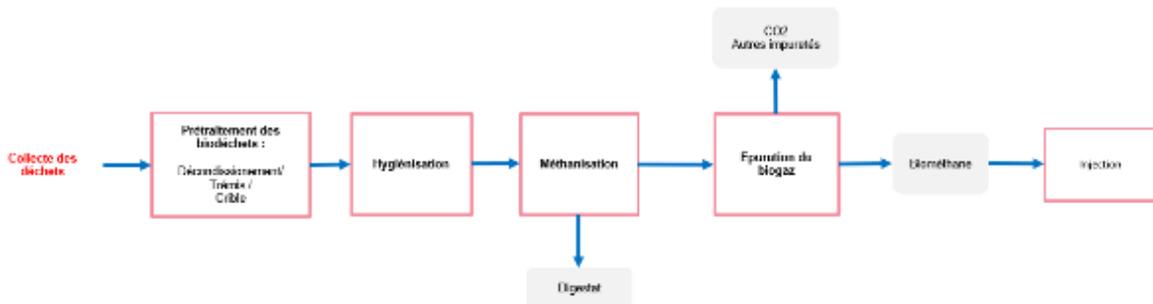


Figure 6 - Schéma du périmètre d'étude de la filière Déchets ménagers / Biodéchets.

Le périmètre étudié, indiqué sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, prend en compte uniquement les impacts alloués à la production du biométhane à partir de biodéchets triés à la source. L'ensemble des bénéfices et des impacts de la mise en place du tri à la source n'est pas concerné.

Les étapes de transport et de prétraitement sont attribuables à la filière injection du biométhane : en effet, dans le cadre du traitement de déchets usuel, seul un compostage dans les centres de compostage proches des lieux de collecte a lieu.

Fonctions de la filière

La filière de traitement des biodéchets ménagers possède quatre coproduits/fonctions distincts auxquels les émissions générées ou évitées du système sont allouées :

- Gestion des déchets ménagers ;
- La production de digestat avec des valeurs fertilisantes en NPK ;
- Production d'off-gaz (CO₂) ;
- Production de biométhane.

L'étape de traitement des biodéchets est la première étape du système permettant à la fois de gérer les biodéchets ménagers et de préparer la fraction fermentescible pour la méthanisation. Cette étape est donc à répartir entre les quatre fonctions citées précédemment : gestion des déchets ménagers, production de digestat composé de matières fertilisantes en NPK, production d'off-gaz (CO₂) et production de biométhane.

L'étape de méthanisation permet, elle aussi, de gérer les biodéchets, cette étape est donc à répartir également entre les quatre fonctions citées précédemment : gestion des déchets ménagers, production de digestat composé de matières fertilisantes en NPK, production d'off-gaz (CO₂) et production de biométhane.

La méthanisation va permettre de produire le biogaz et le digestat. Le torchage du biogaz (système de sauvegarde réglementaire) et l'étape de traitement de l'air associée sont intrinsèquement liés au prétraitement et à la méthanisation. Par conséquent, ils sont à répartir sur les mêmes fonctions que la méthanisation.

L'étape d'épuration permet, quant à elle, de traiter uniquement le biogaz. L'épuration permet de purifier le biogaz en biométhane et de récupérer des Off-gaz tels que le dioxyde de carbone. Les émissions générées ou évitées durant l'étape d'épuration sont donc théoriquement à allouer entre la production d'off-gaz (CO₂) et la production de biométhane. La filière de valorisation du CO₂ des off-gaz n'étant pas assez mature, ces gaz sont considérés dans l'étude comme des déchets et 100 % de l'impact de l'épuration est alloué au biométhane.

3.5. Filière ISDND

3.5.1. Présentation générale de la filière

Définition

Les Installations de Stockage de Déchets Non Dangereux (ISDND) représentent une filière de production de biométhane.

Une ISDND dispose d'un certain nombre de casiers où les déchets sont enfouis. La Figure 7 illustre le fonctionnement global simplifié d'une ISDND avec toutes ses composantes (et variantes de valorisation).

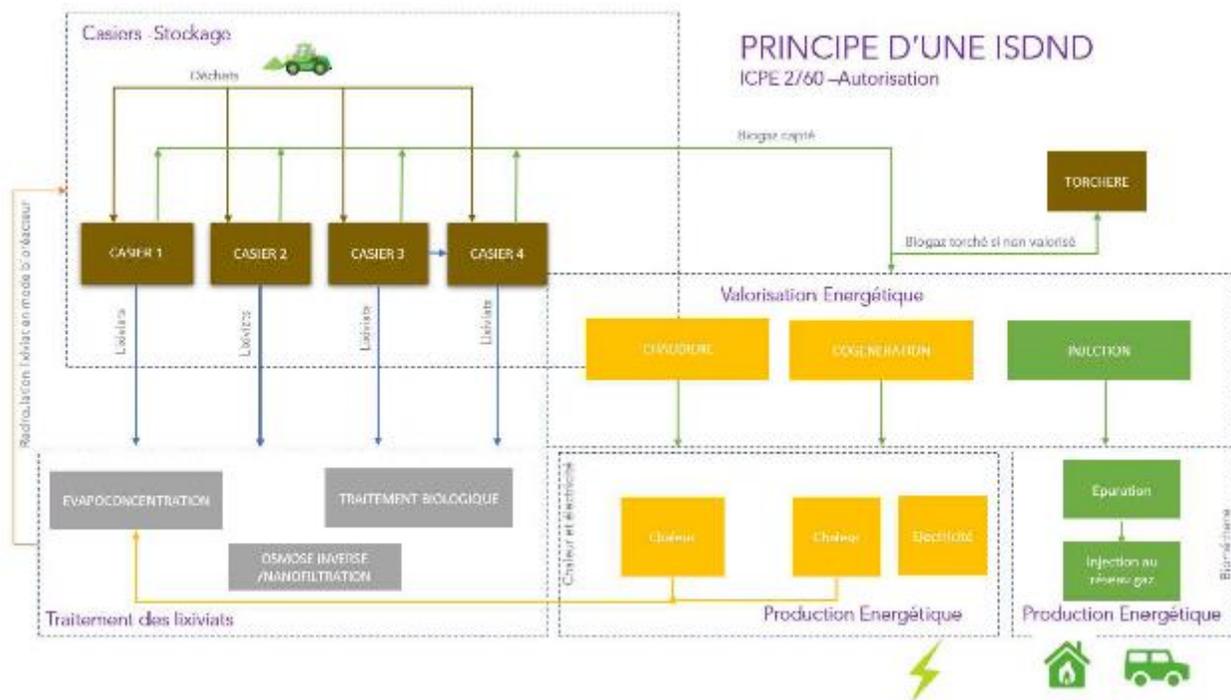


Figure 7 - Schéma du principe de fonctionnement d'une ISDND³¹

A leur arrivée sur site, les déchets passent par deux contrôles avant leur déchargement. Dès lors, ils sont déposés et compactés en couches horizontales dans une des alvéoles d'un casier. Par ailleurs, les casiers peuvent être soit en phase d'exploitation, c'est-à-dire, qu'ils continuent à recevoir des déchets, soit en phase de post-exploitation.

Une fois refermés, les casiers sont propices à une dégradation biologique anaérobie de la fraction organique des déchets qui produisent un biogaz capté au fur et à mesure de leur dégradation.

La production de biogaz en ISDND est un processus qui dure plus d'une vingtaine d'années.

Parc des installations

Au 31 décembre 2021, 11 unités d'ISDND injectaient du biométhane en France. Toutes sont raccordées au réseau de distribution de GRDF¹⁸. 4 nouvelles unités ont été raccordées au printemps 2022 amenant ainsi la capacité totale annuelle en cumulé à 330 GWh/an. Parmi ces quatre en question, une installation mise

³¹ GRDF, Injection de biométhane, Retour d'expérience sur ISDND 2019, juillet 2020

en service en mars 2022 est la plus conséquente en termes de capacité puisqu'elle représente plus d'un tiers de la production totale.

Performance technique

En moyenne, les sites d'injection de la filière ISDND produisent 15,4 GWh/an (production annuelle prévisionnelle de 2021)⁴. Soit une injection moyenne dans le réseau de 172,3 Nm³/h. Cette valeur a été calculée à partir des hypothèses de calcul du panorama du gaz renouvelable 2021.

3.5.2. Périmètre et fonctions

Périmètre de la filière

Dans le cadre de l'ACV du biométhane, les étapes d'enfouissement et de transformation des déchets en biogaz ne sont pas prises en compte. En effet, l'enfouissement est imposé par la réglementation française. Ne seront donc considérées dans le périmètre de l'étude que les étapes d'épuration du biogaz et d'injection du biométhane, comme indiqué sur la Figure 8. Il convient de rappeler que ces deux dernières viennent se substituer à l'étape de torchage du biogaz.

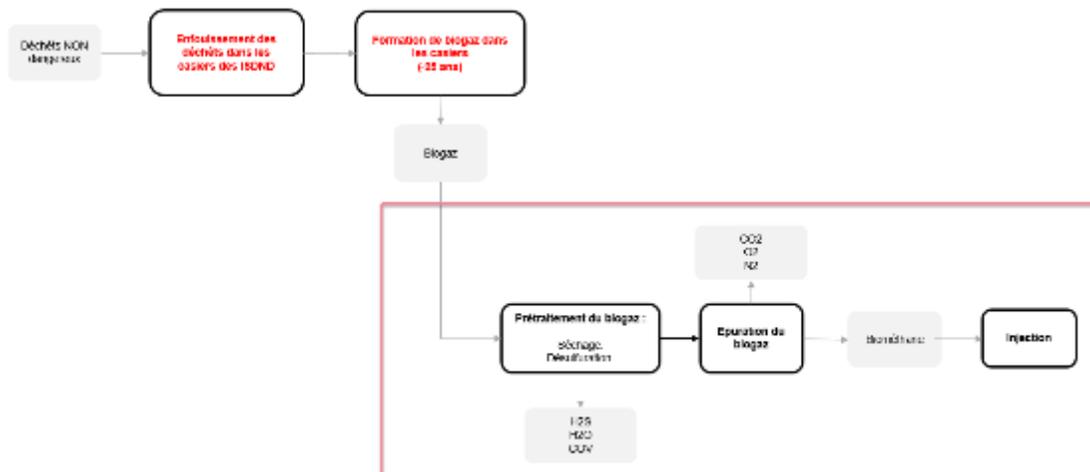


Figure 8 - Schéma du périmètre d'étude de la filière ISDND (partie encadrée).

En ce qui concerne l'étape d'épuration, la qualité du biogaz issu de la filière ISDND, riche en oxygène et azote, fait que les technologies classiques ne permettent pas d'atteindre les exigences pour l'injection dans les réseaux. Cette filière fait donc appel à un procédé particulier consistant en une combinaison des technologies de séparation membranaire et de distillation cryogénique. La séparation membranaire, de même que pour les autres filières, permet l'élimination du CO₂ et des autres impuretés, tandis que la cryogénie permet l'élimination de l'oxygène et de l'azote. Un filtre à charbon actif pour l'abattage du H₂S et une étape de séchage sont mises en place en amont.

Dans le cadre de la modélisation ACV de cette filière, seul le procédé de cryogénie a été considéré.

Fonctions de la filière

La filière ISDND permet l'élimination du gaz de décharge. Avec la méthanisation, plutôt que d'être torché, le biogaz est épuré et injecté dans le réseau de gaz.

3.6. Filière STEU

3.6.1. Présentation générale de la filière

Définition

La filière STEU (Stations d'épuration urbaines) correspond aux installations de méthanisation associées à un processus de traitement des eaux usées urbaines ou industrielles.

Aujourd'hui, 70 % des boues produites par les STEU sont épandues directement ou après une phase de compostage dans le cadre de plans d'épandage ICPE. La méthanisation, elle, intervient également comme une alternative permettant à la fois, la réduction du volume des boues (de 20 à 50 % selon leur nature) correspondant aux intrants, mais également la production d'énergies renouvelables, en phase avec les objectifs de planification ENR et de Développement Durable des collectivités.

Description brève d'une STEU équipée d'une unité de méthanisation

Le schéma présent en Figure 9 représente le fonctionnement global d'une STEU équipée d'un méthaniseur.

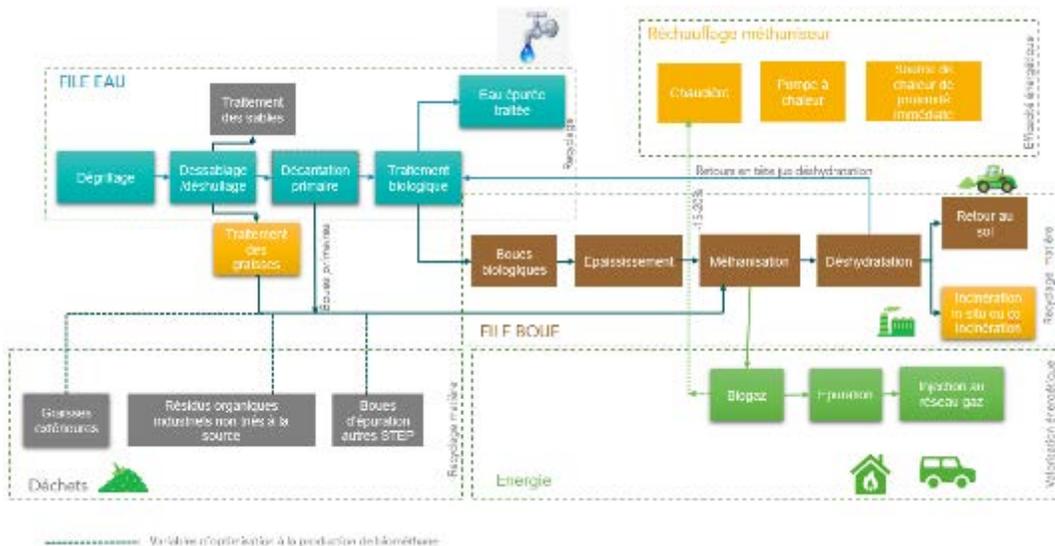


Figure 9 - Schéma global du fonctionnement d'une station d'épuration

En entrée d'unité, les eaux usées passent par un prétraitement en amont qui correspond à leur passage dans des bassins de déshuilage équipés d'injecteurs de bulles d'air : c'est l'étape de dessablage et dégraissage. Les matières grasses récupérées sont directement envoyées au digesteur.

À la suite de cela, une décantation primaire consistant en un dépôt au fond des cuves, des matières en suspension dans les eaux, se déroule et permet par agrégation la formation des boues primaires. Ces dernières sont fortement chargées en matière organique et donc, facilement dégradables en méthanisation.

Un traitement biologique aérobie (bassin d'aération) suivi d'une étape de clarification se déroulent ensuite. La deuxième décantation qui en résulte permet l'obtention des boues biologiques (ou secondaires) qui seront récupérées dans les flottateurs. Par ailleurs, la quantité de boues biologiques récupérées peut être améliorée grâce à la mise en place d'une décantation tertiaire dans certains cas.

En fin de chaîne, les boues récupérées et les graisses doivent être traitées. Dans le cas d'une méthanisation, les boues primaires passent d'abord dans des épaisseurs statiques fonctionnant par gravitation. En sortie, ces boues sont mélangées avec les graisses et les boues secondaires : l'ensemble obtenu forme les boues mixtes.

Parc des installations

La filière STEU comptait au 31 décembre 2021, 26 unités d'injection de biométhane, toutes raccordées au réseau de distribution GRDF (mise à part une seule raccordée au réseau R-GDS)¹⁸. Six nouvelles installations ont été mises en service au printemps 2022, permettant ainsi d'élever la puissance maximale annuelle totale à 419 GWh/an. Cette dernière devrait par ailleurs atteindre près de 1 TWh/an en 2023, avec un nombre d'unités amené à tripler.

Performance technique

En moyenne, les sites d'injection de la filière STEU produisent 14,8 GWh/an (production annuelle prévisionnelle de 2021), soit une injection moyenne dans le réseau de 165,6 Nm³/h. Cette valeur a été calculée à partir des hypothèses de calcul du panorama du gaz renouvelable 2021.

3.6.2. Périmètre et fonctions

Périmètre de la filière

Dans le périmètre de l'étude, indiqué sur la Figure 10 ne sont pas intégrées les étapes de méthanisation et de traitement du digestat, propres au fonctionnement des STEU. Les boues d'épuration sont considérées comme des déchets à retraiter. La méthanisation au sein du digesteur est donc associée à du traitement de déchets en vue de remettre sur le marché, biométhane et digestat comme produits issus d'un retraitement. Le « recyclage » de la matière organique par la production de biogaz a été modélisé par la méthode Cut-off 0/100 (appelée également « Allocation to material losses »), qui consiste à imputer au producteur du déchet les impacts du retraitement. Les impacts de la méthanisation imputent donc au service rendu par le traitement de l'eau qui est la production d'eau propre. Les traitements du digestat sont directement imputables à la valorisation de ce digestat, alors que le traitement du biogaz est imputable à la production de biométhane. En effet, le biogaz en sortie de digestion est considéré comme un déchet et prend de la valeur par le biais des procédés spécifiques de pré-traitement et d'épuration, il devient donc un produit à partir de son entrée dans le processus de pré-traitement. Le biométhane en sortie de STEU est, de fait, considéré comme un produit bénéficiant des impacts associés aux procédés de pré-traitement et d'épuration du biogaz.

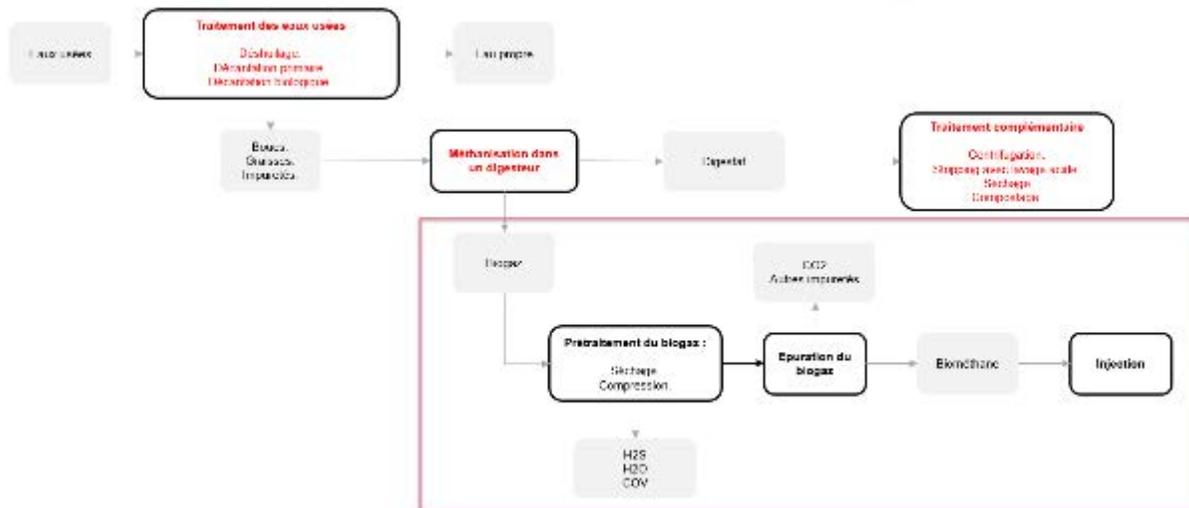


Figure 10 - Schéma du périmètre d'étude de la filière STEU (partie encadrée en rouge)

Fonctions de la filière

La fonction principale d'une unité STEU est de traiter les eaux usées. Au cours de ce traitement, des boues, pouvant être considérées comme des déchets, sont produites. Plusieurs méthodes existent et permettent d'éliminer ces boues : l'épandage et le compostage qui sont les plus communes, mais également l'incinération. L'oxydation et l'enfouissement en ISDND sont les voies d'éliminations les plus à la marge.

Comme expliqué précédemment, la méthanisation mise en place dans les STEU est destinée en premier lieu au traitement des boues et permet en l'occurrence leur valorisation.

4. Inventaire des données utilisées

Cette partie a pour objectif de détailler les données utilisées dans cette étude. Après avoir défini le mix de production de biométhane français, il s'agit ici de décrire les données et hypothèses de travail communes à chaque filière, puis les données spécifiques aux filières AA, AT et IT, et enfin les données spécifiques aux filières Biodéchets, ISDND et STEU.

4.1. Définition du mix de production de biométhane

Le mix de production de biométhane est composé par l'ensemble des filières. Chacune d'elles contribue à des niveaux différents à la production totale de biométhane française. La Figure 11 montre l'évolution du nombre de sites d'injection en service de la filière biométhane depuis la mise en service du premier site avec gaz injecté en 2011. Aussi, la Figure 12 donne la répartition de la production d'énergie par filière au sein du mix en 2021.

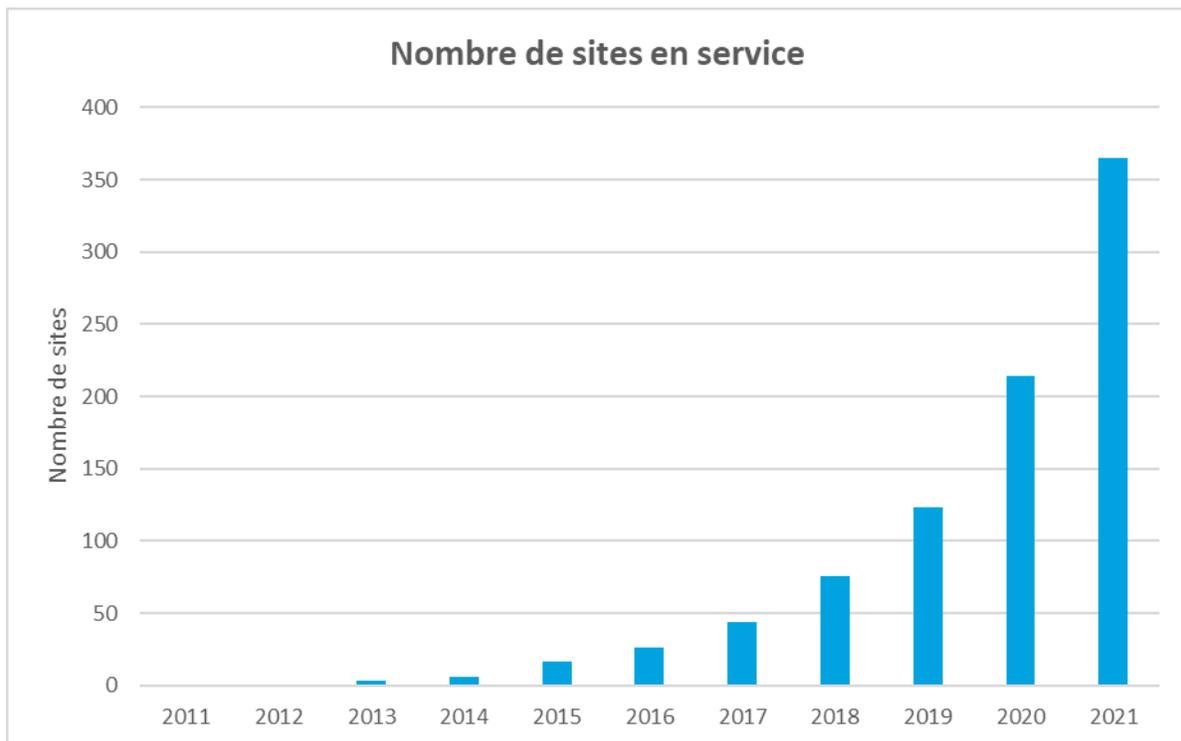


Figure 11 - Evolution annuelle du nombre total de sites d'injection de biométhane en service⁴.

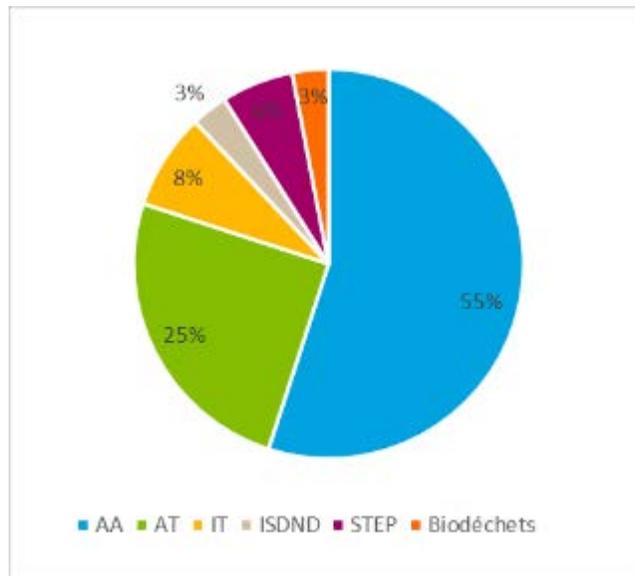


Figure 12 - Répartition de la production annuelle du mix de biométhane en France en 2021 (GWh/an).

4.2. Données et hypothèses de travail communes à chaque filière

Cette partie a pour objectif de détailler les données et hypothèses de travail communes à toutes les filières.

4.2.1. Empreinte environnementale des substrats

Dans cette étude, deux grands types de substrats sont distingués : les substrats qui rentrent dans le système avec une empreinte environnementale nulle (déchets), et les substrats qui rentrent dans le système avec l'empreinte environnementale de leur production (productions végétales agricoles).

Ainsi, une empreinte environnementale à la production est considérée pour les substrats tels que les cultures dédiées et les Cultures Intermédiaires à Vocation Énergétique (CIVE).

Les autres substrats agricoles (fumiers, lisiers, résidus de cultures), ainsi que les autres types de déchets (déchets des industries agroalimentaires, biodéchets des collectivités, déchets verts, boues) ont une empreinte liée à leur production nulle.

Les différentes caractéristiques des substrats sont présentées dans l'**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

4.2.2. Composition du biométhane

La composition du biométhane est commune à toutes les filières (Tableau 9). Elle est basée sur les spécifications gaz applicables au gaz injecté dans le réseau français et définies par les opérateurs de réseau. Dans cette modélisation, il a été fait le choix de reprendre les mêmes teneurs en composés que celles considérées dans les précédentes ACV. Le biométhane doit respecter les spécifications techniques permettant son utilisation, à savoir une teneur moyenne en CH₄ de 97,5% et une composition conforme à celle indiquée ci-dessous :

Tableau 9 - Spécifications et composition retenue dans le modèle pour le biométhane injecté en France³²

Caractéristiques	Spécifications biométhane	Valeur utilisée	
PCI	kWh/Nm ³	9,94	
PCS	Gaz de type H : 10,7 – 12,8 kWh/Nm ³ PCS	10,8	
Densité	Entre 0,555 et 0,70	0,62	
Composition	CH ₄	> 97% vol.	97,5% vol.
	CO ₂	< 2,5% mol.	2,5% mol.
	H ₂ S	< 5 mg/Nm ³	5
	CO	< 2% mol.	0
	NH ₃	< 3 mg/Nm ³	0

4.2.3. Emissions fugitives et pertes

Le Tableau 10 ci-dessous recense les valeurs d'émissions fugitives et de pertes de biométhane retenues pour toutes les filières, sachant que les filières ISDND et STEU sont concernées uniquement par les émissions à l'épuration et à l'injection.

Tableau 10 - Données retenues pour les émissions fugitives et les pertes.

	Valeur	Source
Emissions fugitives du digesteur	0,5 % de fuite de biogaz au niveau du digesteur /post digesteur	QUANTIS – ENEA Consulting 2021 ¹⁹ ; INRAE Transfert 2021 ¹⁹ ; ADEME, 2017
Emissions au torchage	Selon la filière considérée entre 0,9 et 4,1% du biogaz produit est envoyé en torchère ¹⁶ (Tableau 11). A cette quantité envoyée en torchère s'appliquent un taux de 2,6% d'imbrûlé.	GRDF, enquête Automne 2022 ¹⁶ INRAE Transfert, 2021 ¹⁹
Emissions à l'épuration	1 % de biométhane résiduel dans les off-gaz toutes technologies d'épuration confondues, sauf lavage aux amines et cryogénie (0,04%)	Légifrance, réglementation ICPE ³³ CSF Méthanisation ³⁴
Emissions à l'injection	0,05% du volume de biométhane	A dire d'expert GRDF, 2021

En synthèse, les données relatives au torchage sont issues de l'enquête réalisée par GRDF auprès des producteurs de biométhane à partir de 2022 (volume de biogaz et type de torchère). Toutefois, pour

³² GRDF, Dires d'expert

³³ [Légifrance, Arrêté du 14 juin 2021 modifiant l'arrêté du 10 novembre 2009 fixant les règles techniques auxquelles doivent satisfaire les installations de méthanisation soumises à autorisation en application du titre Ier du livre V du code de l'environnement, consulté en juin 2023](#)

³⁴ CSF Méthanisation, Guide pour l'élaboration des documents techniques de consultation et d'offres d'une unité d'épuration du biogaz en vue de l'injection de biométhane, 2021

l'épuration, les données sources utilisées sont originaires d'une analyse des parts du marché des technologies relatives à ce poste, plus fines que les données issues de l'enquête, et en adéquation avec la réglementation ICPE et les émissions de méthane dans le biogaz épuré. Le taux de pertes à l'injection est lié au fonctionnement du poste d'injection biométhane, il s'agit de la mise à l'évent de la boucle de prélèvement qui alimente le dispositif de contrôle de la qualité du biométhane (chromatographe). La donnée est issue de dire d'experts GRDF, du fait du manque de littérature scientifique avec données et d'éléments méthodologiques sur ce poste d'émissions.

Au torchage, il existe 3 postes d'émissions :

- a. Une quantité de biogaz qui s'échappe de la torchère avant même de rentrer dans une phase de combustion (fuites = 0% de la quantité de biogaz envoyée en torchère car d'après le retour d'enquête menée par GRDF en automne 2022 sur 50 unités de méthanisation, les torchères sont automatiques) ;
- b. Une quantité de gaz qui n'est pas brûlée (imbrûlés = 2,6% de la quantité de biogaz envoyée en torchère) ;
- c. Une quantité de gaz brûlée (combustion= 1- (-fuite +imbrûlé)).

Effectivement, les émissions (a) correspondent à du biogaz (CH₄ et CO₂) qui s'échappe directement dans l'air, les imbrûlés (b) aux émissions de CH₄ issues d'une combustion incomplète, alors que les émissions de combustion (c) correspondent à du CO₂ (= CH₄ brûlé). Le retour d'enquête menée par GRDF en automne 2022 sur 50 unités de méthanisation, indique que les torchères sont automatiques, il est alors considéré un taux de fuites de biogaz nul (a). Pour l'ensemble de ces postes les émissions seules les émissions de CH₄ et de N₂O sont prises en compte, les émissions de CO₂ biogénique ne sont pas comptabilisées conformément aux méthodologies de calcul d'impact IPCC et EF3.0.

Tableau 11 - Part du biogaz produit envoyé en torchère selon la filière considérée (%)

Part du biogaz produit envoyé en torchère selon la filière considérée (%)	Filière AA	1,1%
	Filière AT	0,9%
	Filière IT	2,6%
	Filière Biodéchets	4,1%

4.2.4. Epuration du biogaz avant injection

Différentes technologies d'épuration existent et permettent d'obtenir du biométhane à partir du biogaz. Ces différentes technologies sont les suivantes :

- L'épuration membranaire ;
- Le PSA (Pressure Swing Adsorption), appelé PSA-CO₂ ;
- Le lavage à eau ;
- La cryogénie ;
- Le lavage aux amines ;
- Le lavage organique.

A ce jour, les technologies les plus utilisées et qui ont fait l'objet d'une industrialisation massive, sont l'épuration membranaire, le PSA et le lavage à l'eau. Le lavage aux amines, en l'occurrence, n'a pas été approfondi dans notre étude, étant donné le nombre limité d'unités qui mettent en œuvre cette technologie. Il en va de même pour le lavage organique.

Les hypothèses relatives aux consommations et aux performances des autres technologies sont présentées ci-dessous et sont considérées comme valables pour toutes les filières. Cependant, la répartition de ces technologies est différente en fonction de la filière, la répartition est présentée au paragraphe 4.3.8.

Pour toutes les technologies présentées ci-dessous (épuration membranaire, PSA et lavage à l'eau), compte tenu de la réglementation actuelle sur l'épuration du biogaz³⁵ et des performances des technologies³⁴, le taux de biométhane dans les off-gaz est fixé à 1 % du biométhane total produit.

Pour le lavage aux amines ainsi que la cryogénie, le taux de biométhane volumique considéré dans les off-gaz est de 0,04%.

Par ailleurs, la voie de valorisation des off-gaz par la récupération du CO₂ reste très limitée aujourd'hui. Par conséquent, il est considéré dans le modèle que, pour chaque technologie d'épuration, les off-gaz ne sont pas récupérés.

³⁵ Légifrance, Arrêté du 12 août 2010 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées de méthanisation relevant du régime de l'enregistrement au titre de la rubrique n° 2781 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement, consulté en septembre 2022

Épuration membranaire

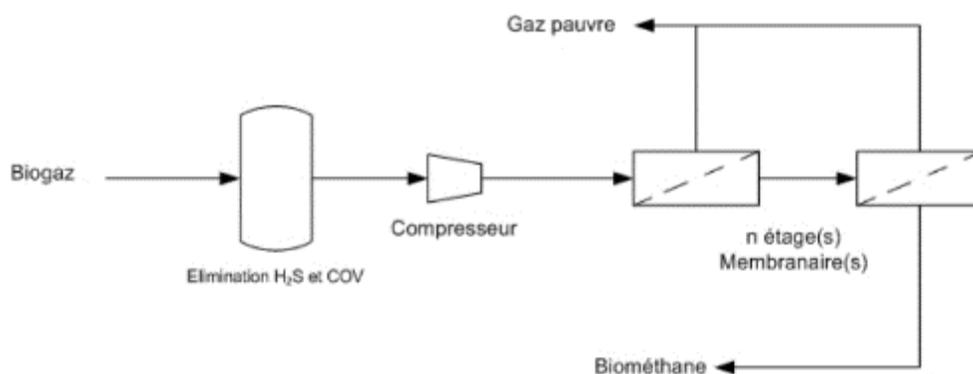


Figure 13 - Schéma simplifié du process d'épuration membranaire.

La séparation membranaire se base sur la sélectivité des membranes pour certaines molécules présentes dans le biogaz, et plus exactement, sur la vitesse de perméation de ces différentes molécules (Figure 13). Le biogaz traité est alimenté d'un côté de la membrane. En sortie, deux flux sont obtenus : le rétentat (biométhane) enrichi en CH_4 et dont la pression est égale à la pression d'entrée modulo la perte de charge, et le perméat (gaz pauvre) enrichi en CO_2 et dont la pression est plus faible après avoir traversé la fibre polymère.

Au-delà d'une certaine concentration en azote ($> 1,5\%$), une recirculation plus intense, induisant l'utilisation d'une pression plus importante et donc une consommation électrique plus élevée, devient nécessaire pour que le biométhane reste conforme aux spécifications de qualité.

Par ailleurs, la membrane se compose de plusieurs fibres polymères creuses combinées dans un module compact dans lequel passe le gaz sous pression.

La consommation moyenne d'électricité associée à l'épuration membranaire a été estimée à $0,38 \text{ kWh}/\text{Nm}^3$ biogaz (donnée du CSF³⁴ cohérente avec les informations de l'ADEME³⁶) et tient compte de la compression en amont.

Généralement, des étapes de prétraitement, avant épuration, sont nécessaires. Ces dernières concernent le séchage et l'abattement du H_2S . La consommation électrique associée au sécheur est estimée à $0,044 \text{ kWh}/\text{Nm}^3$ biogaz brut (donnée ACV QUANTIS - ENEA Consulting³⁷, issue du fournisseur Air Liquide) et la consommation en charbon actif de $0,15 \text{ g}/\text{Nm}^3$ biogaz brut (hypothèse ACV QUANTIS - ENEA Consulting³⁷, issue d'échanges avec le GT injection). Généralement, le traitement au charbon actif est complémentaire, car un abattement préalable de l' H_2S est réalisé au niveau du méthaniseur, via l'injection d'oxygène dans le ciel gazeux du digesteur et/ou de chlorure ferrique dans la phase liquide. La consommation de filtre au charbon actif (en g) se mesure à travers les Nm^3 de biogaz brut produit, elle ne prend donc pas en compte de notion de durée de vie du filtre au charbon actif.

³⁶ ADEME, Suivi technique, économique, et social d'installations de méthanisation, 2019

³⁷ QUANTIS – ENEA Consulting, Evaluation des impacts GES de l'injection du biométhane dans le réseau de gaz naturel, 2017

PSA (PSA – CO₂)

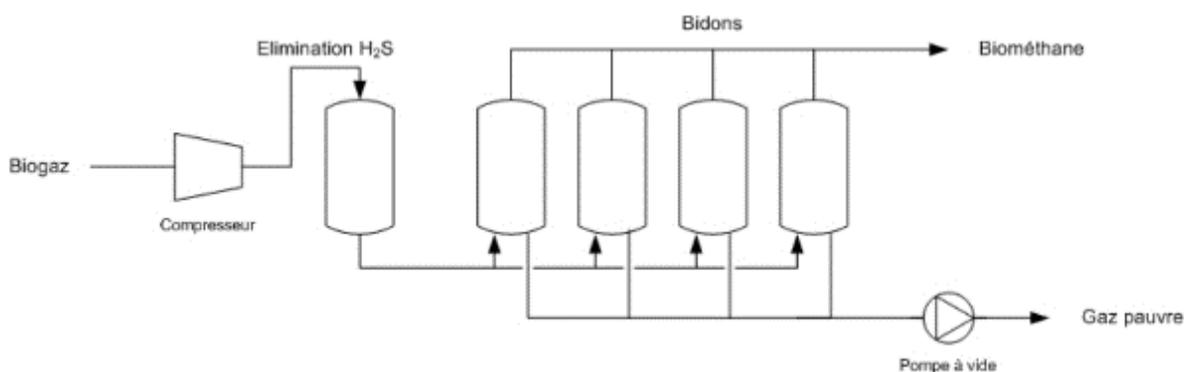


Figure 14 - Schéma simplifié du process de PSA.

La séparation par PSA est une technique d'adsorption qui utilise des adsorbants solides (tamis moléculaires) et se base sur des cycles de modification de pression permettant de capturer le CO₂ et de le séparer du méthane (Figure 14). L'unité de séparation nécessite l'installation de plusieurs colonnes en parallèle permettant d'assurer un fonctionnement continu.

L'adsorption des composés indésirables (CO₂, COV, ...) se déroule à haute pression favorisant ainsi leur capture dans les micropores du médium filtrant. A la suite de cela, le matériau adsorbant (ou médium) chargé est régénéré par une diminution progressive de la pression qui entraîne la désorption des polluants. La consommation moyenne d'électricité associée au procédé PSA a été estimée à 0,30 kWh/Nm³ biogaz³⁴ et tient compte de la compression en amont.

Généralement, des étapes de prétraitement, avant épuration, sont nécessaires. De la même manière que pour l'épuration membranaire, ces dernières concernent le séchage et l'abattement du H₂S. La consommation électrique associée au sécheur est estimée à 0,044 kWh/Nm³ biogaz brut (donnée ACV QUANTIS - ENEA Consulting³⁷, issue du fournisseur Air Liquide) et la consommation en charbon actif de 0,15 g/Nm³ biogaz brut (hypothèse ACV QUANTIS - ENEA Consulting³⁷ issue d'échanges avec le GT injection). Généralement, le traitement au charbon actif est complémentaire, car un abattement préalable de l'H₂S est réalisé au niveau du méthaniseur, via l'injection d'oxygène et/ou de chlorure ferrique.

Lavage à l'eau

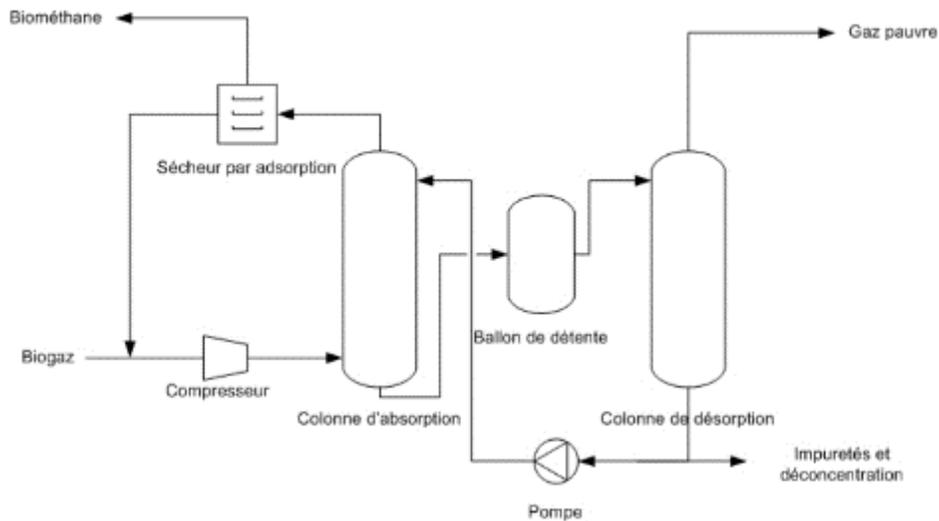


Figure 15 - Schéma simplifié du processus de lavage à l'eau.

La technologie de lavage à l'eau du biogaz consiste à séparer le CO₂ du méthane via un phénomène d'absorption à l'eau (Figure 15). Elle permet à la fois de récupérer le méthane, les gaz pauvres mais également de recycler l'eau utilisée au fur et à mesure, grâce à un jeu de pressions.

Lors de la mise en contact du biogaz avec l'eau pressurisée dans la première colonne, les impuretés telles que le CO₂ et le H₂S entre autres, sont transférées vers l'eau dans laquelle elles sont plus solubles que le CH₄. Le biogaz épuré quitte la colonne par le haut tandis que l'eau enrichie et saturée en CO₂ est dirigée vers une 2^e colonne où elle sera séparée des gaz pauvres et régénérée.

Plusieurs procédés de régénération existent (stripping, chaleur, etc.) en fonction des utilités présentes sur le site (chaleur, électricité, etc.).

La consommation moyenne d'électricité associée au procédé de lavage à l'eau est considérée égale à 0,30 kWh/Nm³ biogaz³⁴. Par ailleurs, la consommation d'eau relative à la technologie a été estimée à 0,0003 m³ d'eau/Nm³ biogaz, au vu de la plage de valeurs disponibles³⁸ et égale à celle qui a été utilisée dans le cadre de la précédente ACV.

La technologie de lavage à l'eau ne nécessite pas de prétraitement spécifique du biogaz.

Cryogénie

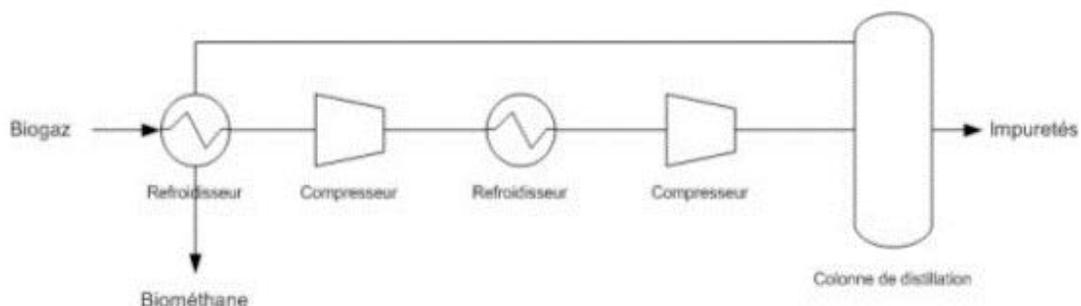


Figure 16 - Schéma simplifié du processus de cryogénie.

³⁸ SGS, Biogas upgrading - Review of commercial technologies, 2013.

Ce procédé repose sur la différence de point de rosée des différents composants du biogaz (Figure 16). Plusieurs étages à couples de pressions et températures variés, permettent une épuration sélective des composés. Le biogaz brut est ainsi comprimé puis fortement refroidi pour atteindre le point de rosée du CO₂ récupéré ensuite sous forme liquide par cristallisation et condensation.

La technologie restant encore minoritaire vis-à-vis des autres technologies, une consommation électrique de 0,34 kWh/Nm³ biométhane a été considérée.

En termes de prétraitement, des étapes de séchage et de filtration H₂S sont réalisées en amont de l'épuration cryogénique : la consommation électrique associée au sécheur est de 0,044 kWh/Nm³ biogaz brut et la consommation en charbon actif de 0,15 g/Nm³ biogaz brut (hypothèses reprises du rapport de QUANTIS - ENEA Consulting³⁷). Cette consommation est relative à un biogaz à faible teneur en H₂S. Lorsque les teneurs sont plus élevées, un abattement préalable de l'H₂S par injection d'air dans le digesteur est réalisé.

WagaEnergy®, fournisseur de technologies notamment connu pour avoir développé des solutions d'épuration des gaz de décharge (de composition plus complexe), a mis au point un procédé d'épuration innovant, consistant en un mix de cryogénie et de séparation membranaire. Dans la mesure où WagaEnergy® équipent la majorité des sites ISDND, les hypothèses pour cette filière reflètent les performances de leur technologie.

4.2.5. Injection

L'injection de biométhane dans les réseaux de gaz naturel est faite via un poste d'injection. L'injection peut être faite au niveau des réseaux de transport et de distribution. En fonction du type de réseau et de sa localisation, la pression moyenne d'injection est différente.

De plus, les pressions en biométhane requises en entrée des postes d'injection, soit en sortie des procédés d'épuration, doivent être plus élevées que celles des réseaux sur lesquels le gaz vert est injecté.

Les caractéristiques d'injection sont résumées dans le Tableau 12.

Tableau 12 - Caractéristiques d'injection sur les réseaux de gaz.

		Pression moyenne d'injection (Bars)	Consommation électrique pour la compression ³⁹ (kWh/Nm ³ BioCH ₄)
Réseau de transport		65	0,180
Réseau de distribution		-	-
dont	MPB 4 bars	5	0
	MPC 10 bars	11,5	0,100
	MPC 16 bars	17	0,120

En fonction des réseaux, les besoins en compression dépendent de la pression en sortie du procédé d'épuration du biométhane et de la pression requise en entrée de poste d'injection.

Contrairement aux autres technologies, la **cryogénie** sort un biométhane à la pression atmosphérique. Dans ce cas, une compression en amont de l'injection est prise en considération.

Pour les technologies du **lavage à eau**, du **PSA-CO₂** et de **l'épuration membranaire**, compte tenu des pressions en sortie de ces dernières, la compression n'est prise en compte que pour le biométhane injecté sur le réseau de transport ou le réseau MPC 16 bars.

La détermination de la consommation électrique pour les besoins en compression, en sortie de chaque technologie d'épuration, devrait être réalisée à partir de la consommation spécifique du compresseur et du volume injecté. De plus, si le compresseur n'est pas utilisé à sa pleine charge, la consommation électrique spécifique devient plus importante (en kWh/Nm³).

Dans le cadre de la modélisation, et à dire d'expert, les différentes consommations électriques mentionnées dans le Tableau 12 ont été retenues, et ce pour toutes les filières.

Lors de l'injection, un odorisant, du tétrahydrothiophène (THT), est ajouté au biométhane. L'odorisation est une mesure obligatoire permettant d'identifier la présence de gaz et donc d'éviter les risques associés. Une consommation de 0,025 g de THT/Nm³ de biométhane, correspondant à la moyenne des prescriptions GRDF⁴⁰ est considérée.

4.2.6. Réseau de transport et de distribution

Les processus de transport et de distribution du gaz naturel issus d'EcoInvent ont été utilisés et adaptés pour le biométhane :

Pour le réseau de transport, le processus « Natural gas, high pressure {FR} | market for | Cut-off, U » a été adapté :

3. La fabrication de l'infrastructure a été exclue par critère de coupure. En effet, ces impacts représentent moins de 1% des impacts environnementaux de l'étude. De plus, les pipelines ne dépendent pas de la mise en place d'un procédé de méthanisation mais sont déjà existants.
4. Les pertes de réseau sont exclues parce qu'il est considéré que le parcours du biométhane sur les réseaux de transport et de distribution est significativement plus court que pour le gaz naturel (valorisation du biogaz à l'échelle territoriale). En effet, les pourcentages de pertes associées à la donnée « gaz naturel » ne sont pas cohérents avec la filière ici étudiée.

³⁹ GRDF, Retour d'expériences

⁴⁰ GRDF, Cahier des charges fonctionnel du contrôle des caractéristiques du biogaz injecté, 2011.

5. Les consommations électriques et de gaz liées à cette étape sont toutefois conservées.

Pour le réseau de distribution, le processus « Natural gas, low pressure {CH}| market for | Cut-off, U » a été adapté :

- La fabrication de l'infrastructure a été exclue par critère de coupure. En effet, ces impacts représentent moins de 1% des impacts environnementaux de l'étude. De plus, les pipelines ne dépendent pas de la mise en place d'un procédé de méthanisation mais sont déjà existants.
- Les pertes de réseau sont négligées parce qu'il est considéré par rapport à du gaz naturel, que le réseau de distribution est utilisé localement (valorisation du biogaz à l'échelle territoriale). En effet, les pourcentages de pertes associées à la donnée « gaz naturel » ne sont pas cohérents avec la filière ici étudiée.
- La consommation énergétique de ce processus est toutefois conservée.

4.2.7. Combustion

Pour le poste de combustion, la chaudière utilisée est une chaudière à condensation (< 100 kW). La donnée « Heat, central or small-scale, biomethane {CH}| heat production, biomethane, at boiler condensing modulating <100kW | Cut-off, U » d'EcolInvent est adaptée.

Ces adaptations consistent à :

- Supprimer le rendement de la chaudière EcolInvent. En effet, le rendement ici considéré est à 100%. Le rendement de la chaudière peut être appliqué *a posteriori* par les futurs utilisateurs du facteur d'émission s'ils souhaitent l'exprimer par rapport à la chaleur utile.
- La fabrication de la chaudière est responsable d'environ 1g de CO₂e/kWh dans cette donnée. À l'échelle de l'unité fonctionnelle, cela représente peu. Par critère de coupure, le poste de fabrication de la chaudière est supprimé. La consommation électrique de la chaudière est toutefois conservée.

4.3. Données et hypothèses de travail spécifiques aux filières Agricole Autonome, Agricole Territorial et Industriel Territorial

4.3.1. Rappel des mix d'intrants

Agricole Autonome (AA)

- 60% d'effluents d'élevage (fumiers de bovin et lisiers de porc) ;
- 15% de Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique (CIVE) comprenant des CIVE d'hiver (mélange de triticale, seigle, avoine) et des CIVE d'été (maïs, sorgho) ;
- 9% de résidus de cultures ;
- 6,5% de cultures dédiées (maïs) ;
- 8,5% de déchets d'industries agroalimentaires ;
- 1% de déchets verts.

Agricole Territorial (AT)

- 40% d'effluents d'élevage (fumiers de bovin et lisiers de porc) ;
- 20% de CIVE comprenant des CIVE d'hiver (mélange de triticale, seigle, avoine) et des CIVE d'été (maïs, sorgho) ;
- 18% de déchets d'industries agroalimentaires (dont 2% de Sous-Produits ANimaux (SPAN)) ;
- 7% de résidus de cultures ;

- 4% de cultures dédiées (maïs) ;
- 7% de biodéchets ménagers ;
- 4% de déchets verts.

Industriel Territorial (IT)

- 34,8 % d'effluents d'élevage (fumiers de bovin et lisiers de porc) ;
- 2,4 % de résidus de cultures ;
- 34,4 % de boues de STEU et boues issues des IAA ;
- 6,1 % de SPAN et déchets C3 ;
- 2,2 % de biodéchets ;
- 0,7 % de résidus issus de la transformation de pomme de terre et féculerie ;
- 1,8 % d'amidonnerie ;
- 8,6 % de corps gras végétaux (huiles et graisses) ;
- 8,1 % de restes issus de la transformation de fruits et légumes ;
- 0,9 % de déchets de papeterie.

4.3.2. Potentiels méthanogènes et composition des différents biogaz

L'Erreur ! Source du renvoi introuvable. détaille les caractéristiques des substrats et des mix d'intrants : teneur en matière sèche, teneur en matière organique, potentiel méthanogène, production de biogaz, taux de CH₄, production de CH₄ et teneur en azote, phosphore et potasse.

Comparativement aux ACV précédentes réalisées par QUANTIS et ENEA Consulting, les valeurs des BMP dans le présent rapport ont évolué, avec l'utilisation des données de Méthasim. Une analyse de sensibilité a été réalisée avec les BMP fournis par l'outil DIGES (Digestion anaérobie et gaz à effet de serre) : cette analyse ne montre pas d'amélioration des potentiels méthanogènes par rapport à l'utilisation des données de Méthasim.

Le Tableau 13 décrit les potentiels méthanogènes de chaque filière. A noter qu'un taux d'expression du potentiel méthanogène de 100% est considéré. Le Tableau 14 détaille les compositions des biogaz bruts.

Tableau 13 - Potentiel méthanogène des filières

Filières	Potentiel de biogaz (Nm ³ /t MB)	Production de CH ₄ (Nm ³ CH ₄ /t MB)	Sources / commentaires
AA	104,6	64,6	Calcul grâce aux BMP de Méthasim.
AT	132,0	82,2	Calcul grâce aux BMP de Méthasim. Dans Prodiges 2 ⁴¹ , en moyenne 79 m ³ /t MB
IT	108,9	73,6	Calcul grâce aux BMP de Méthasim.

⁴¹ Programme d'acquisition de références sur les unités de méthanisation agricole (PRODIGE), Synthèse des performances techniques et économiques d'un panel de 30 unités de méthanisation en cogénération, 2019.

Tableau 14 - Composition des biogaz bruts pour les filières AA, AT et IT

Composition du BIOGAZ	Unité	Filière AA	Filière AT	Filière IT	Sources/Commentaires
CH ₄	%vol.	66%	64%	71,8%	Méthasim. Gamme de valeur : [55-75 %]
CO ₂	%vol.	31%	33%	25,1%	Calcul par soustraction. Gamme de valeur : [14-33 %]
H ₂ O	%vol.	3%	3%	3%	Hypothèse fixée. D'après la bibliographie, valeur allant de 0 à 6%
H ₂ S	%vol.	0,11%	0,11%	0,11%	Donnée de l'ancienne étude - INERIS, 2002 ⁴²
NH ₃	%vol.	0,0004%	0,0004%	0,0004%	Donnée de l'ancienne étude - INERIS, 2002 ⁴²
CO	%vol.	0,0026%	0,0026%	0,0026%	Donnée de l'ancienne étude - INERIS, 2002 ⁴²

4.3.3. Gestion des substrats

Le mix de substrats de chaque filière est différent, que ce soit du point de vue des intrants qui le composent ou encore de la proportion de chaque intrant dans le mix. Toutefois, pour un même type d'intrant, les hypothèses seront identiques entre les filières.

Effluents d'élevage

Ces substrats sont utilisés dans les trois filières AA, AT et IT. Le lisier (forme liquide) est considéré comme originaire d'exploitations porcines et le fumier (forme solide) comme originaire d'exploitations bovines. Étant donné leur statut de déchet, leur impact environnemental en entrée est alors considéré comme nul. Il n'est pas considéré que l'épandage des effluents (fumier et lisier) entraîne un stockage de carbone additionnel et que par conséquent, leur utilisation en méthanisation entraîne un déstockage de carbone. L'hypothèse est faite que l'apport de matière organique par le digestat d'effluent d'élevage permet de stocker sur le long terme une quantité équivalente de carbone dans le sol en comparaison à ce que les effluents non digérés auraient apporté^{43, 16}.

Cultures

CIVE

Plusieurs substrats proviennent de cultures agricoles : les CIVE, les cultures dédiées et les résidus de culture. La différence entre une CIVE et une culture dédiée est son intégration dans la rotation au sein d'une exploitation. La CIVE est une culture intermédiaire, qui comme son nom l'indique, est cultivée dans un intervalle de temps compris entre deux cultures principales. Elle contribue alors à couvrir le sol et limiter ainsi la lixiviation et le lessivage des nitrates, ce qui peut d'ailleurs être sa vocation principale (cas

⁴² INERIS, Caractérisation des biogaz ; bibliographie et mesures sur sites, 2002.

⁴³ Thomsen, I. K., Olesen, J. E., Møller, H. B., Sørensen, P., & Christensen, B. T. (2012). Carbon dynamics and retention in soil after anaerobic digestion of dairy cattle feed and faeces

des Cultures Intermédiaires Pièges à Nitrates (CIPAN)). La biomasse aérienne des CIVE est cependant récoltée dans un but de valorisation énergétique tandis que les CIPAN sont entièrement restituées au sol.

L'implantation de cultures intermédiaires dans la rotation remplit plusieurs fonctions autres que la production d'énergie pour les CIVE et la réduction du lessivage des nitrates pour les CIPAN. Ces fonctions secondaires peuvent être considérées comme des co-bénéfices environnementaux :

- **Stockage de carbone dans le sol** : la biomasse aérienne et racinaire des cultures intermédiaires permet un stockage de carbone dans le sol. La biomasse racinaire des CIVE est plus importante que celle d'une CIPAN car ses rendements sont en général, plus élevés⁴⁴. La biomasse d'une culture intermédiaire laissée au champ (aérienne et/ou racinaire) permettra d'enrichir le sol en matière organique ;
- **Gestion des adventices** : l'implantation d'une culture intermédiaire permet de limiter la germination des adventices en "étouffant" leur développement par effet de concurrence en comparaison à un sol laissé à nu où les stocks de graines d'adventices du sol peuvent se développer librement ;
- **Erosion des sols** : en période automnale/hivernale principalement, en particulier lorsque le sol est non couvert, les précipitations plus importantes vont déplacer les particules du sol qui subit alors une perte de matière. Le vent est aussi un facteur naturel d'érosion. Planter une culture intermédiaire permet ainsi de limiter ces déplacements de matières en protégeant le sol de l'effet de l'eau et du vent ;
- **Biodiversité** : les cultures intermédiaires peuvent servir de refuge pour les animaux, et dans le cas de semis de plantes à fleurs, elles peuvent également jouer un rôle de ressources alimentaires pour les pollinisateurs⁴⁵.

L'apport de matière organique et le rôle de structuration du sol des cultures intermédiaires permettent entre autres de limiter le travail du sol, de faciliter le passage des engins agricoles et par conséquent, de réduire les consommations de carburant. Indirectement, ces fonctions secondaires contribuent donc à réduire l'impact des systèmes agricoles sur le changement climatique. De même, la diminution de la pression en adventices permet *a priori* de réduire le nombre de passages d'engins agricoles (pulvérisateurs ou matériel de désherbage mécanique), ou encore de limiter l'usage d'herbicides, soit une économie de charges potentielle.

A noter que l'implantation de CIVE peut entraîner des conséquences négatives sur les rendements de la culture principale suivante en fonction de la période et de la durée d'implantation. En effet, une récolte tardive des CIVE (et plus particulièrement des CIVE d'hiver) dans l'objectif de maximiser ses rendements peut entraîner des conséquences sur le rendement de la culture principale suivante en décalant son semis avec un risque de stress hydrique accru. La CIVE consomme de l'eau disponible dans la réserve utile du sol qui peut ne pas se recharger suffisamment avant l'implantation de la culture principale. Également, la CIVE peut consommer une partie des réserves en nutriments du sol. Ces impacts n'ont pas été considérés dans la présente étude.

La modélisation des CIVE s'est faite en considérant deux périodes d'implantation : hivernale pour les CIVE d'hiver (le couvert est implanté à l'automne, avant le semis d'une culture de printemps), et estivale pour les CIVE d'été (le couvert est implanté durant l'été avant le semis d'une culture d'hiver). Ces deux

⁴⁴ [ARVALIS-infos, Une interculture particulière pour produire de l'énergie, 2019](#)

⁴⁵ [IBIS \(Intégrer la Biodiversité dans les Systèmes d'exploitations agricoles\), Pratiques, 2009](#)

catégories représentent respectivement 54% et 46%⁴⁶ des CIVE qui rentrent dans le digesteur. Les CIVE d'hiver comme d'été ne sont pas irriguées. La fertilisation des CIVE s'effectue à partir du digestat produit grâce à la méthanisation. Une fertilisation exclusivement organique à partir du digestat est possible et démontrée dans des études telles que le projet RECITAL où peuvent être épandues jusqu'à 25 tonnes de digestat par hectare¹⁰². D'autres expérimentations menées dans le cadre de RECITAL et OPTICIVE ont également démontré qu'une fertilisation 100% organique (par des digestats) n'engendrait pas de baisse de rendement en comparaison à une fertilisation 100% minérale. La fertilisation est calculée d'après le Mineral Fertilizer Equivalent (MFE) de ce digestat. Le Tableau 15 présente les principales hypothèses de modélisation utilisées pour ces cultures.

⁴⁶ AAMF, entretien et échanges, 2022

Tableau 15 - Hypothèses de l'itinéraire technique retenues concernant la conduite des différents types de CIVE.

	CIVE d'hiver	CIVE d'été	Sources
Espèces	Triticale - Seigle - Orge	Maïs -Sorgho	Agrosolutions
Précédent	Blé tendre d'hiver	Orge d'hiver	Agrosolutions
Opérations mécaniques	Préparation du lit de semences (<i>CIVE vs sol nu</i>) Semis (<i>CIVE vs sol nu</i>) Fertilisation organique à partir de digestat (<i>CIVE vs CIPAN et sol nu</i>) Récolte (ensileuse automotrice) (<i>CIVE vs CIPAN et sol nu</i>) Transport (<i>CIVE vs CIPAN et sol nu</i>) Stockage (<i>CIVE vs CIPAN et sol nu</i>)		INRAE Transfert ¹⁹ , Agribalyse 3.0 pour les consommations de carburant.
Quantité de semence (kg/ha)	40 × 3 = 120	20 × 2 = 40	
Dose Fertilisation azotée (kg de N/ha)	80	60	Projet RECITAL ⁴⁷ , INRAE Transfert ¹⁹
Quantité de digestat épandu (t)	21,6 t (filière AA) 18,8 t (filière AT)	16,2 t (filière AA) 14,1 t (filière AT)	Calcul selon la teneur en azote du digestat et la dose à apporter. Le digestat utilisé est celui issu de la modélisation ACV du biométhane, par filière.
Date de récolte	01/04	12/10	Projet RECITAL, Agrosolutions
Rendement (tMS/ha)	8		D'après l'AAMF
% MS de la biomasse	28%	25%	D'après l'AAMF
Stockage de carbone	1024 × 0,14 + 413 × 0,86 = 501 kg de CO ₂ e/ha/an		Levavasseur et al. (2022) ⁴⁸ CNDP, 2020 ⁴⁹
Emissions au champ lié à la fertilisation	Les flux d'émissions azotés liés à l'épandage des digestats au champ sont considérés (Tableau 43)		Cf. Tableau 43
Modélisation	Via MEANS : Seigle – type générique pour les grandes cultures	Via MEANS : Maïs ensilage – Type générique pour les grandes cultures	/

Comme expliqué précédemment, les CIVE remplissent aussi un rôle de CIPAN. La mesure des impacts de la conduite des CIVE et du stockage de carbone sont calculés selon deux situations :

- La CIVE vient en remplacement d'un sol nu,

⁴⁷ [Projet RECITAL, Enquête AMF Etat des lieux CIVE, 2021, résultats cohérents avec l'étude SEMENCIVE 2020](#)

⁴⁸ Levavasseur et al. (2022). Supplementary material to: Energy cover crops for biogas production increase soil organic carbon stocks: A modelling approach. INRAE

⁴⁹ CNDP, Bilan des garants, Révision du Programme d'Actions National nitrates, 2020

- La CIVE vient en remplacement d'une CIPAN.

Or, il est difficile de connaître la proportion exacte de surfaces sur lesquelles une CIVE vient soit se substituer à un sol nu, soit se substituer à une CIPAN. C'est pourquoi les données du cadre réglementaire de la Directive Nitrates sont utilisées comme référence. Cette directive classe le territoire selon deux zones : les zones vulnérables (ZV) et les zones non vulnérables (ZNV). Les ZV sont des territoires pour lesquels a été relevée une teneur en nitrates élevée. Ces zones sont concernées par certaines mesures du Programme d'Action National nitrates, qui imposent une couverture végétale minimale durant les périodes pluvieuses. Ainsi, les ZNV sont plus susceptibles d'avoir des sols nus que les ZV, où il est obligatoire d'avoir une couverture hivernale des sols. A l'échelle du territoire national, les ZV représentent 68% de la surface et les ZNV 32%. Seulement, ces proportions nationales considèrent aussi des surfaces de productions agricoles où la culture des CIVE n'est pas possible. Afin d'obtenir de nouvelles proportions sur des surfaces plus propices à l'implantation des unités de méthanisation au sein du territoire métropolitain, ces données ont alors été recalculées sur les surfaces de grandes cultures et polyculture-élevage (hors prairies) uniquement. En superposant les données de Registre Parcellaire Graphique (RPG) des surfaces de grandes cultures et polyculture-élevage (hors prairies) et les données de ZV et ZNV à l'aide d'un logiciel de Système d'Information Géographique (SIG), les proportions à considérer dans le cadre de cette étude sont respectivement de 86% pour les ZV et de 14% pour les ZNV.

Itinéraires techniques des CIVE

Deux itinéraires techniques distincts sont donc mis en place :

1/ La situation dans laquelle une CIVE vient en remplacement d'un sol nu demande à prendre en compte l'ensemble des pratiques culturales de la conduite des CIVE : préparation du lit de semences, semis, fertilisation, récolte, transport jusqu'à la ferme et le stockage.

2/ Tandis que dans la situation où une CIVE se substitue à une CIPAN, leur conduite ne prend ici en compte que les étapes qui diffèrent de celles d'une CIPAN, c'est-à-dire la fertilisation, la récolte, le transport jusqu'à la ferme et le stockage. De fait, les étapes exclues du calcul des impacts sont donc la préparation du lit de semences et le semis, car elles auraient dans tous les cas eu lieu avec la conduite de la CIPAN dans un contexte sans méthanisation.

Prise en compte du stockage de carbone dans les sols grâce à l'implantation de CIVE.

L'introduction de cultures intermédiaires au sein d'une rotation culturale est une pratique de séquestration potentielle de carbone. Par rapport à un sol nu, le couvert végétal produit de la biomasse souterraine et aérienne dont une partie du carbone de la matière organique sera stockée dans le sol après décomposition. L'action 4 du rapport d'INRAE portant sur la contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de GES (Justes et al., 2012⁵⁰ ; Pellerin et al., 2013⁵¹) estime un stockage constant du carbone dans le sol par des cultures intermédiaires. L'implantation d'une CIPAN avec destruction et enfouissement de la biomasse (CIPAN dont le rendement est d'environ 2 tMS/ha) serait associée à un stockage de carbone dans le sol qui est estimé à :

- Valeur basse de 480 kg CO_{2e} / ha / an (soit 130 kg C / ha / an) ;
- Valeur haute de 1 265 kg CO_{2e} / ha / an (soit 345 kg C / ha / an).

⁵⁰ Justes et al. (2012). *Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires : conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques. Synthèse du rapport d'étude.* INRA.

⁵¹ Pellerin et al. (2013). *Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques*, p. 454, INRA, France.

D'après Marsac (2018)⁵², la biomasse racinaire et aérienne restant au champ après la récolte d'une CIVE (soit la fraction non récoltée) est du même ordre de grandeur que l'ensemble de la biomasse des CIPAN non récoltée, la biomasse souterraine d'une CIVE étant nettement plus importante que la biomasse souterraine d'une CIPAN. Cependant, d'après l'étude Carbocims⁴⁸, l'apport de digestat sur les CIVE permet un retour d'une partie du carbone de la partie aérienne des CIVE utilisées dans le méthaniseur. Dans cette situation, lorsque la CIVE vient en remplacement d'une CIPAN, son stockage de carbone est supérieur.

Le potentiel de stockage de carbone dépend de l'état initial de référence, composé d'un système de culture et d'un contexte pédoclimatique. À l'échelle de notre étude, c'est-à-dire à l'échelle « France », il n'est pas possible de déterminer un état initial représentatif de l'hétérogénéité des contextes et des systèmes de production des exploitations françaises. En effet, l'implantation d'une CIVE va avoir plusieurs effets potentiels sur les pratiques culturales, dont :

- La modification du système de culture initial (changement des cultures de la rotation) ;
- Le remplacement d'un sol nu ou d'une culture intermédiaire type CIPAN ou d'une culture principale dans le cas d'une modification de la rotation ;
- La modification des pratiques de fertilisation (minérale à organique, avec l'épandage de digestat).

Ainsi, une valeur moyenne de stockage de carbone d'une CIVE est utilisée. Elle est calculée à partir des données de l'étude Carbocims qui traite 13 cas représentatifs de différents contextes pédoclimatiques, rotations et avec différentes lignes de base (sol nu ou CIPAN). Les données utilisées pour le calcul sont celles des cas-types d'exploitations qui intègrent des CIVE en remplacement d'un sol nu (1024 kg de CO₂e/ha/an) et des CIVE en remplacement d'une CIPAN (413 kg de CO₂e/ha/an). L'étude prend en compte la contribution aérienne et racinaire des CIVE ainsi que du digestat au stockage de carbone. L'implantation de CIVE, en particulier des CIVE d'hiver, peut conduire à une perte de rendements de la culture principale suivante. Cependant, toutes les études ne convergent pas sur ce point. Il existe une variabilité des conclusions selon les études et une incertitude sur cette conséquence. Effectivement, cela dépend de plusieurs facteurs qui peuvent contribuer à cette perte de rendement : le type de CIVE (hiver/été) et l'espèce ou le mélange d'espèces de CIVE, les périodes de récolte des CIVE, ou encore la conduite azotée de la CIVE et de la culture implantée après la CIVE entre autres. L'étude Carbocims prend en compte cet effet et le déstockage qui en découle. Dans cette étude, cet impact n'est pas considéré pour les raisons expliquées précédemment mais aussi car il s'agit d'une ACV attributionnelle et non d'une ACV conséquentielle. En ACV attributionnelle, l'impact indirect ne doit pas être pris en compte, le différentiel de stockage étant ainsi alloué au facteur d'émission de la culture suivante.

La valeur de stockage de carbone selon chacune des situations d'implantation d'une CIVE est ensuite pondérée à la surface de ZN et ZNV. La valeur est de 501 kgCO₂e/ha de CIVE/an.

Calcul de la valeur de stockage CIVE (tCO₂e/ha/an) = [%_surface_ZV] * [stockage carbone situation CIVE vs CIPAN (tCO₂e/ha/an)] + [%_surface_ZNV] * [stockage carbone situation CIVE vs sol nu (tCO₂e/ha/an)]

Cette hypothèse n'est pas irréfragable (car ce n'est pas parce que l'agriculteur n'est pas en ZV qu'il n'utilise pas de couverts) mais elle permet toutefois de prendre en compte cet intérêt environnemental des CIVE, en gardant une approche « conservatrice ».

Cultures dédiées

⁵² Marsac, S. (2018). CIVE : une opportunité pour l'adaptation des systèmes de culture ? Résultats d'Opticive. Paris, France.

Les cultures dédiées sont également des productions agricoles à vocation énergétique. A l'inverse des CIVE, ce sont des cultures principales. Leur utilisation est régie par la réglementation qui fixe une limite à leur utilisation à hauteur de 15% du tonnage brut total des intrants par année civile ou à 15% du tonnage brut des intrants sur une moyenne de trois ans⁵³. Cette réglementation permet de limiter de potentielles dérives sur les conflits d'usage des sols, puisqu'une culture dédiée qui a pour vocation la production d'énergie peut potentiellement rentrer en compétition avec une culture principale à vocation alimentaire en venant la remplacer. La culture énergétique utilisée dans l'étude est un maïs ensilage dont l'itinéraire technique modélisé est indiqué au Tableau 16. La culture dédiée est irriguée car les conditions climatiques estivales peuvent rendre plus difficiles sa levée ainsi que son développement et donc sa productivité. L'ensemble de l'itinéraire technique des cultures dédiées est pris en compte dans la mesure des impacts.

Tableau 16 - Hypothèses de l'itinéraire technique utilisé depuis Agribalyse 3.0 pour les cultures dédiées

	Cultures dédiées	Source
Espèces	Maïs ensilage	ICV Agribalyse 3.0 <i>Silage maize, conventional, national average, at farm gate/kg/FR</i>
Rendement (t MS/ha)	12,2	
Opérations mécaniques	Travail du sol : déchaumage, décompactage, labour, préparation du Lit de semence Semis Fertilisation Protection des plantes Récolte Ensilage	
Fertilisation (kg/ha)	Fertilisation mixte, minérale + organique Nmin : 60 kg N/ha Norg : 114 kg N/ha = 173 kg N/h Pmin : 33 kg P ₂ O ₅ /h Kmin : 65 kg K ₂ O/ha	
Irrigation	Oui	
Produits phytopharmaceutiques	Oui, herbicide et insecticide	

Résidus de culture

Les résidus de culture sont considérés comme des déchets qui sont valorisés à travers la méthanisation, leur impact environnemental est donc considéré comme nul. Comme dans le cas des effluents d'élevage, il n'est pas considéré que la restitution des résidus au champ entraîne un stockage de carbone additionnel et que par conséquent, leur exportation entraîne un déstockage de carbone.

Boues et coproduits d'industries agroalimentaires / Déchets ménagers et biodéchets / Déchets verts

⁵³ [Légifrance, Décret n° 2016-929 du 7 juillet 2016 pris pour l'application de l'article L. 541-39 du code de l'environnement, 2016](#)

Les trois substrats : boues et coproduits d'industries agroalimentaires, déchets ménagers et biodéchets ainsi que déchets verts possèdent le statut de déchets, leur impact environnemental est donc nul.

4.3.4. Transport et stockage des substrats

Pour l'ensemble des substrats, les étapes de transport et de stockage sont prises en compte : en effet, les distances de transport et les types de stockage peuvent être différents d'un substrat à l'autre.

Transport des substrats, données communes aux filières AA, AT et IT

Les distances appliquées aux différents substrats territoriaux et agricoles sont mentionnées dans le Tableau 17 suivant :

Tableau 17 - Distance parcourue par type de substrat et type de véhicule associé.

Type de substrat	Distance moyenne (en km)	Type de véhicule
CIVE et résidus de cultures	10	Fond Mouvant 90 m ³
Fumiers et lisiers	10	PTAC 40 t
Déchets verts et biodéchets	20	Amplioli 26 t
Boues et coproduits des IAA	15	Camion benne de 25 t

Ces hypothèses se veulent conformes aux rayons moyens parcourus dans le cadre d'approvisionnement d'unités territoriales et agricoles. Ces données sont issues essentiellement de retours d'expérience, *Cap Vert Bioénergie* et *GreenPro*, ainsi que de la Base Empreinte et de l'ACV Biométhane de l'INRAE Transfert (2021)¹⁹. Par ailleurs, elles sont appuyées par les informations disponibles dans les dossiers de demande d'enregistrement des unités de méthanisation.

Seule la distance et le type de transport relatifs aux produits agroalimentaires sont des hypothèses basées uniquement sur les dossiers de demande d'enregistrement.

Les valeurs de distance utilisées sont potentiellement sous-estimées. D'après le rapport de l'Observation régionale de la méthanisation en Grand Est²⁸, les distances moyennes peuvent être plus importantes : la distance moyenne en filière AA est de 24 km, en AT et IT de 26 km, en filière STEU de 8 km. Cependant, au-delà des spécificités géographiques cette source renvoie à une moyenne tous intrants confondus par filière à la différence de la présente étude qui utilise une distance par intrant. De plus, dans les données de cet observatoire la moyenne des distances est calculée seulement sur les intrants extérieurs aux unités de méthanisation (les intrants produits sur l'exploitation agricole ne sont pas comptabilisés). La prise en considération de distances plus importantes ne changerait pas majoritairement les conclusions de l'étude. Une analyse de sensibilité sur ce point n'est donc pas à privilégier.

Pour tous les transports, le taux de charge moyen proposé par l'ADEME pour chaque type de véhicule a été pris en compte (50% pour les porteurs 40 t ; 30% pour les porteurs 12 et 7,5 t).

Stockage des substrats

Concernant le stockage des différents substrats avant méthanisation, il peut être couvert ou non. D'après l'étude INRAE Transfert (2021)¹⁹, pour les effluents, il est considéré non couvert et d'une durée

relativement courte de 8 jours, réduite par le procédé de méthanisation⁵⁴. A titre de comparaison, un stockage classique d'effluents d'élevage est estimé à 180 jours d'après INRA, 2013⁵⁵.

Le facteur d'émission du CH₄ à hauteur de 36% découle du facteur d'émission du lisier porcin au stockage qui est de 45%. Dans la source bibliographique utilisée, l'hypothèse est faite d'un système de gestion des déjections sur caillebotis, avec une répartition du temps de stockage au bâtiment de 20% et à l'extérieur de 80%. Les émissions au bâtiment sont considérées comme négligeables, reste donc 80% des émissions à comptabiliser, soit $45 \times 0,8 = 36\%$. Concernant le facteur d'émission du CH₄ du fumier, l'hypothèse est faite que l'ensemble du stockage se fait à l'extérieur, sa valeur reste alors de 1,5%.

Ce stockage est associé à des émissions vers l'atmosphère de NH₃, NO_x et de N₂O, précisées dans le Tableau 18 Aucune récupération de méthane n'est prévue dans le cadre de ce stockage.

Tableau 18 - Modèles d'émissions lors du stockage des effluents pour 180 jours.

Emissions au stockage	Lisier	Fumier	Source
N_NH ₃ (%TAN*)	11% du TAN* (TAN = 70% de Ntot**)	32% du TAN* (TAN = 60% Ntot**)	EMEP/EEA, 2019a, Tier 2 ⁵⁶
N_NO _x (%TAN*)	0,01 % TAN*	1% du TAN*	EMEP/EEA, 2019a, Tier 2 ⁵⁶
N_N ₂ O direct (%N)	0%	2%	EMEP/EEA, 2019a, Tier 2 ⁵⁶ (lisier) INRA 2013 ⁵⁵ (fumier)
CH ₄	36% du BMP***	1,5% du BMP***	INRA 2013 ⁵⁵

*TAN : Azote ammoniacal, (Total Ammonia Nitrogen) ;

** Ntot : Azote total ;

***BMP : Potentiel méthanogène (Biological Methane Potential).

Afin de mettre à jour les données de l'étude INRAE Transfert, l'enquête menée sur 50 unités de méthanisation à l'automne 2022 par GRDF¹⁶ (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) a montré que les durées de stockage des fumiers et lisiers avec et sans méthanisation selon les filières (Tableau 19) concernées étaient les suivantes :

Tableau 19 - Durée de stockage des effluents (en jours) entre un scénario avec et sans méthanisation

	Durée de stockage des effluents sans méthanisation		Durée de stockage des effluents avec méthanisation	
	Fumier	Lisier	Fumier	Lisier
Filière AA	125 j	156 j	11,6 j	26,1 j
Filière AT	81 j	110 j	17,1 j	15 j
Filière IT	83 j	125 j	52,5 j	22,5 j

Le flux d'émissions est considéré constant durant toute la durée de stockage qui dure 180 jours. Un facteur de réduction est affecté aux facteurs d'émissions au stockage de lisiers et de fumiers de référence (Tableau

⁵⁴ Retour d'expérience de Vargas et al., 2017

⁵⁵ INRA, Action. 9 Développer la méthanisation, et installer des torchères, pour réduire les émissions de CH₄ liées au stockage des effluents d'élevage, 2013

⁵⁶ EMEP/EEA, 2019a, 2.B Manure management

20) pour obtenir des facteurs d'émissions du modèle de méthanisation, intégrant les durées de stockage précédentes.

Tableau 20 - Facteur de réduction des émissions en fonction du temps de stockage des effluents

	Filière AA	Filière AT	Filière IT
Facteur de réduction Fumier	$11,6/180 = 0,0644$	$17,1/180 = 0,095$	$52,5/180 = 0,2917$
Facteur de réduction Lisier	$26,1/180 = 0,145$	$15/180 = 0,0833$	$22,5/180 = 0,125$

Enfin, pour refléter les données de couverture des lisiers, un coefficient d'abattement de 80% des émissions est pris en compte. Les ratios de tonnages couverts sur l'échantillon de sites enquêtés représentatifs de la filière par GRDF à l'automne 2022¹⁶ sont indiqués dans le Tableau 21.

Tableau 21 - Proportion des systèmes de stockage des lisiers couverts

	Filière AA	Filière AT	Filière IT
Couverture des lisiers en phase de stockage (% couverts en moyenne sur les tonnages)	51%	24%	62%

Pour les résidus de culture et les déchets verts, il a été considéré que le stockage avait lieu dans une aire sous couvert, durant 8 jours également et qu'aucune émission à l'air n'est à prendre en compte⁵⁷.

Concernant les déchets issus des IAA et les biodéchets, facilement biodégradables, leur introduction en méthanisation est très souvent faite en flux tendus, donc aucune mesure de stockage n'a été considérée pour ces derniers.

4.3.5. Prétraitement des substrats

Les équipements de prétraitement considérés dans l'étude sont les suivants :

- Le broyage intervient au niveau des substrats solides, liquides et pâteux et est indispensable dans toute unité de méthanisation. D'après l'enquête GRDF menée auprès de 50 unités de méthanisation à l'automne 2022¹⁶, l'étape de broyage est considérée pour l'ensemble des substrats, à l'exception des boues de STEU liquide, des biodéchets et des déchets de papeteries pour les filières AT et IT ;
- Pour l'étape d'hygiénisation, la question est à nuancer suivant le type de substrats : Dans l'étude de QUANTIS en 2021, seulement 10% des biodéchets ont été hygiénisés pour la filière AT⁵⁸. Les hypothèses suivantes ont été posées pour la mise à jour de cette étude :
 - o Pour la filière AA : pas d'hygiénisation car pas de biodéchets ;
 - o Pour la filière AT : hygiénisation des biodéchets et des SPAN provenant des IAA ;
 - o Pour la filière IT : hygiénisation des effluents, des biodéchets, des SPAN et déchets C3.

L'hygiénisation correspond à un traitement de chauffage des produits concernés, pendant une durée de 60 minutes et à une température de 70°C.

⁵⁷ GreenPro, retour d'expérience projet, données collectées par ENEA Consulting

⁵⁸ Référence AileSpan, DGALSpan et SPAN (CE 1029-2009).

Des dérogations à l'hygiénisation existent et différents cas de figure peuvent donc apparaître selon les sites de méthanisation, et plus exactement selon les types d'intrants utilisés.

Les étapes de broyage et d'hygiénisation consomment de l'électricité, environ 3,3 kWhe/t substrat pour le broyage d'après l'étude d'ENEA Consulting de 2014⁵⁹ et de 7 kWhe/t pour l'hygiénisation. L'hygiénisation consomme également de la chaleur, environ 50 kWh/t. Les données sur cette étape viennent du Guide d'hygiénisation, Aile de 2021⁶⁰. L'hygiénisation consiste à chauffer les intrants et cette étape est réalisée par chauffage au gaz naturel. D'après le guide de l'hygiénisation, la consommation de gaz naturel est celle s'avérant la plus intéressante d'un point de vue économique pour réaliser cette étape de chauffage des intrants. Le contexte géopolitique actuel et son impact sur le secteur énergétique pourrait remettre en cause cet intérêt économique. Cependant, dans la méthode avec allocation économique, les prix doivent être représentatifs du marché moyen. De même, la méthode par extension de frontière et substitution repose sur une comparaison avec un scénario de référence qui doit être représentatif du marché moyen et ne doit donc pas considérer une évolution ponctuelle du marché le rendant marginal. L'hypothèse alors formulée est une utilisation de gaz naturel pour l'hygiénisation des intrants en amont du digesteur.

L'arrêté du 10 juin 2023⁶¹ montre cependant une évolution de la réglementation, conduisant à une obligation de l'utilisation de biogaz pour cette étape. Le biogaz produit est autoconsommé sur l'unité de méthanisation. Ce nouvel aspect fait l'objet d'une analyse de sensibilité (section 7.3).

Hypothèse faite sur l'hygiénisation des intrants pour la filière IT

Les sous-produits animaux et autres produits dérivés, à savoir les matières classées en catégories C2 et C3, font l'objet d'une hygiénisation dans le cadre de la méthanisation.

Il est à noter dans un premier temps, que pour les matières classées C2 (hors déjections d'animaux), l'hygiénisation n'est pas obligatoire si une étape de stérilisation a déjà été menée en amont.

Par rapport aux effluents d'élevage (C2), l'instruction technique de la Direction Générale de l'Alimentation (DGAL) de 2020 apporte une contrainte supplémentaire, en rendant systématiquement obligatoire (plus aucune dérogation accordée) l'hygiénisation pour tout tonnage annuel d'effluents de plus de 30 000 tonnes, ou tonnage provenant d'une pluralité d'élevages (une dizaine).

Par ailleurs, dès lors qu'une introduction de SPAN classés C3 tels que des denrées alimentaires d'origine animale crues, impropres à la consommation, issues d'abattoirs, ou autres, est prévue, presque tous les produits deviennent concernés par l'hygiénisation.

Enfin, dans le cas où il y aurait uniquement des effluents d'élevage (pas de biodéchets) parmi les intrants, alors une hygiénisation seulement en aval de la méthanisation peut être envisagée. Cette dernière ne concernera donc que le digestat.

Ainsi, l'hygiénisation concerne les effluents d'élevage, les biodéchets, les SPAN et des déchets C3 pour la filière IT.

4.3.6. Digestion et torchage

⁵⁹ ENEA Consulting. (2014). Retours d'expérience, consultations d'experts et base de données interne.

⁶⁰ Aile, Guide de mise en œuvre de l'hygiénisation en méthanisation, 2021

⁶¹ [Légifrance - Arrêté du 10 juin 2023 fixant les conditions d'achat du biométhane injecté dans les réseaux de gaz naturel](#)

Pour les trois filières AA, AT et IT, la méthanisation se fait en voie liquide en infiniment mélangée dans un digesteur suivi d'un post digesteur. La technologie retenue pour le modèle correspond à une digestion mésophile, technologie largement majoritaire en France.

Les données utilisées pour modéliser cette étape sont des données de consommations d'électricité, d'autoconsommation de chaleur, d'émissions dans l'air, de part de biogaz envoyé en torchère et d'infrastructure (Tableau 22). Au total, la consommation électrique du processus de méthanisation et de l'épuration équivaut à 8,2% de l'énergie injectée dans le réseau dans le cas de la filière AA. L'impact de la fabrication du digesteur est intégré dans la modélisation à travers une infrastructure moyenne, ce dernier étant construit spécifiquement pour la production de biométhane.

Tableau 22 - Données utilisées pour le poste de digestion

Flux	Unité	Valeur	Source
Autoconsommation de biogaz	% du biogaz total produit par le digesteur	AA: 2,4% AT: 2,6% IT: 0,6% BD: 3,4% STEU: 1,7%	GRDF, enquête 2022
Consommation d'électricité	kWhe/kWh biométhane injecté	2,8%	ADEME, 2017
Pertes biogaz (émissions fugitives)	% biogaz total produit par le digesteur	0,5%	INRAE, transfert 2021
Part du biogaz envoyé en torchère	% biogaz total produit par le digesteur envoyé en torchère	AA : 1,1% AT : 0,9% IT : 2,6% BD : 4,1%	GRDF, enquête 2022

La production de biogaz valorisable en sortie de digesteur se calcule de la manière suivante :

$$\langle \text{Biogaz valorisable en sortie de digesteur} \rangle = [1 - (\langle \text{Autoconsommation de biogaz} \rangle + \langle \text{Pertes biogaz (émissions fugitives)} \rangle) + \langle \text{Part du biogaz envoyé en torchère} \rangle] \times \langle \text{Quantité totale de biogaz produite} \rangle$$

La donnée d'infrastructure utilisée est la donnée « *Anaerobic digestion plant, agriculture, with methane recovery {CH}* | construction | Cut-off, U » issue de la base de données Ecolnvent 3.7.

4.3.7. Traitement de l'air

Une étape de traitement de l'air par biofiltre a été prise en compte pour les filières AT et IT et ne concernent que certains intrants. Les données utilisées (Tableau 23) ont été reprises de l'étude QUANTIS – ENEA Consulting de 2017³⁷ et complétées par les données de l'enquête menée par GRDF¹⁶ à l'automne 2022 sur 50 unités de méthanisation. Un biofiltre s'apparente à un composé organique de type "sciure, compost, écorce, tourbe". Ainsi, l'hypothèse a été faite d'utiliser une donnée de production de compost comme proxy pour modéliser le biofiltre pour le traitement de l'air. On utilise un process existant dans la base de données Ecolnvent, qui est proche d'un biofiltre : il s'agit de la donnée A. *Compost, of biowaste* de la base de données Agribalyse 3.0.

Tableau 23 - Données utilisées pour le poste de traitement de l'air

Flux	Unité	Valeur AA	Valeur AT	Valeur IT	Valeur BD	Source
Quantité d'air traitée par quantité de substrat	m3 traité/t de mix de substrat	7 953	15 330	4 091	38 355	GRDF, enquête 2022 ¹⁶
Consommation électrique moyenne	kWhe/Nm ³ air traité	0,000265	0,000853	0,000694	0,000489	GRDF, Enquête 2022 ¹⁶
Consommation en eau	t/Nm ³ air traité	0,000005	0,000005	0,000005	0,000005	QUANTIS – ENEA Consulting (2017) ³⁷
Consommation de biofiltre	kg/t de mix de substrat	8,5	8,5	0,2	0,6	<u>Filière AA et AT</u> QUANTIS – ENEA Consulting (2017) ³⁷ <u>Filière IT et BD :</u> GRDF, Enquête 2022 ¹⁶
Part d'air traité par biofiltre	% air traité	0%	0%	40%	100%	<u>GRDF</u> , Enquête 2022 ¹⁶

4.3.8. Epuration

Les proportions de chaque technologie d'épuration retenues pour les filières AA, AT et IT sont présentées dans le Tableau 24 ci-dessous. Ces données ont été déterminées sur la base des unités de méthanisation réelles répertoriées par les services de GRDF⁶², au 31 décembre 2021. Les proportions sont calculées en fonction des capacités maximales d'injection.

Tableau 24 - Répartition des technologies d'épuration par filières AA, AT et IT

Technologies d'épuration	Filière AA	Filière AT	Filière IT
Epuration par membrane	87,47%	72,72%	70,59%
Epuration par lavage à l'eau	6,44%	3,25%	
Epuration par PSA	6,09%	20,93%	29,41%
Epuration par lavage aux amines		0,67%	
Epuration par cryogénie		2,43%	

4.4. Données et hypothèses de travail spécifiques aux filières biodéchets, ISDND et STEU

4.4.1. Biodéchets

Outre les étapes d'épuration, d'injection dans les réseaux et de combustion du biogaz, communes à chaque filière et décrites en section 4.2, d'autres étapes sont, quant à elles, propres à la filière Biodéchets. Le développement du biométhane en injection dans la filière Déchets ménagers avec tri à la source conduit

⁶² GRDF, Données internes sur les projets de méthanisation, 2021

à l'ajout des impacts liés au prétraitement des substrats, à la méthanisation et à la valorisation du digestat associé.

Potentiel méthanogène et composition du biogaz

L'Erreur ! Source du renvoi introuvable. détaille les caractéristiques des substrats et des mix d'intrants : teneur en matière sèche, teneur en matière organique, potentiel méthanogène, production de biogaz, taux de CH₄, production de CH₄ et teneur en azote, phosphore et potasse.

Le Tableau 25 décrit le potentiel de production de biogaz et de biométhane pour la filière Biodéchets, et le Tableau 26 la composition du biogaz.

Tableau 25 - Potentiel de production de biogaz et de biométhane pour la filière Biodéchets

Filière	Potentiel de biogaz (Nm ³ /t MB)	Production de CH ₄ (Nm ³ CH ₄ /t MB)	Sources
Biodéchets	147,7	95,1	Calcul grâce aux BMP de Méthasim

Le taux d'expression du potentiel méthanogène considéré est de 100%.

Tableau 26 - Composition du biogaz brut pour la filière Biodéchets

Composition du BIOGAZ	Unité	Filière Biodéchets	Source
CH ₄	%vol.	64 %	Méthasim
CO ₂	%vol.	33 %	Calcul par soustraction
H ₂ O	%vol.	3%	Hypothèse fixée. La bibliographie donne des valeurs de 0 à 6%
H ₂ S	%vol.	0,03 %	Donnée ancienne étude ADEME, GDF, 2006 ⁶³
NH ₃	%vol.	0,0004%	Donnée ancienne étude - INERIS, 2002 ⁶⁴
CO	%vol.	0,0008%	Donnée ancienne étude - ADEME, GDF, 2006 ⁶³

Transport des déchets ménagers vers les centres de prétraitement et méthanisation

L'ensemble des biodéchets entrants dans la filière Biodéchets sont prétraités avant d'être méthanisés. Les biodéchets sont transportés vers les centres de prétraitement et de méthanisation. Le modèle fait l'hypothèse d'un transport par camion (PTAC 19 t) sur une distance de 20 km supplémentaire. Il est supposé que les étapes de prétraitement et de méthanisation se situent sur le même site.

Prétraitement des substrats et méthanisation

Les espaces de réception et stockage des intrants sont équipés d'un système de traitement de l'air destiné à capter les odeurs des intrants. Le captage d'air vicié est une question d'aérodynamique complexe. Les installations industrielles mettant en œuvre du captage d'air rencontrent régulièrement des problèmes d'efficacité de captage, notamment lorsqu'il s'agit d'un hall où des portes sont régulièrement ouvertes.

⁶³ ADEME - Gaz de France, Etude technico-économique d'opérations biogaz carburant en Europe, 2006.

⁶⁴ INERIS, Caractérisation des biogaz ; bibliographie et mesures sur sites, 2002.

C'est le cas récurrent des installations de déchets présentant un hall de réception ouvert provoquant une efficacité amoindrie du captage. La quantité d'air traitée peut ainsi varier entre 50 et 374 m³ d'air traité par Nm³ de biogaz produit⁶⁵. Dans la présente étude, une valeur majorante de 374 m³ d'air traité / Nm³ de biogaz a été utilisée, en supposant que 100% du biogaz capté est valorisé.

Les airs viciés sont ainsi collectés et traités par un laveur acido-basique suivi d'un biofiltre.

Le modèle considère les consommations types suivantes pour le laveur acido-basique :

- Solution de H₂SO₄ à 96% : 0,012 g /Nm³ d'air traité ;
- Solution de NaOCl à 48% : 0,022 g /Nm³ d'air traité ;
- Solution de NaOH à 30% : 0,16 g /Nm³ d'air traité.

Dans le cas du traitement de l'air par biofiltre, les consommations types sont les suivantes :

- Consommation en eau : 0,000005 m³/Nm³ d'air traité⁶⁶;
- Consommation en biofiltre : 8,5 kg/t biodéchets, incinérés après usage⁶⁷.

Les biodéchets subissent un prétraitement avant la méthanisation : affinage du tri (élimination des résidus) et broyage. Ces étapes consomment de l'électricité : environ 4 kWh/t Biodéchets pour un trommel et 10 kWh/t Biodéchets pour un broyeur⁶⁸.

Par ailleurs, nous considérons également dans cette étude que les biodéchets subissent une étape d'hygiénisation. Dans les anciennes études ACV sur le biométhane, cette étape n'avait pas été prise en compte. Ainsi, les mêmes hypothèses de consommation énergétique que pour la filière IT ont été considérées : une consommation électrique de 7 kWh/t et une consommation thermique estimée à 50 kWh th/t.

Concernant la méthanisation, une consommation de chaleur et d'électricité est nécessaire. Une partie du biogaz obtenu permet de produire de la chaleur qui est autoconsommée sur le site pour chauffer le réacteur de méthanisation. La quantité de biogaz autoconsommé correspond à environ 8% du biogaz produit⁶⁹. La consommation d'électricité pour le brassage (non continu) est de l'ordre de 5,1 kWh/t de substrat⁷⁰.

Des émissions fugitives de biogaz de 0,5% sur le digesteur sont prises en compte et 4,1%¹⁶ du biogaz est considéré envoyé en torchère, conformément aux hypothèses présentées en section 4.2.3.

Enfin, la méthanisation produit environ entre 664 et 850 kg de digestat par tonne de biodéchets traitée⁷¹; la valeur retenue dans le modèle est de 848 kg de digestat par tonne de biodéchets traitée.

Epuraton

Pour l'étape d'épuration, le mix de technologies considéré pour la conversion du biogaz en biométhane en 2023 est le suivant :

- 77,82 % d'épuration membranaire

⁶⁵ AMORCE, Méthanisation des déchets ménagers - Etat des lieux - juin 2013, 2013.

⁶⁶ Commission Européenne – MEEDDM, BREF - Traitement des déchets, 2006

⁶⁷ Afval Overleg Orgaan, MilieuEffectRapport - Landelijk AfvalBeheerPlan 2002-12 - Achtergronddocument A14 - uitwerking "GFT afval", Nederlands, 2002

⁶⁸ ENEA Consulting, Retours d'expérience, consultations d'experts et base de données interne, 2014.

⁶⁹ ADEME – GDF, Analyse du Cycle de Vie des modes de valorisation énergétique du biogaz issu de méthanisation de la Fraction Fermentescible des Ordures Ménagères collectée sélectivement en France. RDC-Environnement, pour le compte de ADEME-GDF. Rapport final, 2007.

⁷⁰ Hypothèse évaluée d'après ReX GRDF, 2016.

- 22,18 % d'épuration par lavage à l'eau

Ces données ont été déterminées sur la base des unités réelles répertoriées par les services de GRDF⁶², au 31 décembre 2021. Les proportions sont calculées en fonction des capacités maximales d'injection.

4.4.2. ISDND

Composition du biogaz

Pour cette filière, nous nous intéressons uniquement aux impacts du biogaz capté. Les autres étapes en amont ne sont pas prises en compte.

La composition de biogaz brut qui a été retenue dans le cadre de la modélisation est indiquée dans le Tableau 27. Les valeurs retenues dans le modèle sont indiquées pour les GES considérés dans l'étude. Par ailleurs, rappelons que dans le cas des ISDND, la quantité et la composition du biogaz produit évoluent au cours de la vie de l'ISDND.

Tableau 27 - Composition du biogaz brut pour la filière ISDND

Composition du BIOGAZ	Unité	Filière ISDND	Source
CH ₄	%vol.	53	Guide des canalisations de transport de GN, 2013 ⁷¹
CO ₂	%vol.	32	Guide des canalisations de transport de GN, 2013 ⁷¹
H ₂ O	%vol.	8	Guide des canalisations de transport de GN, 2013 ⁷¹
H ₂ S	%vol.	0,2206	Guide des canalisations de transport de GN, 2013 ⁷¹
NH ₃	%vol.	NA	NA
CO	%vol.	0,0006	Guide des canalisations de transport de GN, 2013 ⁷¹
N ₂	%vol.	2	Guide des canalisations de transport de GN, 2013 ⁷¹
H ₂	%vol.	4	Guide des canalisations de transport de GN, 2013 ⁷¹
O ₂	%vol.	1	Guide des canalisations de transport de GN, 2013 ⁷¹

Epuration

Pour l'étape d'épuration, le mix de technologies considéré pour la conversion du biogaz en biométhane en 2023 est le suivant :

- 18,49 % d'épuration membranaire
- 81,51 % d'épuration par cryogénie

Ces données ont été déterminées sur la base des unités réelles répertoriées par les services de GRDF⁶², au 31 décembre 2021. Les proportions sont calculées en fonction des capacités maximales d'injection.

L'utilisation importante de la cryogénie s'explique par le fait que cette technologie soit plus performante en termes d'atteinte des spécifications d'injection au vu des quantités importantes d'O₂ et de N₂ dans le biogaz produit par les ISDND. De plus, aucun prétraitement n'est nécessaire.

Cette étape d'épuration du biogaz, ainsi que celles de l'injection dans les réseaux et de combustion, communes aux différentes filières, sont décrites en section 4.2.

⁷¹ ATEE-Club biogaz, Guide professionnel applicable aux canalisations de transport de gaz de biomasse non épuré, 2013

4.4.3. STEU

Comme présenté plus haut dans ce rapport, les STEU ne sont pas construites dans l'objectif de valoriser du biogaz. Dans le cadre de la modélisation, ce dernier est considéré comme ayant un statut de déchet : produit fatal du traitement des boues dans une STEU, sans valeur immédiate et avec une charge environnementale nulle.

Composition du biogaz

La composition de biogaz brut qui a été retenue dans le cadre de la modélisation est indiquée dans le Tableau 28. Les valeurs retenues dans le modèle sont indiquées pour les GES considérés dans l'étude.

Tableau 28 - Compositions des biogaz bruts pour la filière STEU

Composition du BIOGAZ	Unité	Filière STEU	Sources
CH ₄	%vol.	61	Guide des canalisations de transport de GN, 2013 ⁷²
CO ₂	%vol.	26,6985	Hypothèse
H ₂ O	%vol.	8	Hypothèse
H ₂ S	%vol.	0,2206	Guide des canalisations de transport de GN, 2013 ⁷¹
NH ₃	%vol.	NA	NA
CO	%vol.	0,0022	Guide des canalisations de transport de GN, 2013 ⁷¹
N ₂	%vol.	3	Guide des canalisations de transport de GN, 2013 ⁷¹
H ₂	%vol.	0	Guide des canalisations de transport de GN, 2013 ⁷¹
O ₂	%vol.	1,30	Guide des canalisations de transport de GN, 2013 ⁷¹

Epuraton

Pour l'étape d'épuration, le mix de technologie considéré pour la conversion du biogaz en biométhane est le suivant :

- 94,51 % d'épuration membranaire
- 5,49 % d'épuration PSA

Ces données ont été déterminées sur la base des unités réelles répertoriées par les services de GRDF⁶², au 31 décembre 2021. Les proportions sont calculées en fonction des capacités maximales d'injection. Cette étape d'épuration du biogaz, ainsi que celles de l'injection dans les réseaux et de combustion, communes aux différentes filières, sont décrites en section 4.2.

⁷² ATEE-Club biogaz, Guide professionnel applicable aux canalisations de transport de gaz de biomasse non épuré, 2013

4.5. Facteurs d'allocation : données économiques, physiques et énergétiques

Pour rappel, la méthode par allocation économique est détaillée dans la partie 2.2. Il s'agit d'une part, de définir les quantités de produits, co-produits ou services existants, et d'autre part de déterminer la valeur économique de ces différents produits ou services.

Pour rappel, 100% des impacts sont alloués au biométhane dans le cas de la filière STEU. En effet, comme mentionné au paragraphe 3.6.2, la méthanisation et le traitement du digestat sont propres au fonctionnement de la filière STEU et ne sont donc pas intégrés dans le périmètre d'étude. Seuls les impacts de l'épuration et de l'injection sont pris en compte.

4.5.1. Données économiques

Prix d'achat du biométhane

Les prix d'achats du biométhane sont détaillés dans le Tableau 29 ci-dessous, et sont spécifiques à chaque filière. Les tarifs d'achats du biométhane sont fixés à partir de la Cmax ou de la production prévisionnelle annuelle calculée elle aussi à partir de la Cmax selon les arrêtés du 23 novembre 2011²¹, 23 novembre 2020²², 13 décembre 2021²³ et 10 juin 2023⁶¹ fixant les conditions d'achat du biométhane injecté dans les réseaux de gaz naturel. Les tarifs utilisés dans l'étude sont ceux de l'arrêté du 23 novembre 2011 et sont calculés à partir du calculateur des tarifs d'achats du biométhane injecté dans les réseaux de gaz naturel produit par l'ATEE⁷³ (Association Technique Energie Environnement) en utilisant la Cmax.

⁷³ ATEE, Club biogaz, « Calculateur des tarifs d'achats du biométhane injecté dans les réseaux de gaz naturel » - fichier Excel, 2021

Tableau 29 - Prix d'achats du biométhane par filière

Filières	Unité	Valeur	Source
AA	Centimes €/kWh PCS livré	109,86	Tarif 2011, avec « date de signature du contrat d'achat du biométhane » 01/01/2019, d'après le calculateur de l'ATEE ⁷³ Donnée Cmax = 172,3 ⁷⁴ , proportion P2 = 94%
AT	Centimes €/kWh PCS livré	100,65	Tarif 2011, avec « date de signature du contrat d'achat du biométhane » 01/01/2019 d'après le calculateur de l'ATEE ⁷³ Donnée Cmax = 227,1 ⁷⁴ , proportion P2 = 89%
IT	Centimes €/kWh PCS livré	89,20	D'après unité de Biovilleneuveois ³⁶
Biodéchets	Centimes €/kWh PCS livré	70,00	D'après étude QUANTIS - ENEA Consulting 2020 ⁷⁵ : valeur moyenne des sites interviewés avec valorisation en biométhane
ISDND et STEU	Centimes €/kWh PCS livré	Non concerné	Non concerné car aucun coproduit n'est considéré dans le système. 100% des impacts de l'épuration/injection/combustion sont alloués au biométhane.

Prix du digestat

Pour les filières AA, AT et IT, le prix du digestat correspond à un prix de prestation de mise à disposition de digestat, additionné à la valeur économique des unités fertilisantes (N, P₂O₅ et K) du digestat.

Pour la filière Biodéchets, la valeur économique du digestat a été reprise de l'étude précédente⁷ et correspond à une prestation d'épandage.

Les filières ISDND et STEU ne sont pas concernées (pas de production de digestat pour la filière ISDND ; la filière STEU produit du digestat mais il ne rentre pas dans le périmètre de l'étude comme mentionné dans le paragraphe 3.6.2).

Le Tableau 30 ci-dessous détaille les prix des prestations d'épandage retenus.

⁷⁴ Syndicat des énergies renouvelables, GRDF, GRTgaz, SPEGNN, Teréga, Panorama des gaz renouvelables en 2021

⁷⁵ QUANTIS – ENEA Consulting, Evaluation des impacts GES de l'injection du biométhane dans le réseau de gaz naturel en appliquant une approche d'allocation, 2020.

Tableau 30 - Prix de prestation de mise à disposition de digestat par filière

Filières	Unité	Valeur	Source
AA, AT et IT	€/t de digestat	6,4	D'après l'étude QUANTIS – ENEA Consulting 2020 ⁷⁵ , sur la base du REX ENEA et des entretiens menés avec les agriculteurs exploitants
Biodéchets	€/t de digestat	1,8	D'après l'étude QUANTIS – ENEA Consulting 2020 ⁷⁵ , moyenne sur les unités contactées disposant d'une unité de méthanisation

Le Tableau 31 ci-dessous détaille les prix des unités fertilisantes retenus, pour l'azote, le phosphore et la potasse.

Le Tableau 32 présente les valeurs ayant permis de calculer le prix total de la valeur fertilisante (N, P₂O₅ et K) par tonne de digestat.

Enfin, le Tableau 33 présente le prix total final attribué au digestat, par filière.

Tableau 31 - Prix des unités fertilisantes

€/kg	Azote N 31%*	Super Phosphate P 46%	Chlorure K 60%
Prix unitaires année 2022 (CER France)	2,76	2,30	1,42
Prix unitaires lissés sur 5 ans en France avec 2022 (CER France)	1,13	1,10	0,70
Prix unitaires lissés sur 5 ans en France sans 2022 (CER France)	0,70	0,77	0,51
Prix engrais retenu pour l'étude Moyenne entre le Prix unitaire 2022 et le Prix unitaire lissés sur 5 ans sans 2022 (proposition de l'AAMF)	1,73	1,54	0,97

*Panachage de différentes formes d'azote à raison de 64% d'ammonitrate 27% et 36% de solution azotée 39%.

Tableau 32 - Quantité et prix des unités fertilisantes par tonne de digestat

	Filière	Unité	N assimilable	P ₂ O ₅	K	Total
Quantité d'unité fertilisante par tonne de digestat <i>= calculé à partir du mix d'intrants</i>	AA	kg d'unité fertilisante/t de digestat	3,65	2,52	5,66	
	AT	kg d'unité fertilisante/t de digestat	4,19	2,82	5,24	
	IT	kg d'unité fertilisante/t de digestat	3,33	3,27	3,19	
Prix par valeur fertilisante par tonne de digestat <i>= prix de l'unité × quantité d'unité par tonne de digestat</i>	AA	€/t de digestat	6,31	3,88	5,49	
	AT	€/t de digestat	7,26	4,34	5,08	
	IT	€/t de digestat	5,76	5,03	3,09	
Prix total de la valeur fertilisante NPK par tonne de digestat <i>= somme du prix des valeurs fertilisantes N, P₂O₅, K par tonne de digestat</i>	AA	€/t de digestat				15,68
	AT	€/t de digestat				16,67
	IT	€/t de digestat				13,88

Tableau 33 - Données économiques retenues pour le digestat

Filières	Unité	Valeur	Source
AA	€/t de digestat	22,08	Prix de prestation de mise à disposition de digestat additionné à la valeur économique des unités fertilisantes du digestat
AT	€/t de digestat	23,07	Prix de prestation de mise à disposition de digestat additionné à la valeur économique des unités fertilisantes du digestat
IT	€/t de digestat	20,28	Prix de prestation de mise à disposition de digestat additionné à la valeur économique des unités fertilisantes du digestat
Biodéchets	€/t de digestat	1,8	D'après étude QUANTIS – ENEA Consulting 2020 ⁷⁵
ISDND et STEU	€/t de digestat	0	Non concernées (pas de production de digestat pour la filière ISDND ; la filière STEU produit du digestat mais il ne rentre pas dans le périmètre de l'étude)

Prix des redevances déchets

Les prix des redevances déchets sont détaillés dans le Tableau 34 ci-dessous.

Tableau 34 - Prix des redevances déchets

Filières	Unité	Valeur	Source
AA, AT et IT	€/t de déchets	15,4	D'après étude QUANTIS – ENEA Consulting 2020 ⁷⁵
Biodéchets	€/t de déchets	60	D'après étude QUANTIS – ENEA Consulting 2020 ⁷⁵ , moyenne de 12 unités (incluant le coût d'exploitation et le coût du financement)

Prix du dioxyde de carbone (off-gaz)

L'objet de l'étude est de calculer les impacts du parc en exploitation à fin 2021. Pour l'allocation économique, il est estimé que le marché de vente du CO₂ n'étant pas encore assez mature, cette fonction économique est exclue. Il n'y pas d'allocation économique des impacts sur le CO₂.

4.5.2. Données de flux physiques

Les données de flux physiques sont détaillées dans le Tableau 35. Ce sont des données calculées grâce à différents bilans :

- *Quantité de biométhane injecté (kWh de biométhane PCI injecté/t de substrat) = <Pouvoir méthanogène du mix d'intrants> – <Pertes digesteur> – <Envoi en torchère> – <Autoconsommation> - <Pertes à l'épuration> – <Pertes à l'injection>*
- *Quantité de digestat (t digestat/t substrat) = <Tonne d'intrant> – <Masse du biogaz produit par tonne de substrat*>*
- *<Quantité de déchets traités (t de déchets/t de substrat)> = <(Masse des déchets IAA + Masse biodéchets + Masse des boues) par t de substrat>*

*La masse de biogaz produit par tonne de substrat est calculée à partir des masses volumiques des gaz qui composent le biogaz, soit la masse volumique du CH₄ par Nm³ (0,67 kg/Nm³ de CH₄) et celle du CO₂ par Nm³ (1,87 kg/Nm³ de CO₂).

Tableau 35 - Données volumiques ou massiques

Quantités	Unités	AA	AT	IT	Biodéchets	ISDND et STEU
Quantité de biométhane	kWh de biométhane PCI injecté/t de substrat	654	816	732	880	Non concerné
Quantité de digestat	t digestat/t substrat	0,895	0,863	0,898	0,848	
Quantité de déchets traités (déchets IAA, biodéchets, boues)	t de déchets/t de substrat	0,09	0,25	0,63	1,00	

4.5.3. Facteurs d'allocation économique

Les facteurs d'allocations calculés sont détaillés par filière du Tableau 36 au Tableau 40. Trois types de facteurs d'allocation sont distingués.

Tout d'abord, un premier facteur est appliqué sur les étapes de productions agricoles, pour les filières utilisant des CIVE et des cultures dédiées, c'est-à-dire les filières AA et AT. Ce facteur permet de répartir les impacts de ces productions végétales entre le biométhane et le digestat.

Ensuite, un deuxième facteur d'allocation est calculé pour toutes les étapes depuis le transport des intrants jusqu'à la sortie du digesteur. Il s'agit ainsi de répartir les impacts entre la production de biométhane, la production de digestat composé de matières fertilisantes en NPK et la fonction de traitement de déchet (pour lesquels une redevance est perçue).

Enfin, pour les étapes d'épuration, d'injection, de distribution et de consommation, 100% des impacts sont alloués au biométhane puisqu'il s'agit du le seul produit considéré.

Aucune allocation n'est faite sur la production de biogaz, c'est une étape intermédiaire à la production de biométhane.

Aucune allocation n'est faite sur le CO₂, il est produit mais n'est pas valorisé.

Tableau 36 - Facteurs d'allocation économique pour la filière Agricole Autonome

AA	Productions agricoles	Transport des intrants, stockage, prétraitement, méthanisation, torchage, traitement de l'air	Epuration, injection, distribution et consommation
Allocation biométhane	79,8%	78,7%	100,0%
Allocation digestat	20,2%	19,9%	NC
Allocation off-gaz	0%	0%	NC
Allocation traitement des déchets	NC	1,3%	NC
TOTAL	100%	100%	100%

NC : Non concerné

Tableau 37 - Facteurs d'allocation économique pour la filière Agricole Territorial

AT	Productions agricoles	Transport des intrants, stockage, prétraitement, méthanisation, torchage, traitement de l'air	Epuration, injection, distribution et consommation
Allocation biométhane	81,8%	79,0%	100,0%
Allocation digestat	18,2%	17,6%	NC
Allocation off gaz	0,0%	0,0%	NC
Allocation traitement des déchets	NC	3,4%	NC
TOTAL	100%	100%	100%

NC : Non concerné

Tableau 38 - Facteurs d'allocation économique pour la filière Industriel Territorial

IT	Transport des intrants, stockage, prétraitement, méthanisation, torchage, traitement de l'air	Epuration, injection, distribution et consommation
Allocation biométhane	71,8%	100,0%
Allocation digestat	18,4%	NC
Allocation off gaz	0,0%	NC
Allocation traitement des déchets	9,8%	NC
TOTAL	100%	100%

NC : Non concerné

Tableau 39 - Facteurs d'allocation économique pour la filière Biodéchets

Biodéchets	Transport des intrants, stockage, prétraitement, méthanisation, torchage, traitement de l'air	Epuration, injection, distribution et consommation
Allocation biométhane	52,1%	100,0%
Allocation digestat	1,2%	NC
Allocation off gaz	0,0%	NC
Allocation traitement des déchets	46,7%	NC
TOTAL	100%	100%

NC : Non concerné

Tableau 40 - Facteurs d'allocation économique pour les filières ISDND et STEU

STEU et ISDND	Epuration, injection, distribution et consommation
----------------------	--

Allocation biométhane	100%
Allocation digestat	NC
Allocation off gaz	
Allocation traitement des déchets	
<i>TOTAL</i>	<i>100%</i>

NC : Non concerné

5. Méthode par extension de frontière et substitution, données spécifiques

Le calcul de l'impact de la filière biométhane est d'abord construit autour d'une première ACV multicritères avec la méthode d'allocation économique afin de répondre aux exigences d'intégration des données dans la Base Empreinte et dans la Base INIES. Cette première approche rend compte des impacts induits de la filière mais exclut les impacts évités.

Ensuite, dans une seconde partie est réalisée une ACV basée sur la méthode par substitution avec extension de frontière pour mesurer à la fois l'ensemble des impacts liés au procédé de méthanisation ainsi que les impacts évités par la filière biométhane.

5.1. Principe et périmètre de la méthode de l'extension de frontière et de la substitution

L'approche sans allocation par extension des frontières et substitution permet de prendre en compte les bénéfices de la filière biométhane en France.

Il s'agit de calculer l'ensemble des impacts « induits » par la méthanisation, notamment grâce à l'extension des frontières du système pour intégrer toutes les fonctions de la méthanisation. Ensuite, il s'agit de calculer les impacts « évités » grâce à la production de biométhane et de les soustraire à l'ensemble des impacts induits. Pour calculer ces impacts évités, il faut identifier le produit ou le service le plus courant sur le marché qui aurait été mis en place si la méthanisation n'avait pas de fonctions secondaires, puis mesurer les impacts de ces produits ou de ces services et enfin les soustraire à l'ensemble des impacts induits par la production de biométhane.

Dans le cadre de cette étude, l'extension de frontière consiste à considérer toutes les étapes de la méthanisation et de l'amont des substrats à 100% et de prendre en compte les étapes de la valorisation agronomique du digestat, à savoir le traitement, le stockage, le transport et l'épandage du digestat (Tableau 41). Prendre en compte l'ensemble de ces émissions revient à analyser l'unité fonctionnelle suivante : « la production de X kWh de biométhane associée au traitement de a kg de déchets verts, b kg de déchets IAA, c kg de fumier/lisier et associée à la production et utilisation de d kg d'Azote fertilisant, de e kg de Phosphore fertilisant et de f kg de Potassium fertilisant, etc. ». Afin de revenir à l'unité fonctionnelle du kWh de biométhane produit, il s'agit de soustraire les impacts :

- Liés à la fonction de traitement de déchets, *i.e.* le traitement des fumiers, lisiers, déchets verts, déchets IAA etc.
- Liés à la fonction de production et utilisation de fertilisants représentatifs du marché moyen N, P et K.

Une précision est faite que les impacts évités liés à la production des off-gaz ne sont ici pas pris en compte. En effet, la valorisation de ces derniers n'est aujourd'hui pas assez mature pour considérer des impacts évités. Toutefois, à l'avenir, l'impact environnemental des produits que viendraient remplacer le CO₂ biogénique issu de la méthanisation pourra être approfondi.

La Figure 17 schématise le périmètre de la méthode par extension de frontière et substitution employée pour cette étude.

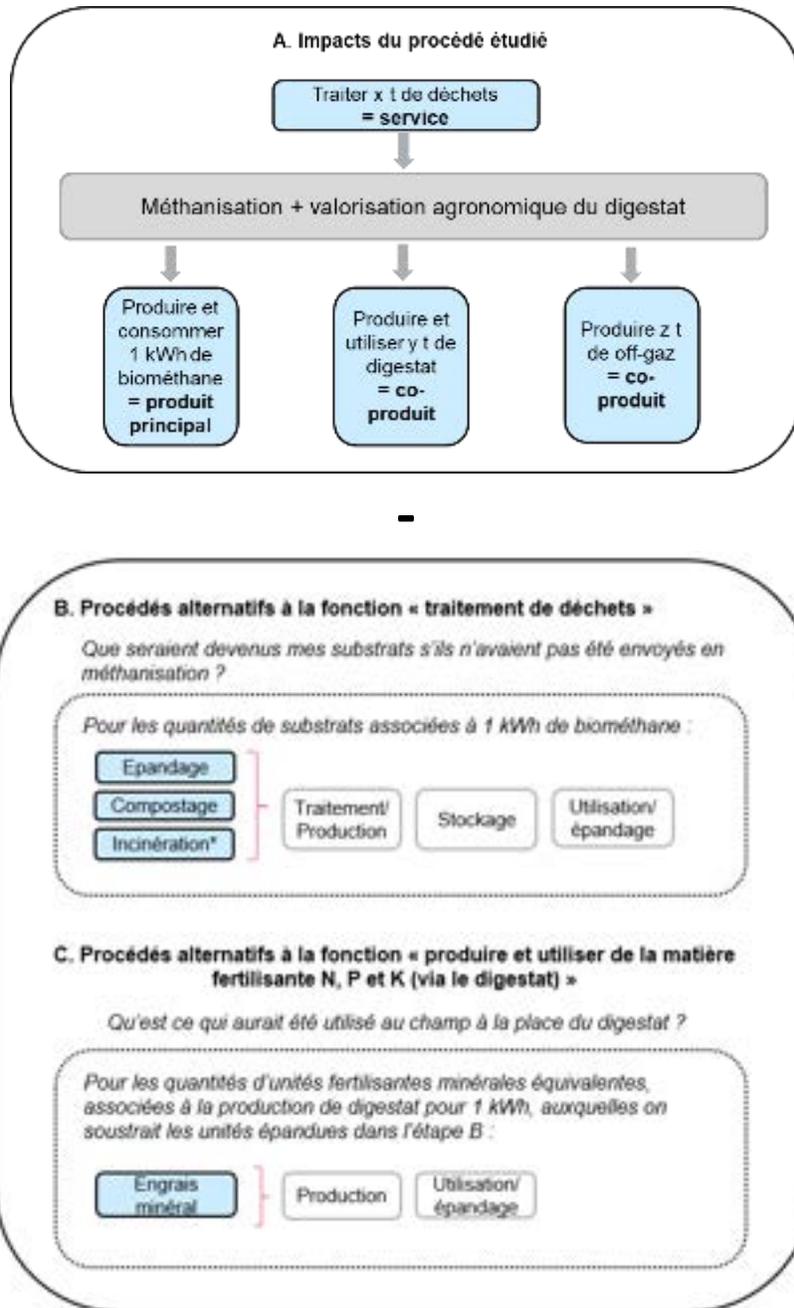
La méthode par extension de frontière et substitution a été appliquée aux filières AA, AT, IT.

Tableau 41 - Synthèse des étapes prises en compte dans la méthode par extension de frontière et par substitution

EXTENSION DE FRONTIERE	
Impacts induits par la valorisation agronomique du digestat	Traitement du digestat
	Stockage du digestat
	Transport du digestat
	Épandage du digestat
IMPACTS EVITES	
Impacts évités grâce à la fonction traitement de déchets	Emissions au stockage des effluents (lisier et fumier)
	Emissions à l'épandage des effluents (lisier et fumier)
	Emissions à la fabrication des composts
	Emissions à l'épandage des composts
	Emissions à l'incinération des déchets
	Consommation d'énergie non évitée par l'incinération
Autres impacts évités	Emissions liées aux résidus de culture laissés au champ
	Emissions liées à l'épandage des boues
Procédés alternatifs à la fonction « Produire du digestat utilisé comme un fertilisant »	Fabrication des engrais minéraux substitués <i>(Quantité substituée = Equivalence digestat – Equivalence effluents, compost, boues et résidus de culture)</i>
	Emissions au champ à l'épandage des engrais minéraux substitués

Impacts du biométhane = $A - (x*B + y*C)$

Avec x tonnes de déchets et y tonnes de digestat



* Il est considéré que l'incinération avec valorisation énergétique permet d'éviter de consommer de l'énergie (gaz naturel et électricité). La méthanisation permet « d'éviter » de consommer cette énergie, donc un impact positif supplémentaire de « consommation d'énergie non évitée par l'incinération » est considéré.

Figure 17 - Schéma de la méthode par extension de frontière et substitution, appliquée à la filière biométhane

5.2. Extension de frontière : valorisation agronomique du digestat

5.2.1. Valorisation agronomique du digestat pour les filières AA, AT et IT

Séparation de phases

Le digestat en sortie de digesteur se présente sous une forme brute, c'est un digestat non traité. Etant donné que les types de méthaniseur pour les trois filières AA, AT et IT sont par voie liquide, le digestat brut peut ensuite nécessiter une séparation de phase. Cette dernière s'effectue à travers une presse à vis⁷⁶, dont l'objectif est de séparer la phase liquide de la phase solide du digestat brut : 62% du digestat subit une séparation de phase, et 38% du digestat reste sous forme brute²⁴. Lors de la séparation de phase, l'hypothèse est faite que 20% de la masse du digestat est sous forme solide et 80% sous forme liquide¹⁹. Ces proportions sont utilisées dans le cadre du calcul du bilan azoté, du digestat moyen et des émissions à l'épandage.

Au cours de la séparation de phase, la quantité d'azote total se répartit différemment entre la phase solide et liquide du digestat. Il aura majoritairement tendance à se trouver en phase liquide à hauteur de 86%, tandis que la phase solide en contiendra 14%⁷⁷.

Stockage du digestat

Les digestats en sortie de méthaniseur ou de presse à vis doivent être stockés dans des fosses. Il est ici considéré un stockage couvert de 180 jours (donnée issue du tableau 4 p.40 de l'étude INRAE Transfert, 2021¹⁹), qui permet de limiter fortement les émissions vers l'atmosphère. Cette donnée est cohérente avec les résultats de l'enquête menée par GRDF à l'automne 2022¹⁶. Par conséquent, un facteur d'abattement de 80% est ensuite appliqué aux émissions au stockage⁹⁷.

Pour chaque type de digestat sont calculées les émissions au stockage. Le Tableau 42 répertorie les facteurs d'émissions liés à un stockage non couvert de 180 jours des digestats. Les facteurs d'émissions affiliés au digestat liquide et solide sont respectivement ceux du lisier et du fumier³⁷. Le digestat brut est considéré comme une matière fertilisante liquide⁷⁸ : pour calculer ses émissions, les mêmes facteurs d'émissions que ceux du digestat liquide sont utilisés.

Tableau 42 - Facteurs d'émissions (sans application du facteur d'abattement) lors du stockage des digestats bruts, liquides et solides pour 180 jours.

Emissions au stockage	Digestat brut	Digestat liquide	Digestat solide
N_NH ₃ (% TAN*)	10% de Ntot ^{**19}	10% de Ntot ^{**19}	10% de Ntot ^{**19}
N_NO _x (% TAN*)	0% ¹⁹	0% ¹⁹	0% ¹⁹
N_N ₂ O direct (% N)	0% ⁵⁶	0% ⁵⁶	2% ¹⁹
CH ₄	2% du biogaz produit ¹⁹	2% du biogaz produit ¹⁹	2% du biogaz produit ¹⁹

*TAN : Azote ammoniacal, (Total Ammonia Nitrogen) ;

**Ntot : Azote total ;

⁷⁶ ADEME, 2020. Suivi technique, économique, et social de 10 installations de méthanisation

⁷⁷ ADEME, Qualité agronomique et sanitaire des digestats, 2011

⁷⁸ [AILE, Valdipro – Digestat brut \(Méthanisation en voie liquide\)](#)

Aucun système de récupération de biogaz n'est considéré pour les filières AA et AT. Une exception est cependant faite pour le stockage du digestat dans la filière IT¹⁶ : la totalité des émissions de biogaz (soit 100%) à cette étape est récupérée et aucune émission à l'atmosphère n'est prise en compte⁷⁹.

Transport du digestat

Le transport pour tous les types de digestat a été modélisé sur une distance de 10 km entre la ferme et la zone d'épandage (en accord avec les distances utilisées dans les précédentes ACV réalisées par QUANTIS – ENEA Consulting⁹, l'ACV du biométhane de l'INRAE¹⁹ et l'Observation régionale de la méthanisation Grand Est²⁸), avec un camion d'une capacité de stockage de 30 m³.

Epandage du digestat

Emissions au champ

Lors de l'épandage, les matières fertilisantes organiques tout comme minérales libèrent des gaz à effet de serre en particulier liés à l'azote qu'ils contiennent. Cet azote est émis directement sous forme de N₂O et indirectement au travers du lessivage et de la volatilisation. En effet, les différentes formes de l'azote subissent des transformations par les microorganismes du sol. Ainsi, une partie des NO_x et NH₃ seront transformés en N₂O : ce sont les émissions indirectes de N₂O par la volatilisation. En outre, les nitrates participent aussi indirectement aux émissions de N₂O à travers le lessivage de l'azote. Toutefois, le N₂O n'est pas le seul polluant émis. Des émissions de NH₃ et de NO_x ont également lieu. Le Tableau 43 reprend les facteurs d'émissions de ces différentes molécules.

Tableau 43 - Facteurs d'émissions des digestats à l'épandage

	Emissions au champ	Source
N ₂ O	Emissions directes : 0.6% kg de N-N ₂ O/kg de N appliqué	IPCC 2019 ⁸⁰ , facteur désagrégé, Tier 1
N ₂ O lessivé	Emissions indirectes de N ₂ O : 1,1% kg de N-N ₂ O/kg de NO ₃ ⁻	IPCC 2019 ⁸⁰ , facteur par défaut, Tier 1
N ₂ O volatilisé	Emissions indirectes de N ₂ O : 1% kg de N-N ₂ O/kg de N-NO _x + 1% kg de N-N ₂ O/kg de N-NH ₃	IPCC 2019 ⁸⁰ , facteur par défaut, Tier 1
NO _x	4% kg de NO/kg de N appliqué	EMEP/EEA, 2019b, Tiers 1 ⁸¹
NH ₃	Digestat brut et liquide : 40% du TAN (TAN : 70% de Ntot)	EMEP/EEA, 2019a, Tier 2 ⁵⁴
	Digestat solide : 80% du TAN (TAN : 58% de Ntot)	EMEP/EEA, 2019a, Tier 2 ⁵⁶
NO ₃ ⁻	24% kg de N-NO ₃ ⁻ /kg de N appliqué	IPCC 2019, zone humide, Tier 1 ⁸⁰
Phosphate (rivières)	7,43 g/t de digestat	INRAE Transfert ¹⁹
Phosphate (eaux souterraines)	0,661 g/t de digestat	INRAE Transfert ¹⁹

⁷⁹ DIGES 2, 2009. Application pour le calcul du bilan des émissions de gaz à effet de serre des installations de digestion anaérobie, version 2.0. Guide méthodologique.

⁸⁰ IPCC, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2019

⁸¹ EMEP/EEA, 2019b, 3.D Crop production and agricultural soils

Matériel agricole pour l'épandage des digestats

Chaque type de digestat nécessite un matériel spécifique à l'épandage en raison de ses propriétés physiques. D'ailleurs, selon le matériel utilisé, les émissions au champ peuvent être réduites. Dans le cas d'un digestat solide dont les propriétés se rapprochent d'un fumier de bovin, c'est une charrue avec incorporation dans les 12 heures¹⁹ qui permettra de réduire les émissions à hauteur de 45%. Tandis que pour l'épandage d'un digestat liquide, c'est un pendillard à sabots trainés¹⁹ qui est employé et qui réduit les émissions de 50%. Le digestat brut est quant à lui, considéré comme une matière organique liquide⁸². Il est donc épandu avec le même matériel que le digestat liquide. Le Tableau 44 donne les valeurs des facteurs d'abattement en fonction du matériel d'épandage utilisé.

Tableau 44 - Facteurs d'abattement des émissions de NH₃ en fonction des techniques d'épandage ⁸³

Technique d'épandage	Facteurs d'Abattement
Injection	80%
Pendillard à sabots trainés	50% (valeur utilisée)
Incorporation par charrue immédiate (lisier bovin, porcin)	90%
Incorporation par charrue immédiate (fumier bovin, porcin)	90%
Incorporation par charrue immédiate (volailles, lisier et fumier)	95%
Incorporation par charrue dans les 4h	60%
Incorporation par charrue dans les 12h	45% (valeur utilisée)

Composition en Eléments-Trace Métalliques

Les Eléments-Traces Métalliques (ETM) sont naturellement présents dans les sols et peuvent être absorbés par les plantes. Chaque intrant possède une composition en ETM différente et chaque filière de biométhane utilise des substrats différents dans des proportions variables. En conséquence, la quantité en ETM du mix d'intrants des filières varie, et celle des digestats également. Pour l'épandage de digestat, la réglementation (norme en vigueur : NF U44-051⁸⁴) fixe des seuils en fonction de l'ETM à ne pas dépasser. Ces quantités sont exprimées en mg/kg de matière sèche (MS) et sont présentées dans le Tableau 45.

⁸² [AILE, Valdipro – Digestat brut \(Méthanisation en voie liquide\)](#)

⁸³ [ADEME, 2013. Analyse du potentiel de réduction de 10 actions de réduction des émissions d'ammoniac des élevages français aux horizons 2020 et 2030](#)

⁸⁴ [Satege, Fiche 2 : Seuils réglementaires des normes – NFU 44-051, 2016](#)

Tableau 45 - Valeurs seuils en ETM des épandages de matières organiques fixées par la norme NF U44-051

ETM	Seuil (mg/kg MS)
Arsenic (As)	18
Cadmium (Cd)	3
Chrome (Cr)	120
Mercure (Hg)	2
Nickel (Ni)	60
Plomb (Pb)	180
Sélénium (Se)	12
Cuivre (Cu)	300
Zinc (Zn)	600

La composition en ETM a été calculée en fonction de la proportion de chaque substrat dans le mix et de son taux de MS. Les éléments mesurés sont le cadmium (Cd), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le plomb (Pb), le nickel (Ni), le chrome (Cr) et le mercure (Hg) comme le répertorie Agribalyse 3.0⁸⁵. L'arsenic (As) et le sélénium (Se) ne sont pas déterminés du fait du manque de données pour ces éléments. Les sources bibliographiques proposent des compositions en ETM pour différents intrants, ils sont ensuite rattachés aux substrats des filières de l'étude (Tableau 46).

Tableau 46 - Rattachement des substrats des mix d'intrants de chaque filière aux données de la bibliographie

Substrats	Filières avec le substrat dans leur mix	Rattachement à la bibliographie	Source
Fumier bovin	AA, AT	Fumier de bovins	Agribalyse 3.0 ⁸⁵
Lisier porcin	AA, AT	Lisier porcin	Agribalyse 3.0 ⁸⁵
CIVE	AA, AT	Triticale	Agribalyse 3.0 ⁸⁵
Cultures dédiées (maïs ensilage)	AA, AT	Maïs ensilage	Agribalyse 3.0 ⁸⁵
Résidus de cultures (pailles)	AA, AT, IT	Blé dur - paille	Agribalyse 3.0 ⁸⁵
Boues de STEU	IT	BTU*	ADEME 2011 ⁸⁶
Déchets IAA (hors SPAN)	AA, AT	IAA	ADEME 2011 ⁸⁶
Déchets IAA - SPAN	AT	IAA	ADEME 2011 ⁸⁶
Biodéchets	AT, IT, Biodéchets	Biodéchets – DVH**	ADEME 2011 ⁸⁶
Déchets verts	AA, AT	Biodéchets – DVH**	ADEME 2011 ⁸⁶
Effluents, lisiers, fumiers	IT	DJA***	ADEME 2011 ⁸⁶
SPAN et déchets C3	IT	IAA	ADEME 2011 ⁸⁶
Féculerie / transformation de pomme de terre	IT	IAA	ADEME 2011 ⁸⁶
Amidonnerie	IT	IAA	ADEME 2011 ⁸⁶
Industrie des corps gras végétaux (huile, graisse)	IT	IAA	ADEME 2011 ⁸⁶
Transformation / conserverie des fruits et légumes	IT	IAA	ADEME 2011 ⁸⁶
Papeterie	IT	BTU*	ADEME 2011 ⁸⁶

*BTU : Boues issues du Traitement des eaux Usées urbaines ;

**DVH : Déchets Verts Horticoles ;

***DJA : Déjections Animales en mélange.

⁸⁵ Agribalyse : rapport méthodologique, volet agriculture, 2020

⁸⁶ ADEME, Qualité agronomique et sanitaire des digestats, 2011

La composition en ETM des intrants de la bibliographie est indiquée dans le Tableau 47. Des exceptions sont faites concernant les valeurs du mercure (Hg) et du chrome (Cr) pour les substrats rattachés aux biodéchets – DVH car les données sont inexistantes dans l'étude ADEME 2011. Pour ces deux éléments, les données utilisées sont celles correspondant à la catégorie « Autres ».

Tableau 47 - Composition des intrants en ETM

(mg/kg de MS)	Cu	Zn	Cd	Pb	Hg	Ni	Cr
Fumier de bovins	23,00	119,00	0,30	3,80	0,13	4,40	7,50
Lisier porcin	115,30	746,50	0,21	1,76	0,80	8,60	6,70
Triticale	4,30	28,40	0,10	0,20	0,00	0,20	0,10
Maïs ensilage	5,00	34,50	0,10	1,61	0,01	0,48	0,70
Blé dur - paille	2,50	9,60	0,20	0,60	0,00	0,60	0,70
BTU*	422,55	931,24	1,96	78,43	1,65	30,26	43,71
IAA	353,52	237,13	0,69	10,74	0,14	20,45	36,14
Biodéchets – DVH**	61,68	162,57	0,35	28,34	-	17,91	-
DJA***	105,39	426,72	0,69	12,70	0,092	12,94	23,85
Autres	75,45	286,85	0,62	33,00	0,18	18,85	36,40

*BTU : Boues issues du Traitement des eaux Usées urbaines ;

**DVH : Déchets Verts Horticoles ;

***DJA : Déjections Animales en mélange.

Le Tableau 48 indique la quantité totale d'ETM du digestat selon le mix des filières. La quantité d'ETM est calculée pour un digestat moyen sans distinction de l'état solide ou liquide du digestat.

Tableau 48 - Composition du digestat en ETM par filière

ETM (mg/kg MS)	AA	AT	IT
Cuivre (Cu)	19,26	36,69	53,60
Zinc (Zc)	36,06	45,63	68,93
Cadmium (Cd)	0,08	0,11	0,16
Plomb (Pb)	0,92	2,26	3,66
Mercure (Hg)	0,03	0,04	0,05
Nickel (Ni)	1,46	2,85	3,70
Chrome (Cr)	2,36	5,04	6,42

5.2.2. Cas spécifique pour la filière Biodéchets

Les étapes de valorisation agronomique du digestat de la filière Biodéchets sont des étapes liées à la fonction de traitement de déchets uniquement. En effet, avec ou sans méthanisation, le digestat ou les biodéchets sont compostés. Il est donc supposé que le compost obtenu à partir des biodéchets triés à la source a les mêmes propriétés fertilisantes et nécessite les mêmes infrastructures de valorisation agronomique que le compost de digestat.

Il s'agit certes, d'une hypothèse mais il n'existe à ce jour aucune source publique permettant une modélisation rigoureuse de la différence entre le compost de digestat et le compost de biodéchets.

Peu de données existent dans la littérature concernant la caractérisation des propriétés physico-chimiques et biologiques des digestats. Les faibles données montrent certes, que les digestats présentent des caractéristiques particulières qui ne sont pas complètement comparables à celles d'amendements organiques comme les composts. Cependant, le compostage des digestats est reconnu comme un post-traitement permettant de stabiliser la matière organique du résidu et d'en réduire l'éventuelle phytotoxicité. Mais là encore, les données restent peu nombreuses et non publiques. Une équivalence entre les deux types de composts est stipulée dans cette étude.

Dans cette filière, la valorisation agronomique est donc supposée inchangée entre le système de production du biométhane issu de biodéchets triés à la source et la filière alternative de traitement par compostage direct des biodéchets. Dans les deux cas, les biodéchets sont stockés, compostés et épandus. D'après les règles d'extension des frontières, ces étapes similaires viennent se soustraire et donc s'annuler.

Ainsi, les étapes de stockage du digestat, de compostage et d'épandage du compost de digestat peuvent être sorties du système car ces étapes s'annulent par extension de frontière. Ces étapes sont les mêmes avec méthanisation et valorisation des biodéchets en biométhane ou compostage direct.

5.3. Calculs des impacts évités

5.3.1. Procédés alternatifs à la fonction « traiter des déchets »

L'une des principales fonctions secondaires de la production de biométhane par méthanisation est le traitement des déchets. La méthanisation est une voie de valorisation des déchets qui présente en particulier, l'intérêt de réduire les volumes de ces déchets.

Pour mesurer les impacts évités associés à cette fonction secondaire, il s'agit tout d'abord, de répondre à la question suivante : sur le marché moyen France, que seraient devenus les substrats s'ils n'avaient pas été envoyés en méthanisation ?

A. Scénario de référence : devenir des substrats sans méthanisation

Le

Tableau 49 ci-dessous, détaille les hypothèses du devenir des substrats considérés. Les cultures dédiées et les CIVE ne sont pas concernées car elles ne sont pas considérées comme des déchets et ont été produites dans le but d'être méthanisées. Par ailleurs, par simplification et au vu du faible impact de ce poste, les étapes de transport intermédiaires sont exclues.

Sans la méthanisation, il est considéré que les effluents d'élevage sont stockés 180 jours et épandus.

Par ailleurs, d'après l'étude AMORCE (2019)⁸⁷, les devenirs possibles des boues sont l'épandage, le compostage, la valorisation énergétique (incinération, méthanisation) ou l'envoi dans des ISDND. La filière traditionnelle de recyclage des boues d'épuration est celle de l'épandage agricole. En 2004, cette filière représentait 62% des boues d'épuration en tonne de masse sèche, dont 16% d'épandage de compost. L'incinération avec production d'énergie est une voie de valorisation utilisée dans une moindre mesure, et avec des coûts relativement élevés. Par simplification, l'hypothèse est faite que 75% des boues sont épandues directement et 25% des boues sont compostées.

⁸⁷ AMORCE, 2019. Quelles solutions pour valoriser les boues d'épuration

D'après AGRESTE Primeur (2010)⁸⁸, les devenir possibles des déchets IAA sont similaires à ceux des boues : valorisation énergétique, alimentation animale, épandage, compostage, incinération (sans valorisation énergétique), mise en station d'épuration, ou encore mise en décharge. Ces devenir sont variables en fonction des types de déchets agroalimentaires. Par simplification et en cohérence avec cette étude AGRESTE, l'hypothèse ici faite est que 50% des déchets sont compostés et 50% sont incinérés. Pour les déchets IAA de type SPAN, l'hypothèse est faite que 100% des déchets sont incinérés avec valorisation énergétique, notamment pour des raisons sanitaires.

Tableau 49 - Hypothèse du devenir des substrats - hors méthanisation

Devenir des substrats s'ils n'avaient pas été méthanisés				
Type de substrat	AA	AT	IT	Source
Fumier bovins	100% Stocké et épandu	100% Stocké et épandu	100% Stocké et épandu	Agrosolutions
Lisier porcins	100% Stocké et épandu	100% Stocké et épandu	100% Stocké et épandu	Agrosolutions
Résidus de cultures (pailles)	Laissés au sol	Laissés au sol	Laissés au sol	Agrosolutions
Boues de STEU / boues IAA			75% Epandues 25% Compostées, stockées, épandues	Agrosolutions, AMORCE (2019)
Déchets IAA (hors SPAN)	50% Compostés, stockés, épandus 50% Incinérés avec valorisation énergétique	50% Compostés, stockés, épandus 50% Incinérés avec valorisation énergétique	50% Compostés, stockés, épandus 50% Incinérés avec valorisation énergétique Déchets de féculerie, amidonnerie et transformation fruits et légumes	Agrosolutions, AGRESTE Primeur (2010)
Déchets IAA SPAN (sang, graisses, ...)		100% incinérés avec valorisation énergétique	100% incinérés avec valorisation énergétique (SPAN et graisses végétales)	Agrosolutions, AGRESTE Primeur (2010)
Biodéchets (collectivité,)		100% Compostés et épandus	100% Compostés, et épandus	Agrosolutions, AGRESTE Primeur (2010)

⁸⁸ AGRESTE Primeur, 2010. Une bonne gestion des déchets organiques. Numéro 245 - juillet 2010.
<https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Pri245/primeur245.pdf>

Déchets verts	Compostés, et épandus	Compostés, et épandus		Agrosolutions, AGRESTE Primeur (2010)
Déchets de papeterie			100% incinérés avec valorisation énergétique	Hypothèse (manque de références, hypothèse conservatrice)

B. Calcul des impacts évités liés au stockage des effluents

Pour calculer les émissions au stockage des effluents, les facteurs d'émissions issus du guide de l'EMEP/EEA (2019)⁸⁹ pour les émissions azotées, et le rapport INRA IRSTEA (2013)⁹⁰ pour les émissions de méthane sont utilisés (Tableau 50).

Tableau 50 - Facteurs d'émissions au stockage des effluents

	Unité	Valeur Fumier	Valeur Lisier	Sources
NH ₃	Kg N-NH ₃ /kg N	32% du TAN (TAN = 60% Ntot) Soit 19%	11% du TAN (TAN = 70% de Ntot) Soit 7,7%	EMEP/EEA, 2019a, Tier 2 Tableau 3.9 Fumier: <i>Dairy Cattle solid</i> Lisier: <i>Swine slurry</i>
NO _x	Kg N-NO/kg N	1% du TAN (TAN = 60% Ntot) Soit 0,6%	0,01% du TAN (TAN = 70% de Ntot) 0,007%	EMEP/EEA, 2019a, Tier 2 Tableau 3.10 Fumier: <i>solid</i> Lisier: <i>slurry</i>
N ₂ O	Kg N-N ₂ O/kg N	2%	0%	EMEP/EEA, 2019a, Tier 2 Tableau 3.8 Fumier: <i>Cattle manure heaps, solid</i> Lisier: <i>Pig slurry without natural crust</i>
CH ₄	% du Potentiel méthanogène (BMP)	1,5%	36%	INRA 2013, action 9 Tableau 3 ⁹⁰

Remarque :

Par ailleurs, la méthodologie RED II prend en considération la meilleure gestion des effluents d'élevage en permettant la comptabilisation d'un bonus (réduction d'émissions) dès lors que des effluents d'élevage (lisier, fumier, fientes) sont méthanisés (Annexe RED II VI.B.1.c). Ce bonus s'élève à -45 g CO₂e/MJ d'effluent (ou de -54 kg CO₂e/t de matière fraîche d'effluent suivant l'unité utilisée). La valeur de ce terme est explicitée à la page 59 du rapport du JRC, 2017⁹¹. Elle est principalement basée sur le fait que la méthanisation des effluents d'élevage génère moins d'émissions de méthane que le stockage long terme et l'épandage d'effluents bruts.

⁸⁹ EMEP/EEA, 2019a. 3B Manure Management

⁹⁰ INRA, IRSTEA. (2013). *Action. 9 Développer la méthanisation, et installer des torchères, pour réduire les émissions de CH₄ liées au stockage des effluents d'élevage*. 382–403.

⁹¹ Joint Research Center, 2017. Solid and gaseous bioenergy pathways: input values and GHG emissions. Calculated according to the methodology set in COM(2016) 767 Version 2

C. Calcul des impacts évités liés à l'épandage des effluents

La quantité évitée d'effluents épandus pour 1 kWh de biométhane a été calculée de la manière suivante :

$$[q_épandage] = [r_substrat_kwh] \times [\%inquant] \times [r_épandage]$$

Avec :

[r_substrat_kwh] = quantité de mix d'intrants pour produire 1 kWh de biométhane (t/kwh) ;

[%inquant] = pourcentage de l'inquant dans la ration (%) ;

[r_épandage] = hypothèse du devenir des substrats s'ils n'avaient pas été méthanisés, cf

Tableau 49 (%) ;

[q_épandage] = quantité d'effluent brut n'ayant pas été directement épandu grâce à la production de 1 kWh de biométhane (t).

Les facteurs d'émission considérés pour l'épandage des fumiers et lisiers sont ceux proposés par l'étude de l'INRAE 2021¹⁹, pour les techniques d'épandage les plus courantes (épandeur à fumier et épandage en surface pour les lisiers). L'ensemble des données utilisées sont regroupées dans le Tableau 51 suivant. Concernant les émissions de CH₄, il est à noter que les émissions liées à l'épandage sont de l'ordre de 0,01% et 0,02% du potentiel méthanogène résiduel, et un peu plus importantes pour les fumiers (0,39% du potentiel méthanogène initial) et lisiers (0,26% du potentiel méthanogène initial) que dans le cas du digestat, en raison d'un potentiel méthanogène plus élevé (pas de digestion anaérobie qui permettrait une réduction de la teneur en méthane). Cependant, les émissions en phase d'épandage restent minoritaires par rapport aux émissions pendant la phase de stockage non couvert des fumiers et lisiers.

Tableau 51 - Ensemble des données liées à l'épandage du fumier et du lisier sans méthanisation

Catégorie	Variable	Unité	Lisier	Fumier	Sources
Epandeur	Épandage du fumier	t/h	16	8	INRAE Transfert, 2021 ¹⁹
	Nombre d'heures d'utilisation pour équivalent à 1t	h/t	0,0625	0,125	
Emissions NO, N ₂ O, NH ₃ et CH ₄	Facteur d'émissions NO_ épandage	Kg N-NO/ kg Ntot	4%	4%	EMEP/EEA, 2019b, tiers 1 ⁸¹
	Facteur d'émissions N_N ₂ O _ épandage	Kg N-N ₂ O/ kg Ntot	0,60%	0,60%	IPCC 2019 ⁹²
	Facteur d'émissions N_NH ₃ _ épandage	Kg N-NH ₃ / kg Ntot	14,00%	18,36%	EMEP / EEA, 2019a, Tier2 ⁵⁶ Avec prise en compte du facteur d'abattement (enfouissement pour le fumier et pendillard pour le lisier)
	Facteur d'émissions à l'air CH ₄ _épandage	% potentiel méthanogène	0,26%	0,39%	DIGES, 2009 ⁹³

La teneur en azote des effluents est détaillée dans le Tableau 52.

Tableau 52 - Teneur en azote des effluents

Substrat	Teneur en Azote : Ntot / MB (kg N/t substrat)	Sources
Fumier bovins	5,7	MethaSim
Lisier porcins	4,2	MethaSim

D. Calcul des impacts évités liés à la fabrication des composts :

La quantité de compost évité pour 1 kWh de biométhane a été calculée de la manière suivante :

$$[q_compost] = [r_substrat_kwh] \times [\%intrans] \times [r_compostage]$$

Avec :

[q_compost] = quantité de compost évité grâce à la production de 1 kWh de biométhane (t) ;

[r_substrat_kwh] = quantité de mix d'intrants pour produire 1 kWh de biométhane (t/kwh) ;

[%intrans] = pourcentage de l'intrant dans la ration (%) ;

[r_compostage] = hypothèse du devenir des substrats s'ils n'avaient pas été méthanisés, cf

Tableau 49 (%).

⁹² IPCC. (2019). Chapter 11 - N₂O Emissions From Managed Soils, and CO₂ Emissions From Lime and Urea Application - Refinement. In 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

⁹³ ADEME-CEMAGREF. (2009). DIGES - Digestion anaérobie et Gaz à Effet de Serre - Application pour le calcul du bilan des émissions de gaz à effet de serre des installations de digestion anaérobie - version2.0 - Guide méthodologique.

Par ailleurs, les émissions atmosphériques lors du processus de compostage sont très variables selon les types de biomasse et selon les contextes (2012)⁹⁴. Les données Agribalyse sont des données récentes issues du projet MEFOR (2020) qui permettent de se positionner sur des valeurs d'émissions. Les données utilisées correspondent donc aux processus de fabrication de composts Agribalyse, auxquels a été supprimé l'impact de la fabrication des intrants pour être cohérent avec l'hypothèse de l'étude d'avoir des déchets qui entrent dans le système avec une empreinte environnementale nulle (Tableau 53).

Tableau 53 - Données utilisées pour la fabrication des composts

Type de compost	Nom de la donnée Agribalyse 3.0	Modification réalisée sur la donnée Agribalyse
Compost de boues	<i>A. Compost, of sludge and green waste</i>	Suppression des impacts de fabrication des substrats (les déchets entrent dans le système avec une charge environnementale nulle)
Compost de Déchets IAA (hors SPAN) et Biodéchets (collectivité,)	<i>A. Compost, of biowaste</i>	
Compost de Déchets verts	<i>A. Compost, of green waste</i>	

E. Calcul des impacts évités liés à l'épandage des composts

Les facteurs d'émissions pour l'épandage des composts sont identiques à ceux présentés dans le sur l'épandage des effluents, à l'exception des émissions d'ammoniac. Ici, un facteur d'émission de 0,8 kg N-NH₃/kg de NH₄ (d'après l'outil Means In Out basé sur l'EMEP/EEA, 2016 Tier 2) est considéré (Tableau 54).

Tableau 54 - Composition en azote des composts

Type de compost	Process Name	Teneur en Ntot (kg Ntot/t de compost)	Teneur en NH ₄ (kg N-NH ₄ /t de compost)	Sources
Compost de boues	<i>A. Compost, of sludge and green waste</i>	8,5	1	CIRAD,2020 ⁹⁵
Compost de Déchets IAA (hors SPAN) et Biodéchets (collectivité,)	<i>A. Compost, of biowaste</i>	8,7	0,1	CIRAD,2020 ⁹⁵
Compost de Déchets verts	<i>A. Compost, of green waste</i>	7,8	0,4	CIRAD, 2020 ⁹⁵

F. Calcul des impacts évités et induits liés à l'incinération des intrants avec valorisation énergétique

Pour rappel, les substrats concernés par l'incinération sont une partie des boues et des déchets IAA (dont les SPAN).

⁹⁴ ADEME, 2012. Programme de recherche de l'ADEME sur les émissions atmosphériques du compostage. Connaissances acquises et synthèse bibliographique. 243p.

https://bibliothèque.ademe.fr/cadic/3520/_84270__emissions_compostage.pdf

⁹⁵ CIRAD, 2020. Dataset of organic fertilisers' characteristics - French data

La quantité de biomasse envoyée en incinération évitée pour 1 kWh de biométhane a été calculée de la manière suivante :

$$[q_incinération] = [r_substrat_kWh] \times [\%intrans] \times [r_incinération]$$

Avec :

[q_incinération] = quantité évitée de biomasse envoyée en incinération grâce à la production de 1 kWh de biométhane (t) ;

[r_substrat_kWh] = quantité de mix d'intrants pour produire 1 kWh de biométhane (t/kWh) ;

[%intrans] = pourcentage de l'intrans dans la ration (%) ;

[r_incinération] = hypothèse du devenir des substrats s'ils n'avaient pas été méthanisés, cf

Tableau 49 (%).

La donnée utilisée pour le processus d'incinération est la donnée suivante, issue de la base EcoInvent : *Biowaste {CH} | treatment of, municipal incineration with fly ash extraction | Cut-off, U.*

La documentation EcoInvent de cette donnée indique que la valorisation énergétique liée à l'incinération de 1 kg de biomasse est de 0.42 MJ d'électricité et de 1.01 MJ de chaleur.

Ainsi, puisque la valorisation énergétique n'a pas eu lieu du fait de la méthanisation des substrats, il est considéré que cette énergie non produite est remplacée par une consommation d'énergie fossile, de type « gaz naturel » (*Heat, central or small-scale, natural gas {CH} | heat production, natural gas, at boiler condensing modulating <100kW | Cut-off, S*) et « électricité du réseau » (*Electricity, low voltage {FR} | market for | Cut-off, S*).

La quantité d'énergie sur-consommée du fait de la non-incinération de la biomasse est calculée de la manière suivante :

$$[Incinération_gaz_nat] = [q_incinération] \times 1.01$$

Avec :

[Incinération_gaz_nat] = quantité de chaleur sur-consommée par kWh de biométhane (MJ/kWh de biométhane) ;

[q_incinération]= quantité évitée de biomasse envoyée en incinération grâce à la production de 1 kWh de biométhane (t).

$$[Incinération_elec] = [q_incinération] \times 0.42$$

Avec :

[Incinération_gaz_nat] = quantité d'électricité sur-consommée par kWh de biométhane (MJ/kWh de biométhane) ;

[q_incinération]= quantité évitée de biomasse envoyée en incinération grâce à la production de 1 kWh de biométhane (t).

G. Calcul des impacts évités liés à l'épandage des boues de STEU

Les facteurs d'émissions dans l'air à l'épandage pour les boues sont identiques à ceux présentés dans le Tableau 51 sur l'épandage des effluents, à l'exception des émissions d'ammoniac. Ici, un facteur d'émission de 0,5 kg N-NH₃/kg de NH₄ (d'après l'outil Means In Out basé sur l'EMEP/EEA 2016 Tier 2) est considéré (Tableau 55).

Tableau 55 - Composition en azote des boues de STEU

Teneur en azote des boues de STEU	Unité	Valeur	Source
Teneur en Ntot	kg Ntot/t MB	2,7	MéthaSim
Teneur en azote Ammoniacal (TAN de 70% Agribalyse 3.0)	kg N-NH ₄ /kg Ntot	1,87	Agribalyse 3.0 – Means InOut

H. Calcul des impacts évités liés aux résidus de culture laissés au champ

La quantité évitée de résidus de culture laissés au champ pour 1 kWh de biométhane a été calculée de la manière suivante :

$$[q_résidus] = [r_substrat_kWh] \times [\%intrans] \times [r_résidus]$$

Avec :

[r_substrat_kWh] = quantité de mix d'intrants pour produire 1 kWh de biométhane (t/kWh) ;

[%intrans] = pourcentage de l'intrans dans la ration (%) ;

[r_résidus] = hypothèse du devenir des résidus de culture s'ils n'avaient pas été méthanisés, cf

Tableau 49 (%) ;

[q_résidus] = quantité évitée de résidus de culture laissés au champ grâce à la production de 1 kWh de biométhane (t).

Les résidus de culture des parties aériennes restitués au sol après récolte tels que les pailles de blé contiennent de l'azote. Ils engendrent également des émissions d'azote vers l'environnement. Selon, la méthode du Label Bas-Carbone Grandes Cultures⁹⁶, les résidus contribuent aux émissions directes de N₂O ainsi qu'aux émissions indirectes de N₂O associées à la lixiviation de l'azote sous forme de NO₃⁻. Toutefois, d'après la méthode, les résidus ne participent pas aux émissions de N₂O indirectes à travers la volatilisation sous forme de NH₃. Aucune émission de NH₃ depuis les résidus aériens n'est donc considérée dans cette étude. Le Tableau 56 montre la composition en azote totale des résidus de culture.

Tableau 56 - Composition en azote des résidus de culture

Teneur en azote des résidus de culture	Unité	Valeur	Source
Teneur en Ntot	kg Ntot/t MB	4,7	MéthaSim

5.3.2. Procédés alternatifs à la fonction « Produire du digestat utilisé comme un fertilisant »

Une autre fonction secondaire de la méthanisation est de produire du digestat qui sera utilisé comme fertilisant ou comme amendement. Ce pouvoir fertilisant dépend de la composition du digestat et donc du mix de substrats.

⁹⁶ Soenen et al, 2021. Label Bas-Carbone Méthode Grandes Cultures version 1.1

Pour mesurer les impacts évités, il s'agit de répondre à la question : qu'est-ce qui aurait été apporté au champ comme engrais ou amendement à la place du digestat ?

Il est ici considéré que les impacts évités sont calculés en évaluant la quantité d'engrais minéraux remplacée par le digestat. Le « Mineral Fertilizer Equivalent » (MFE) ou coefficient d'équivalence en engrais minéral est utilisé. D'après la bibliographie, ce MFE a une valeur d'environ 60% pour l'azote (Institut de l'élevage, ITAVI, & ITP) (Arnold, 2011). Dans le cadre de note étude, le MFE est calculé en suivant la méthode employée dans l'étude INRAE Transfert 2021 qui est la méthode Brockmann *et al.* (2018)⁹⁷ (A. Bilan azoté du digestat et calcul du MFE).

Après avoir calculé le MFE, il s'agit de soustraire la quantité d'azote minéral équivalent qui aurait été épandue dans le cadre du devenir des substrats sans méthanisation. Cela permet d'éviter un double comptage des impacts évités. En effet, les deux fonctions secondaires « traiter des déchets » et « produire du digestat utilisé comme un fertilisant » sont liées : une partie de l'azote contenu dans le digestat provient par exemple des effluents, qui auraient été épandus au champ pour leur fonction fertilisante, du compost (de biodéchets, déchets verts, boues, déchets IAA hors SPAN), des boues qui auraient été épandues au champ et des résidus de culture laissés au champ.

Une fois la quantité d'engrais minéral évitée calculée, les impacts associés à la fabrication puis à l'utilisation de ces engrais minéraux sont mesurés.

A. Bilan azoté du digestat et calcul du MFE

Le MFE permet ici de déterminer les quantités d'éléments disponibles pour les cultures dans le digestat. Il correspond au rapport entre l'azote total contenu par le digestat et l'azote assimilable par la plante. Cet azote assimilable correspond à la somme de l'azote minéral contenu dans le digestat et l'azote organique qui sera minéralisé au sol après épandage. Le MFE est calculé d'après le modèle de Brockmann *et al.*, 2018⁹⁷. **L'Erreur ! Source du renvoi introuvable.** détaille les différentes étapes du calcul.

Dans le cadre de cette méthode, il s'agit tout d'abord de réaliser un bilan azoté qui consiste à soustraire les émissions d'azote, sous ses différentes formes (N_2O , NH_3 , NO_x), de l'azote total compris dans le mix de substrat au cours des différentes étapes :

- Stockage des substrats,
- Méthanisation des substrats dans le digesteur,
- Stockage des digestats,
- Epandage des digestats.

A chaque étape, différentes molécules azotées sont émises. A chaque nouvelle émission, la quantité globale d'azote présente dans le mix ou dans les digestats diminue. Les premières émissions ont d'abord lieu au stockage des substrats où sont mesurées les pertes liées aux N_2O , NO_x et NH_3 . Ensuite, les substrats sont envoyés dans le digesteur où un taux de fuite est appliqué dont découle des émissions de NH_3 , qui sont toutefois très faibles. Puis, une partie du digestat brut en sortie de méthanisation est séparée en une

⁹⁷ Brockmann, D., Pradel, M., & Hélias, A. (2018). Agricultural use of organic residues in life cycle assessment: Current practices and proposal for the computation of field emissions and of the nitrogen mineral fertilizer equivalent. *Resources, Conservation and Recycling*, 133(January), 50–62.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.034>

phase liquide et solide. Ces trois types de digestat sont stockés et émettent du NH₃ et du N₂O. Enfin, à l'étape d'épandage, les émissions au champ libèrent du NH₃, des NO_x et du N₂O.

De plus, les émissions de certaines étapes varient en fonction du type de digestat car les facteurs d'émissions diffèrent entre un digestat brut, solide et liquide. Par conséquent, à chaque étape sont calculées les émissions spécifiques de tous les types de digestat qui permettent de déduire l'azote restant et donc l'azote assimilable à l'épandage. Grâce aux proportions renseignées dans la partie 5.2.1 paragraphe « Séparation de phases », la teneur en azote et le MFE d'un digestat moyen sont estimés pour les filières AA, AT et IT comme l'indique le Tableau 57.

Tableau 57 - Valeurs de l'azote assimilable et des MFE d'un digestat moyen des filières AA, AT, IT

	N assimilable (kg Nmin/t digestat moyen)	MFE
AA	3,68	72.3%
AT	4,24	72.3%
IT	3,43	66.7%

B. Calcul des impacts évités liés à la fabrication des engrais minéraux substitués

La quantité d'azote substitué par la quantité de digestat issu de la production de 1 kWh de biométhane a été calculée de la manière suivante :

$$[N_min_digestat] = [q_dig_kwh] \times [Ntot_dig] \times [MFE_dig]$$

Avec :

[N_min_digestat] = quantité d'azote minéral équivalent par kWh de biométhane produit (kg Nmin/kWh biométhane) ;

[q_dig_kWh] = quantité de digestat produit par kWh de biométhane (kg digestat/kWh biométhane) ;

[Ntot_dig] = teneur en azote total du digestat (kg Ntot/kg digestat) ;

[MFE_dig] = coefficient d'équivalence en azote minéral du digestat (Tableau 57) (%Ntot).

Par ailleurs, la quantité d'azote substitué par kWh de biométhane provenant des effluents ou composts épandus au champ sans méthanisation est calculé de la manière suivante :

$$[N_min_fumier/lisier/compost/boues/résidus] = [r_substrat_kWh] \times [\%intrans] \times [r_épandage] \times [teneur\ en\ Ntot] \times [MFE]$$

Avec :

[N_min_fumier/lisier/compost/boues/résidus] : quantité d'azote minéral équivalent qui aurait été épandue, provenant des substrats permettant de produire 1 kWh de biométhane (kg Nmin/kWh biométhane) ;

[r_substrat_kWh] = quantité de mix d'intrants pour produire 1 kWh de biométhane (t/kWh) ;

[%intrans] = pourcentage de l'intrans dans la ration (%) ;

[r_épandage] = hypothèse du devenir des substrats s'ils n'avaient pas été méthanisés, cf

Tableau 49 (%) ;

[teneur en Ntot] = cf Tableau 52 (fumiers et lisiers), Tableau 54 (composts), Tableau 55 (boues), Tableau 56 (kg N/t substrat) ;

$$[MFE] = cf$$

Tableau 58 (%).

Ainsi, la quantité totale d'azote finale substituée par kWh de biométhane, $N_{min_substit}$, correspond à :

$$[N_{min_substit}] = [N_{min_digestat}] - [N_{min_fumier}] - [N_{min_lisier}] - [N_{min_compost}] - [N_{min_boues}] - [N_{min_résidus}]$$

Pour le phosphore et la potasse, la même logique que pour l'azote est appliquée, à la différence qu'un coefficient d'équivalence minérale de 100% est pris en compte (

Tableau 58).

Tableau 58 - Coefficient d'équivalence minérale pour les effluents et les composts

	Azote minéral		Phosphore et potasse	
	MFE	Source	MFE	Source
Fumier	50%	INRAE 2013 ⁹⁸	100%	Arnold, 2011 ⁹⁹ Bernstad et al, 2011 ¹⁰⁰
Lisier	65%	INRAE 2013		
Compost de biodéchets/déchets IAA	10%	Agribalyse 3.0 <i>A. Compost, of biowaste</i> , CIRAD, 2020 ⁸⁵		
Compost de déchets verts	10%	Agribalyse 3.0 <i>A. Compost, of green waste</i> , CIRAD, 2020 ⁸⁵		
Compost de boues	15%	<i>A. Compost, of sludge and green waste</i> , CIRAD, 2020 ⁸⁵		
Boues	35%	Sludge, dried, CIRAD, 2020 ⁸⁵		

Résidus de culture : proxy MFE × [Ntot] = kg N-NH₄/t de résidus de culture

Les process de fabrication des engrais utilisés sont issus de la base de données Agribalyse 3.0 :

- Ammonium nitrate, as N {RER} | ammonium nitrate production | Cut-off, S - Copied from Ecoinvent ;

Le Tableau 59 présente les résultats obtenus de P₂O₅ et K₂O minéraux substitués pour les filières AA, AT et IT. Ces résultats proches de 0 signifient que les quantités de phosphore et de potasse dans les intrants sont similaires à celles présentent dans le digestat. Le procédé de méthanisation entraîne peu de pertes de ces deux composés, ce qui ne permet pas de prendre en compte un impact lié à la fabrication d'engrais minéraux substitués de P₂O₅ et K₂O.

Tableau 59 - Résultats du calcul de P₂O₅ et K₂O minéral évités pour les filières AA, AT et IT

⁹⁸ INRA, 2013. Connaissances sur les flux d'azote et flux associés dans les élevages. Chapitre 6 - Transformation devenir et valorisation de l'azote effluents élevage systèmes cultures.

⁹⁹ Arnold, Karin, Greenhouse gas balance of biomethane - which substrates are suitable? 2011, Energy Science and Technology, vol 1 n°2, pp67-75

¹⁰⁰ Bernstad, A. and la Cour Jansen, J., 2011. A life cycle approach to the management of household food waste - a swedish full-scale study; Waste Management, 2011.

	Filière AA	Filière AT	Filière IT
<i>[P₂O₅_min_substit]</i> kgP ₂ O ₅ /kWh biométhane	0,0001	0,000026	-0,0006
<i>[K₂O_min_substit]</i> kgK ₂ O/kWh biométhane	0,0006	-0,00005	-0,0007

C. Calcul des impacts évités liés à l'utilisation des engrais minéraux substitués

Les facteurs d'émissions à l'épandage des engrais minéraux utilisés sont détaillés dans le Tableau 60 ci-dessous, et sont issus du rapport du GIEC 2019⁹² et du rapport de l'EMEP/ EAA 2016. Par ailleurs, la synthèse des émissions azotées, phosphorées ainsi que les émissions d'ETM liées à l'épandage des engrais minéraux est détaillée dans l'**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Tableau 60 - Facteurs d'émissions à l'épandage des engrais minéraux

Emissions	Unité	Valeur	Sources
NH ₃	kg N-NH ₃ /kg N	2.4%	EMEP/EAA 2016, Tiers 2 Température annuelle moyenne < 15°C Les % de sol avec un pH ≤7 et >7 sont de 50% et 50%
NO _x	kg NO _x /kg N	4%	EMEP/EEA, 2019b, tiers 181
N ₂ O directes	kg N-N ₂ O/kg N	1.6%	IPCC 2019 facteurs désagrégés, engrais minéraux (Tableau 11.1) ⁹²
N ₂ O volatilisation	kg N-N ₂ O/kg de N-NO _x et N-NH ₃ émis	1%	IPCC 2019 ⁹²
N ₂ O lessivage	kg N-N ₂ O/kg de N-NO ₃ ⁻	1.1%	IPCC 2019 ⁹²
NO ₃ ⁻	kg N-NO ₃ ⁻ /kg de N	24%	IPCC 2019 ⁹²

6. Résultats et interprétation - méthode par allocation économique

6.1. Résultats sur l'indicateur des émissions de gaz à effet de serre

6.1.1. Résultats du mix de production du biométhane en France

La Figure 18, montre les émissions par poste de la filière biométhane. Il s'agit des résultats de chacune des filières pondérées en fonction de leur poids dans le mix énergétique du biométhane.

Le poste le plus émetteur de la filière est au niveau de l'épuration qui contribue à hauteur de 47% des émissions. Le suivant est la digestion qui contribue à 22%. Au niveau de ces deux postes, des émissions à travers des fuites surviennent. Une consommation d'énergie est également affiliée au fonctionnement des équipements mais les impacts de cette consommation sont moindres en comparaison aux fuites, qui sont surtout des émissions de méthane biogénique.

La production de cultures à destination des digesteurs (CIVE et cultures dédiées) représente 12% des émissions avec une contribution proche de 5% pour les CIVE et de 7% pour les cultures dédiées.

Les quatre postes précédemment cités participent au total à 81% des émissions.

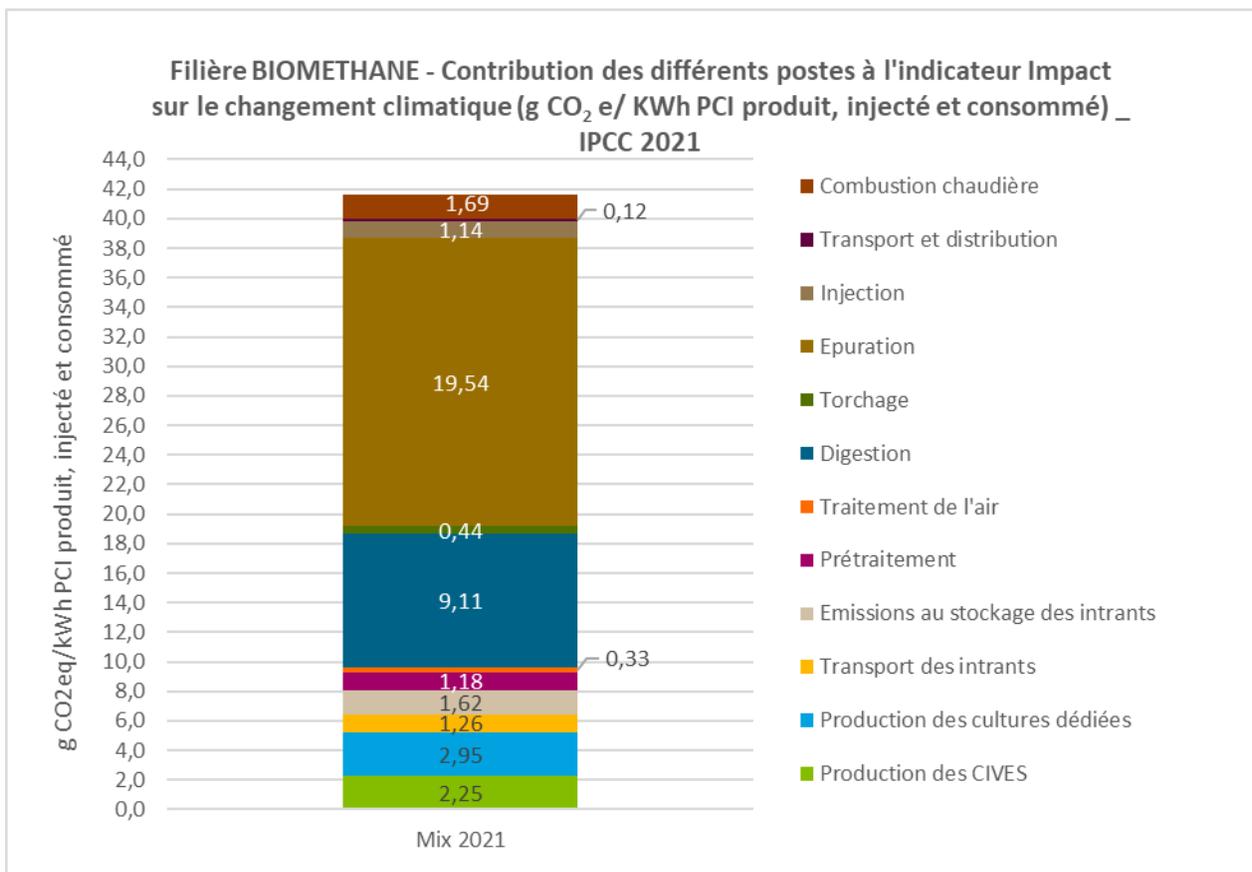


Figure 18 - Résultats pour la méthode par allocation économique de la filière biométhane

L'analyse de l'ensemble des filières a mis en avant la contribution quasi exclusive de trois gaz à effet de serre : le méthane biogénique, le dioxyde de carbone d'origine fossile et le protoxyde d'azote.

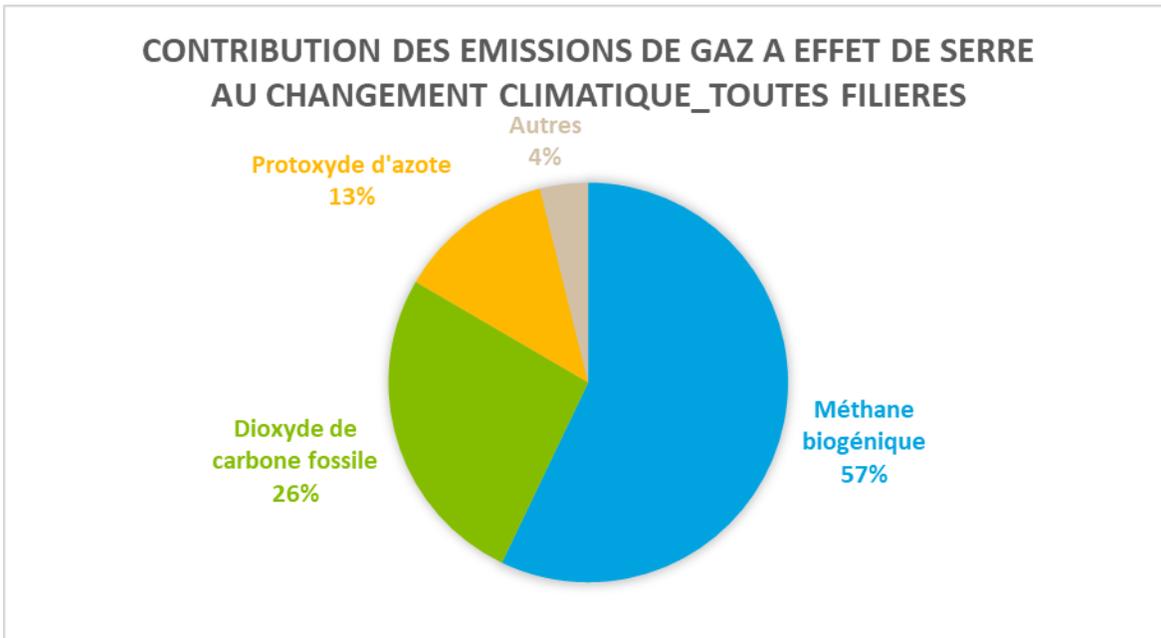


Figure 19 : Contribution des émissions de gaz à effet de serre au changement climatique pour l'ensemble des filières

6.1.2. Résultats par filière

Comparaison toutes filières

L'ACV de la filière biométhane selon la méthode par allocation économique, avec pour référence le mix de production de 2021⁴ montre que la production, l'injection et la consommation de 1 kWh PCI de biométhane issu de déchets ou de cultures en France à travers une combustion en chaudière pour la production de chaleur, rejettent des émissions de GES à hauteur de 41,64 g CO₂e/kWh PCI de biométhane (Tableau 61).

En fonction des filières, le facteur d'émission varie sur un intervalle allant de 10,93 g CO₂e/kWh PCI (filière ISDND) à 50,12 g CO₂e/kWh PCI (filière Biodéchets). Les filières AA, AT influent davantage sur le facteur d'émission de l'ensemble de la filière biométhane. Elles représentent en effet 80% du mix de production. Les différences de résultats constatées pour les deux filières ISDND et STEU, avec les plus faibles facteurs d'émissions, s'expliquent par les frontières de leur système plus restreintes que celles des autres filières et le statut des intrants utilisés pour la production de biométhane qui sont des déchets. À savoir, les déchets sont considérés comme ayant une charge environnementale nulle.

Tableau 61 - Facteurs d'émissions du biométhane selon les filières de production et toutes filières confondues avec la méthode IPCC 2021

	Facteurs d'émissions du biométhane (g CO ₂ e/kWh PCI)	Panorama biogaz 2021 (Scénario "actuel" de l'étude)
Agricole autonome	43,56	55%
Agricole Territorial	43,20	25%
Industriel territorial	45,24	8%
Déchets ménagers et biodéchets	50,12	3%
ISDND	10,93	3%
STEU	23,73	6%
Ensemble des filières biométhane	41,64	

Agricole Autonome

Le facteur d'émission spécifique à la filière AA atteint 43,56 g CO₂e/kWh PCI. La digestion et l'épuration représentent 69% des émissions totales de la filière, respectivement émettrices de 10,23 g CO₂e/kWh PCI et 19,97 g CO₂e/kWh PCI (Figure 20).

- L'impact de l'épuration provient des émissions de méthane liées à des pertes techniques principalement (84% de l'impact) ainsi que des consommations d'énergie nécessaires aux différentes technologies d'épuration utilisées (15% de l'impact),
- À l'étape de digestion, les émissions sont principalement liées aux fuites de CH₄ et de CO₂ (70% de l'impact), à la consommation d'électricité (13% de l'impact) et à l'infrastructure du digesteur (16% de l'impact).

La production des CIVE et cultures dédiées sont ensuite les étapes les plus émettrices, elles représentent à elles deux 16,3% des émissions. Leurs émissions proviennent des itinéraires techniques affiliés à leur production.

Les fuites de biométhane, responsables d'émissions directes, entraînent également des impacts indirects sur les résultats de l'ACV. En effet, elles influent sur l'efficacité du procédé et donc directement sur l'unité fonctionnelle. Plus les fuites sont réduites, plus les matières en entrée de digesteur seront valorisées pour la production de biométhane. Par conséquent, les impacts des étapes amont de production de ces intrants seront moindres, car la production de biométhane pour une tonne d'intrant sera plus importante. Dans une même logique, le travail d'enquête réalisé à la demande de GRDF en 2022 et 2023 auprès de méthaniseurs a permis de prouver que les quantités de biogaz envoyées en torchères diminuaient par rapport aux données de références au préalable utilisées dans cette étude. De fait, l'efficacité générale du procédé de méthanisation est améliorée et les résultats de l'ACV en sont positivement impactés.

Les émissions proviennent de différents GES, chacun contribuant différemment au facteur d'émission. Globalement, les émissions de méthane biogénique sont les plus importantes, originaires principalement des fuites et de l'étape de stockage des intrants en amont du digesteur. Les autres gaz contributeurs sont d'abord le CO₂ et ensuite le N₂O, qui entraînent tous les deux des émissions dites fossiles. Les émissions de CO₂ fossiles sont principalement liées aux consommations d'énergie à l'épuration et au digesteur. Les émissions de N₂O proviennent principalement de l'épandage du digestat et ses émissions au champ dans le cadre de la production des CIVE.

Il semble clair que le taux de perte de méthane biogénique au niveau de la digestion et de l'épuration semble structurer de manière importante l'impact sur le changement climatique de la filière AA. L'impact de la fertilisation des cultures dédiées et des CIVE n'est toutefois pas négligeable. Au total, les émissions de méthane biogénique représentent 56% de l'impact sur le changement climatique de la filière (97% proviennent de fuites au niveau des procédés), les émissions de CO₂ représentent 25% de l'impact (dont 45% provenant de la consommation d'électricité, 13% de la production du digesteur et le reste principalement des transports et de la consommations de fuel des engins agricoles), et enfin les émissions de protoxyde d'azote représentent 12% de l'impact (dont environ 64% provenant de la fertilisation azotée, 17% du stockage des intrants et 8% de la combustion en chaudière) (Figure 20).

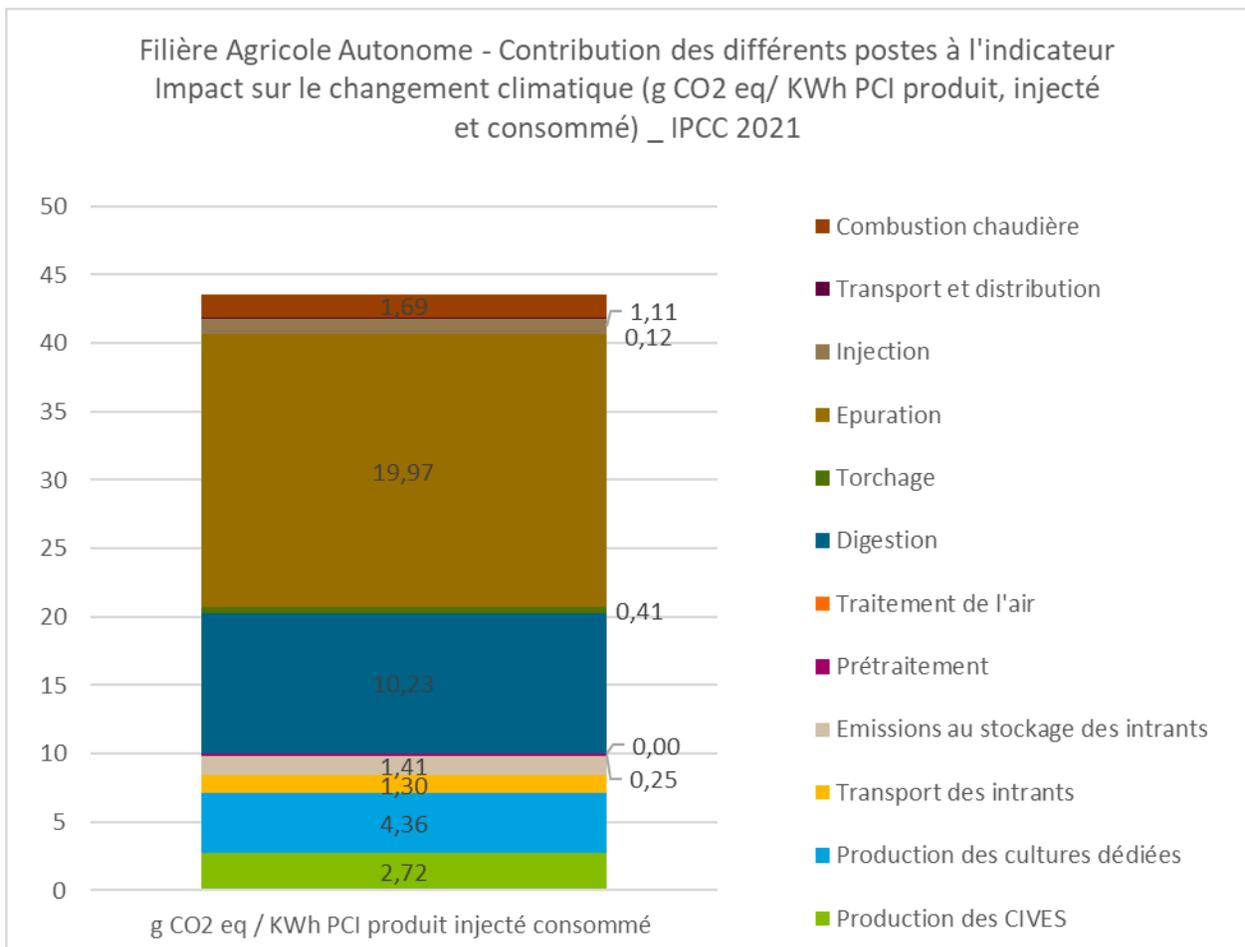


Figure 20 - Résultats pour la méthode par allocation économique de la filière AA

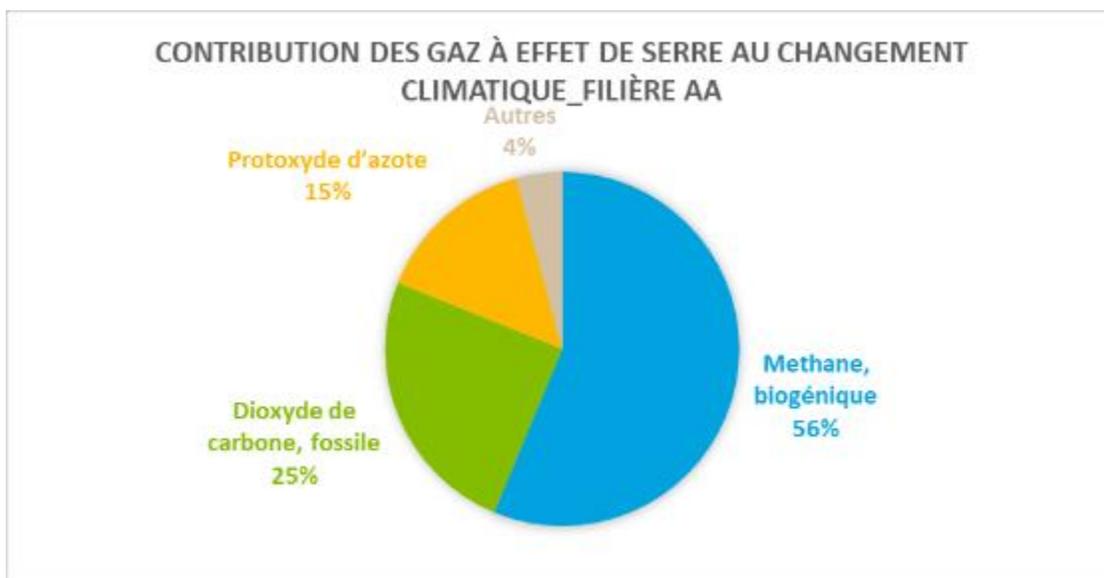


Figure 21 – Contribution des émissions de gaz à effet de serre au changement climatique pour la filière AA (séquestration de CO₂ exclue)

Agricole Territorial

Le facteur d'émission spécifique à la filière AT atteint 43,20 g CO₂e/kWh PCI, soit des émissions très proches de la filière AA. Comme pour la filière AA, les étapes qui influent le plus sur le facteur d'émission en AT sont la digestion et l'épuration, émettrices respectivement de 10,26 g CO₂e/kWh PCI et 19,55 g CO₂e/kWh PCI (Figure 22). Elles représentent 69% du facteur d'émission. Les éléments explicatifs de l'importance de ces étapes sont les mêmes qu'en filière AA (cf. partie 6.1.2 résultats filière Agricole Autonome).

La troisième étape la plus émettrice est la culture des CIVE qui contribue à 3,02 g CO₂e/kWh PCI soit 7% du facteur d'émission. La proportion des CIVE dans la ration est de 20% en AT soit 6% de plus qu'en AA. Les cultures dédiées sont moins impactantes en AT, ce qui s'explique par leur proportion dans la ration à hauteur de 4% (6,5% pour la filière AA).

La variation du mix d'intrants entre AA et AT ne change rien au caractère structurant de l'impact des fuites de méthane au niveau du digesteur et de l'épuration.

Au bilan, les émissions de méthane biogénique représentent 58% de l'impact sur le changement climatique de la filière (91% proviennent de fuites au niveau des procédés), les émissions de CO₂ représentent 26% de l'impact (dont 43% provenant de la consommation d'électricité, 13% de la production du digesteur et le reste principalement des transport et de la consommations de fuel des engins agricoles), et enfin les émissions de protoxyde d'azote représentent 13% de l'impact (dont environ 72% provenant de la fertilisation azotée, 15% du stockage des intrants et 9% de la combustion en chaudière) (Figure 22 - Résultats pour la méthode par allocation économique de la filière AT).

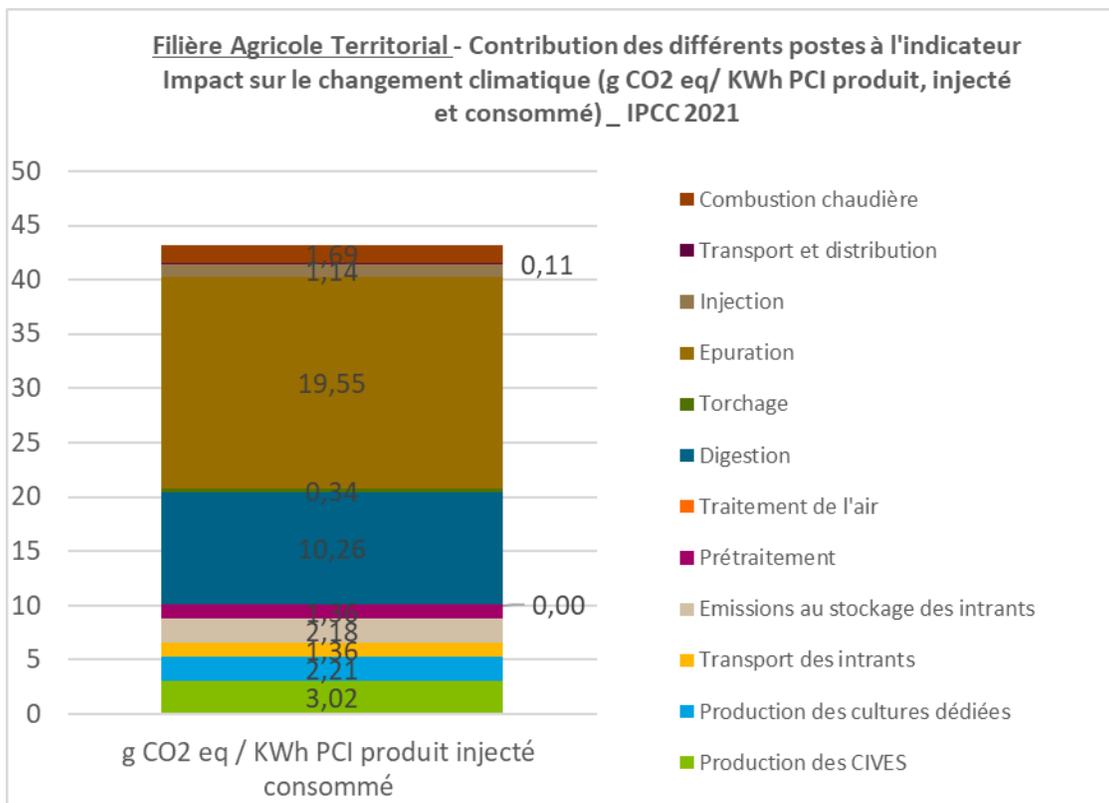


Figure 22 - Résultats pour la méthode par allocation économique de la filière AT

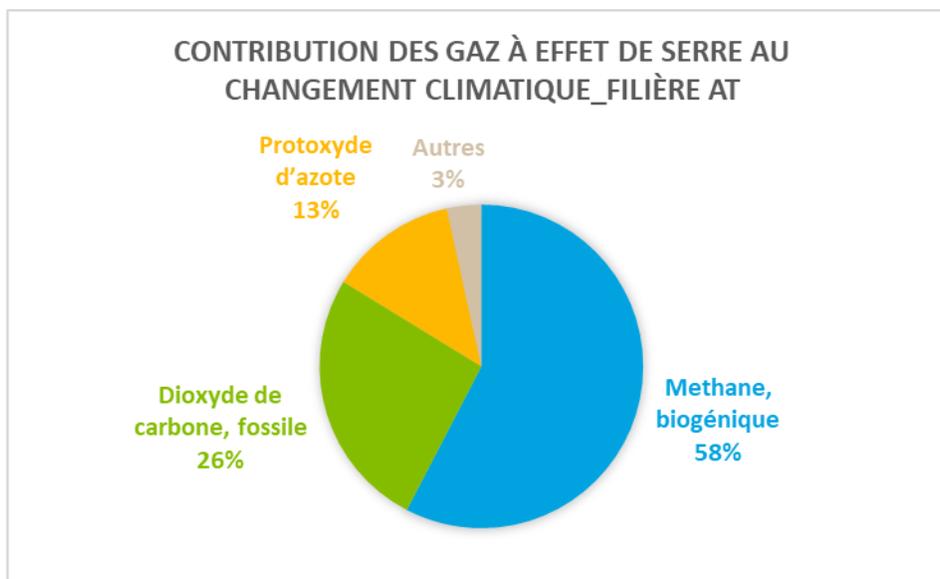


Figure 23 – Contribution des émissions de gaz à effet de serre au changement climatique pour la filière AT AA (séquestration de CO₂ exclue)

Industriel Territorial

Le facteur d'émission spécifique à la filière IT atteint 45,24 g CO₂e/kWh PCI. Comme pour les deux filières précédentes, les étapes les plus émettrices sont la digestion et l'épuration, avec des émissions respectives de 9,19 g CO₂e/kWh PCI et 19,54 g CO₂e/kWh PCI (Figure 24). Elles représentent 63% du facteur

d'émission. Pour ces deux étapes, les émissions sont généralement dues aux fuites (71% de l'impact pour la digestion et 86% pour l'épuration).

Ensuite, le prétraitement représente 12,7% de l'impact soit 5,74 g CO₂e/kWh PCI avec 12,4% qui découlent de l'hygiénisation et seulement 0,3% du broyage. Effectivement, une proportion plus importante d'intrants est hygiénisée en IT. Les émissions sont surtout dues à l'utilisation de gaz naturel durant l'hygiénisation (97% de l'impact de ce poste).

L'étape de stockage des intrants émet 3,79 g CO₂e/kWh PCI soit 8,4% du FE. Les durées de stockage du fumier et du lisier en IT sont plus longues que dans les filières AA et AT. En effet, il est considéré en IT une durée de stockage des effluents avec méthanisation de lisier de 22,5 jours et du fumier de 52,5 jours. Bien que la proportion d'effluents dans le mix d'intrants en IT soit plus faible que pour les filières AA et AT, du fait de leur durée de stockage avant incorporation dans le digesteur (Tableau 18Tableau 19Tableau 50), les émissions calculées augmentent.

Au bilan, les émissions de méthane biogénique représentent 60% de l'impact sur le changement climatique de la filière (94% proviennent de fuites au niveau des procédés), les émissions de CO₂ représentent 30% de l'impact (dont 35% provenant de la consommation de gaz naturel pour l'hygiénisation, 32% de la consommation d'électricité, 10% de la production du digesteur et 13% des transports des intrants), et enfin les émissions de protoxyde d'azote représentent seulement 7% de l'impact (dont 75% du stockage des intrants et 17% de la combustion en chaudière) (Figure 25). La faible proportion d'intrants nécessitant une fertilisation dans cette filière réduit les émissions de protoxyde d'azote comparativement aux filières AA et AT.

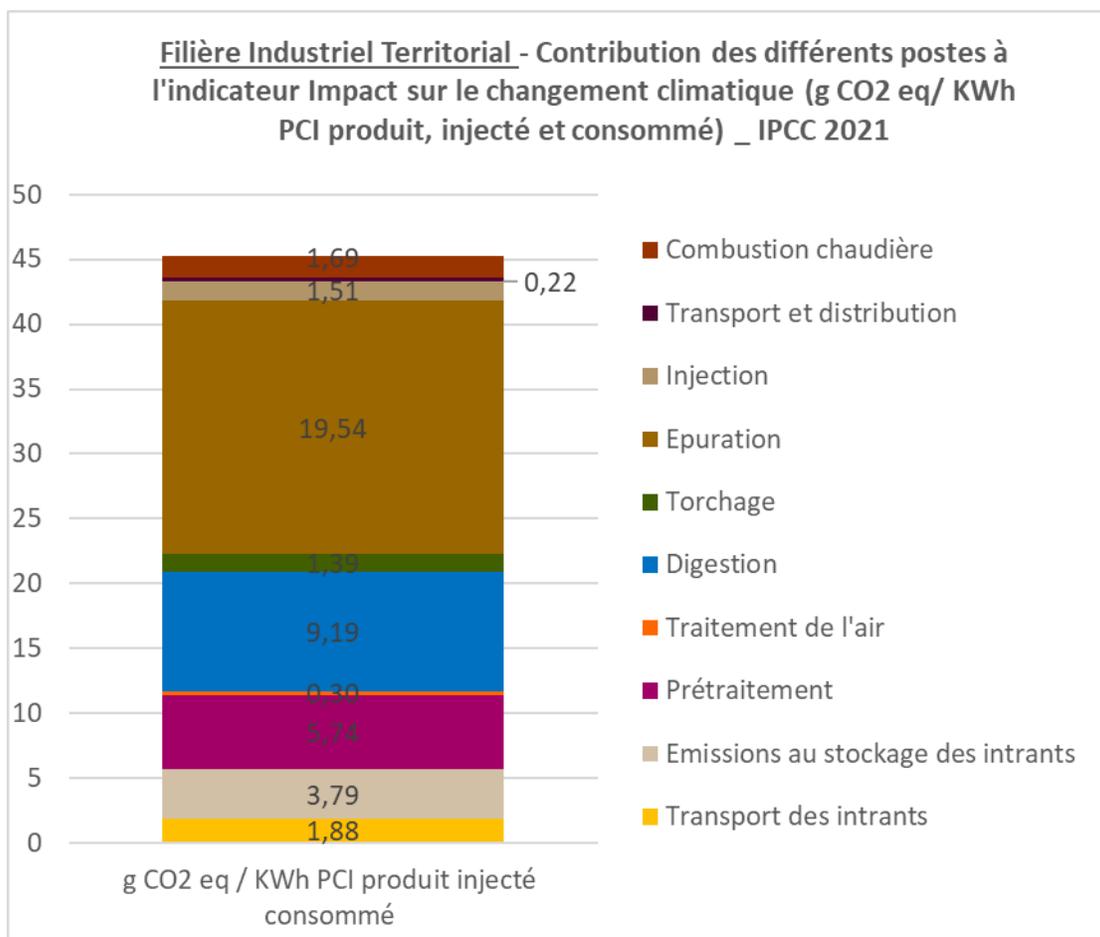


Figure 24 - Résultats pour la méthode par allocation économique de la filière IT

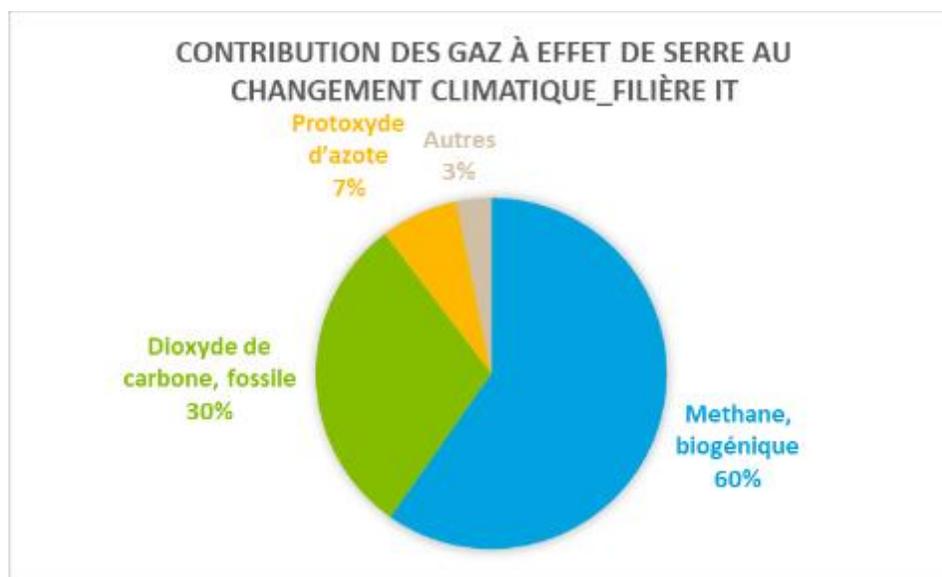


Figure 25 - Contribution des émissions de gaz à effet de serre au changement climatique pour la filière IT

De manière générale, l'impact de l'unité de méthanisation sur les 3 précédentes filières s'explique beaucoup par le choix de l'allocation qui attribue une majorité des émissions au biométhane vis-à-vis de

la fonction de gestion des déchets et de la production de digestat. En effet, seule une faible partie des substrats est considérée comme un déchet générant des revenus. Seuls les fumiers, lisiers et biodéchets sont valorisables économiquement en tant que déchets, mais avec des prix de revient pour les unités de méthanisation très faibles comparativement au prix de vente du biométhane. Cette différence de revenus attribue un poids important à la production de biométhane par rapport à la gestion des déchets ou encore au digestat lui aussi faiblement valorisé économiquement.

ISDND

Le facteur d'émission spécifique à la filière ISDND atteint 10,93 g CO₂e/kWh PCI (Figure 26). Comme pour la filière STEU, le périmètre de la filière ISDND commence à l'étape d'épuration, cette dernière contribuant à hauteur de 8,21 g CO₂e/kWh PCI, soit 75% de l'impact total dont 53% provenant de la consommation d'électricité et seulement 44% de fuites de méthane. La seconde étape qui émet le plus est la combustion chaudière avec 1,69 g CO₂e/kWh PCI soit 15% de l'impact total dont 56 % provenant de la consommation d'électricité et 46% des émissions issues des fumées de combustion.

Les émissions de l'étape d'épuration sont plus faibles que celles de la filière STEU, majoritairement expliquées par la répartition des technologies d'épuration (section 4.4.3). Le taux de pertes de biogaz à l'épuration par cryogénie est bien plus faible que celui de la technologie par membrane. D'autant que la cryogénie est plus utilisée dans la filière ISDND et à l'inverse la membrane est plus utilisée en filière STEU, si bien que les émissions de ce poste dans la filière STEU sont plus importantes. L'épuration par membrane est également la plus consommatrice d'énergie mais contrairement à la filière STEU où elle représente 94,51% des technologies employées, en ISDND elle ne représente que 18,49%.

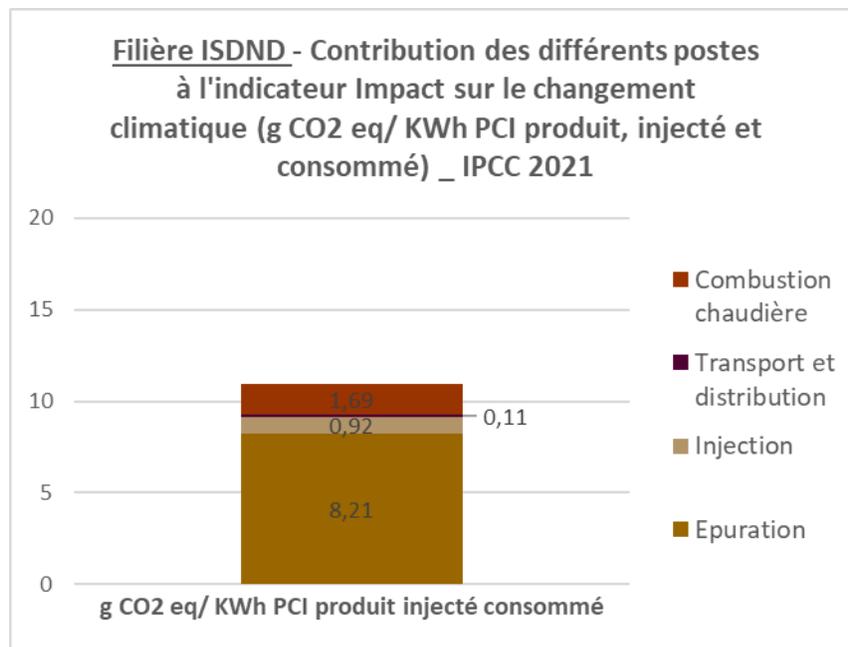


Figure 26 - Résultats pour la méthode par allocation économique de la filière ISDND

Les fuites étant moins importantes, la contribution au changement climatique de la filière ISDND est plus partagée entre les émissions de CO₂ et de méthane. Les émissions de CO₂ contribuent à hauteur de 46% du changement climatique (dont 77% provenant de la consommation d'électricité de la filière et 17% de

la consommation d'électricité de la chaudière), les émissions de méthane représentent 43% de l'impact (dont 96% proviennent de fuites au niveau des procédés) et enfin, les émissions de protoxyde d'azote représentent seulement 6% de l'impact (dont environ 79% de la combustion en chaudière) (Figure 26).

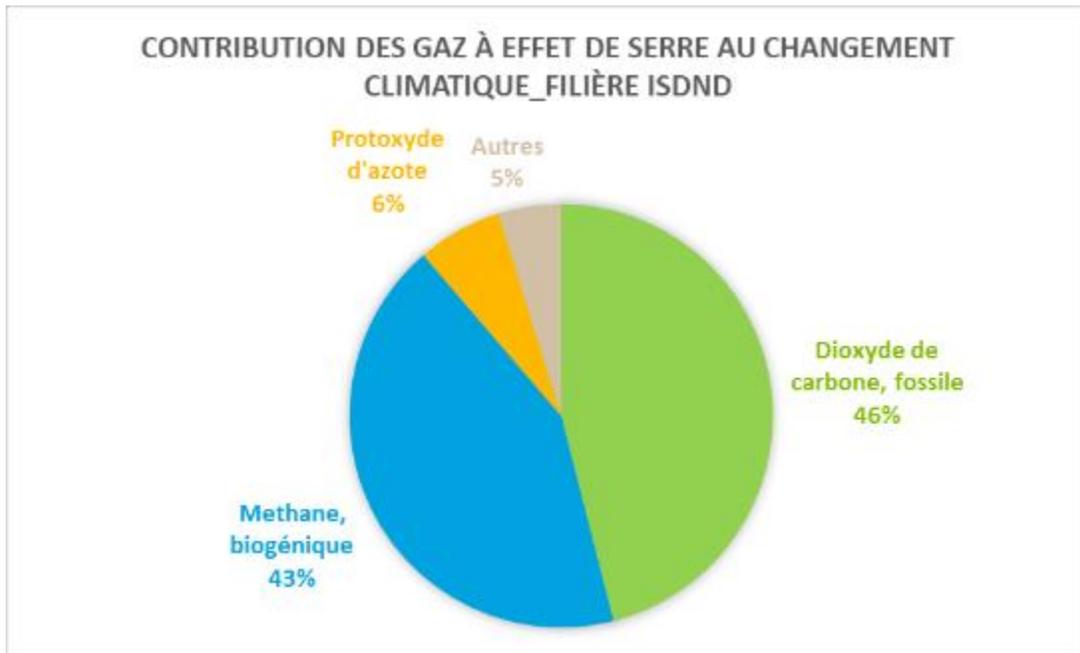


Figure 27 – Contribution des émissions de gaz à effet de serre au changement climatique pour la filière ISDND

STEU

En comparaison aux filières présentées ci-dessus, le facteur d'émission spécifique à la filière STEU est relativement faible avec une valeur de 23,73 g CO₂e/kWh PCI (Figure 28). La majeure partie de ces émissions proviennent du poste d'épuration qui émet 21,01 g CO₂e/kWh PCI soit 89% du FE. La combustion à la chaudière, avec des émissions de 1,69 g CO₂e/kWh PCI contribue à 7% du FE. De la même manière que pour la filière ISDND, les émissions de la filière STEU sont plus faibles que pour les autres filières étant donné que son périmètre commence à l'étape d'épuration. Ce choix méthodologique découle de l'absence de valeur économique des boues d'épuration générées par la filière pour traiter les eaux usées. L'activité de digestion des boues d'épuration est donc considérée ici comme une opération de traitement de déchets affiliée à 100% aux activités de traitement de l'eau, réduisant de fait le périmètre et l'impact du biométhane issu de cette filière. Au sein des autres filières, l'étape d'épuration est déjà parmi les plus impactantes, ce qui s'explique d'abord par les fuites (79% de l'impact de ce poste pour la filière STEU) puis par les consommations d'énergie des différentes technologies d'épuration (19% de l'impact). Sa contribution est de fait d'autant plus importante dans la filière STEU.

Du fait de la concentration de son impact sur l'étape d'épuration, le profil climatique de la filière STEU est particulièrement affecté par les fuites de méthane. Elles représentent 75% de l'impact de la filière dont 99% proviennent de fuites au niveau des procédés. Les émissions restantes proviennent principalement du CO₂ qui contribuent à hauteur de 20% du changement climatique (dont 75% provenant de la consommation d'électricité de la filière et 18% de la consommation d'électricité de la chaudière). Enfin,

les émissions de protoxyde d'azote représentent seulement 3% de l'impact (dont environ 80% provenant de la combustion en chaudière) (Figure 28).

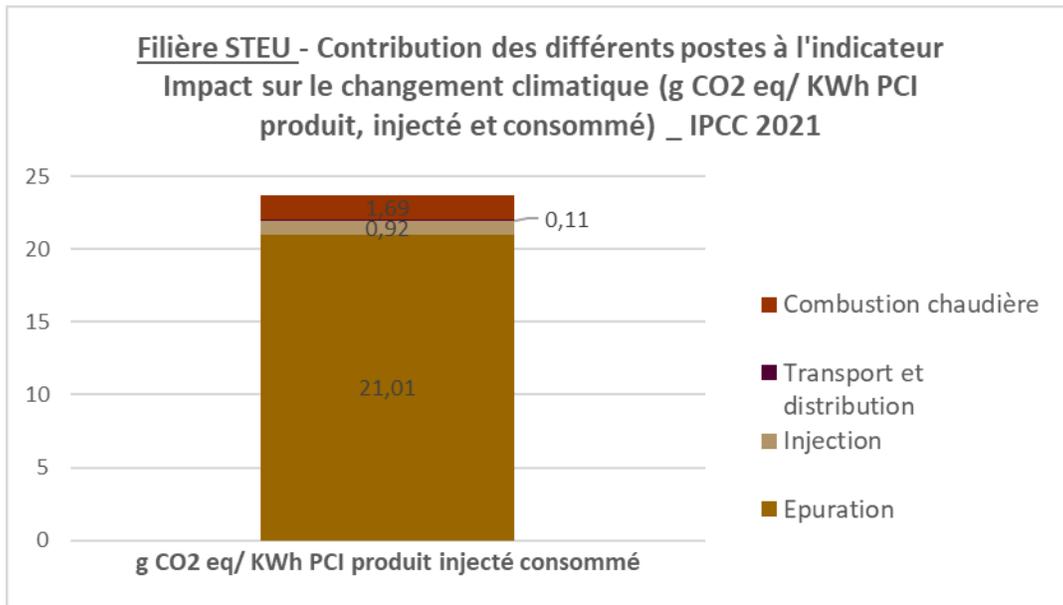


Figure 28 - Résultats pour la méthode par allocation économique de la filière STEU

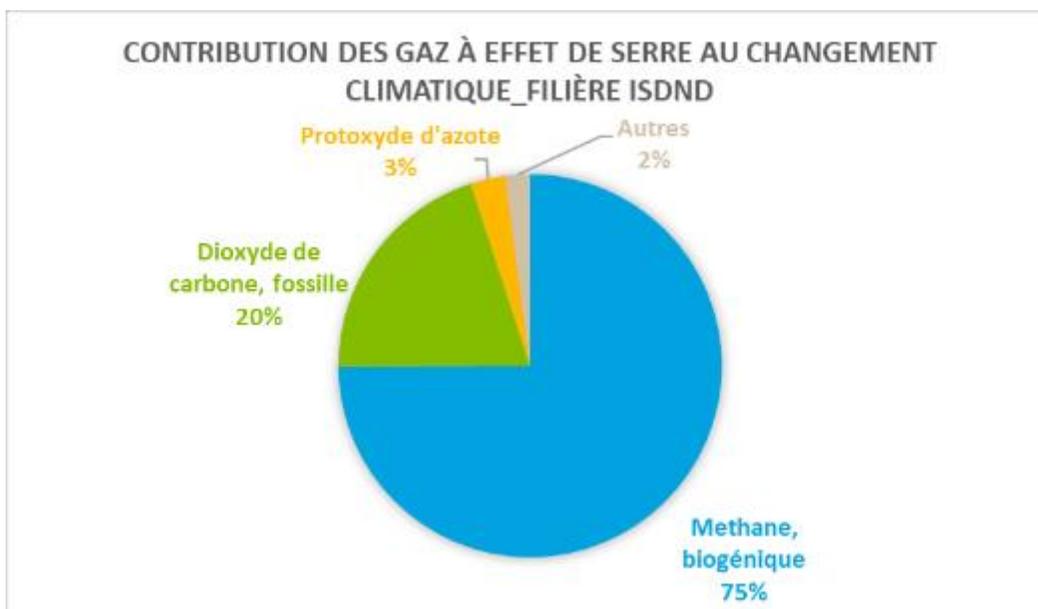


Figure 29 – Contribution des émissions de gaz à effet de serre au changement climatique pour la filière STEU

Biodéchets

Le facteur d'émission spécifique à la filière Biodéchet atteint 50,12 g CO₂e/kWh PCI (Figure 30). Trois étapes participent fortement à l'impact du facteur d'émission : l'épuration avec 19,82 g CO₂e/kWh PCI (40% du facteur d'émission), le traitement de l'air avec 10,24 g CO₂e/kWh PCI (20% du facteur d'émission), et enfin le prétraitement avec 8,30 g CO₂e/kWh PCI (17% du facteur d'émission). Le quatrième poste le plus émetteur, est celui de la digestion qui représente 12% du facteur d'émission avec 6,09 g CO₂e/kWh PCI.

À l'épuration, les émissions proviennent, comme pour les autres filières, majoritairement des fuites (84% de l'impact) et ensuite de la consommation électrique des équipements (15% de l'impact).

Au poste de traitement de l'air, les consommations d'électricité et de soude participent le plus aux émissions et dans des proportions proches (respectivement 36% et 29% de l'impact).

Avec une participation de 20% au FE, l'impact de l'étape de prétraitement peut s'expliquer en grande partie par l'hygiénisation de l'ensemble des intrants de la filière qui augmente les consommations d'énergie (95% de l'impact notamment via la consommation de gaz naturel). Comme dans la filière IT, le broyage participe aux émissions de ce poste mais dans une bien moindre mesure (4% de l'impact).

L'hygiénisation consommant du gaz naturel, la contribution au changement climatique de la filière biodéchets est partagé entre les émissions de CO₂ et de méthane. Les émissions de CO₂ contribuent à hauteur de 47% du changement climatique (dont 28% provenant de la consommation de gaz naturel pour l'hygiénisation de la filière, 29% de la consommation d'électricité de la filière, 16% de la production des produits chimiques pour le traitement de l'air et enfin 8% du transport des intrants), les émissions de méthane biogénique représentent 46% de l'impact (dont 99% proviennent de fuites au niveau des procédés) et enfin, les émissions de protoxyde d'azote représentent seulement 2% de l'impact (dont environ 79% de la combustion en chaudière). Ces dernières sont inférieures aux émissions de méthane fossile qui représentent 4% de l'impact et provenant de la combustion de gaz naturel. (Figure 31).

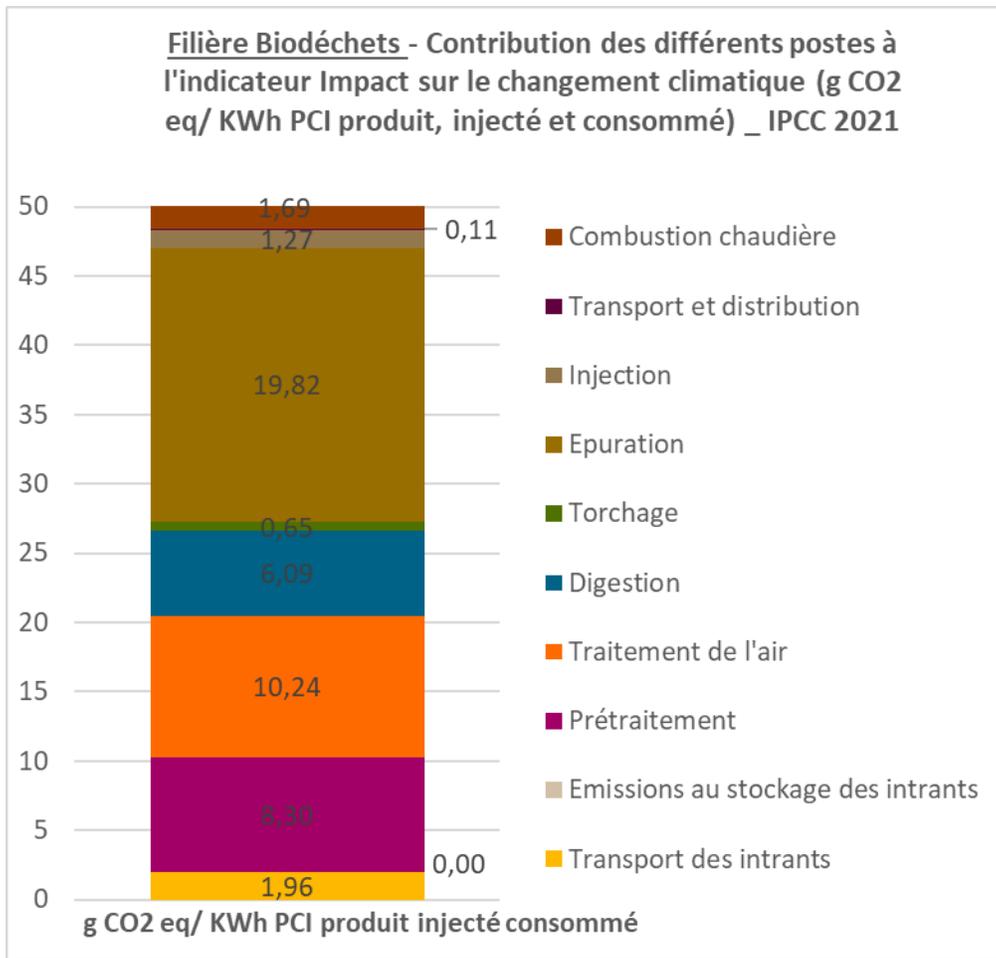


Figure 30 - Résultats pour la méthode par allocation économique de la filière déchets ménagers/biodéchets

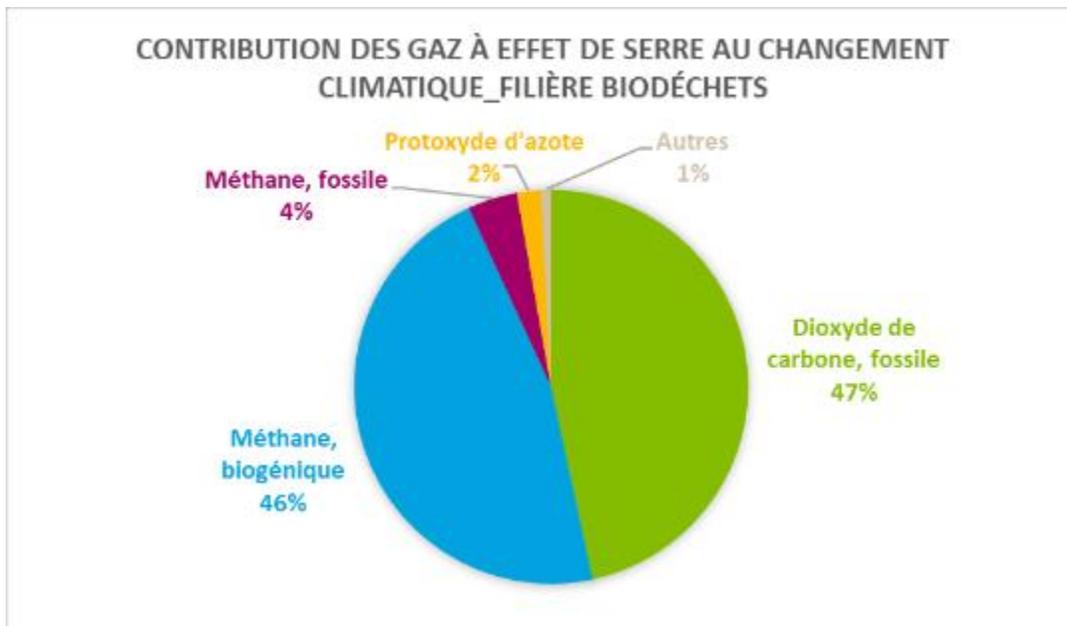


Figure 31 – Contribution des émissions de gaz à effet de serre au changement climatique pour la filière Biodéchets

Bilan général

En synthèse, le facteur d'émission varie selon les filières, de 10,93 g CO₂e/kWh PCI pour la filière ISDND à 50,12 g CO₂e/kWh PCI pour la filière Biodéchets (Figure 32 : Comparaison des filières - contribution des différents postes à l'indicateur Impact sur le changement climatique; Tableau 62 : Comparaison des filières - contribution des différents postes à l'indicateur Impact sur le changement climatique).

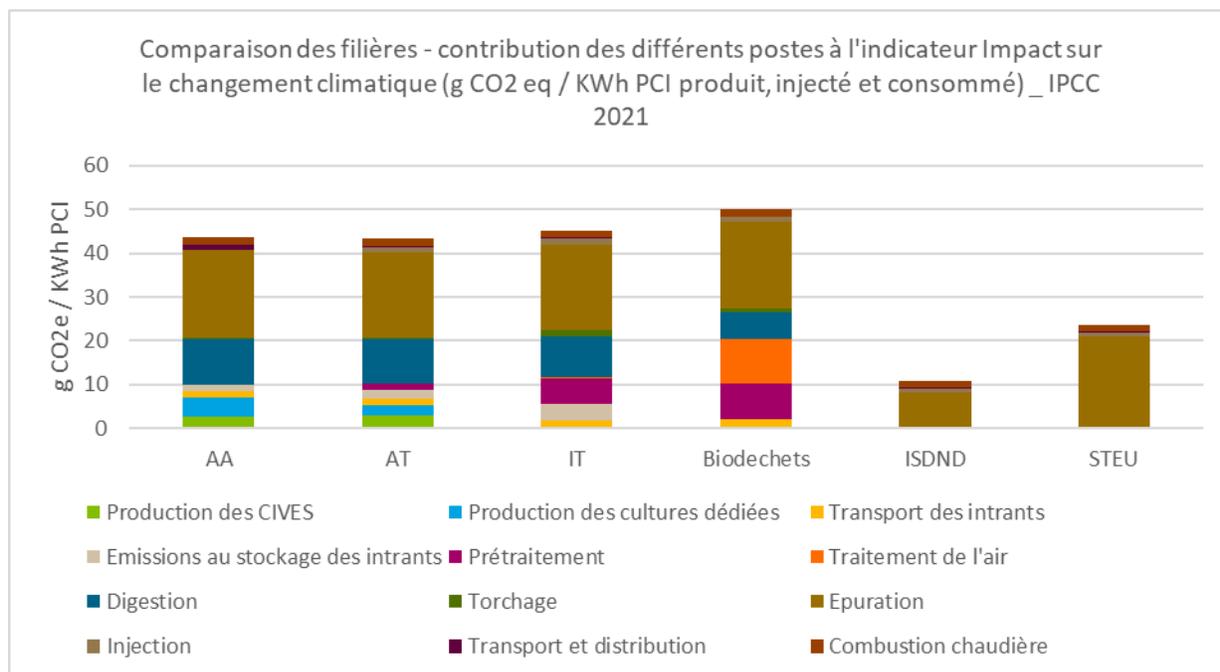


Figure 32 : Comparaison des filières - contribution des différents postes à l'indicateur Impact sur le changement climatique

Tableau 62 : Comparaison des filières - contribution des différents postes à l'indicateur Impact sur le changement climatique

<i>Postes</i>	<i>AA</i>	<i>AT</i>	<i>IT</i>	<i>BD</i>	<i>ISDND</i>	<i>STEU</i>
<i>Production des CIVES</i>	2,72	3,02	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Production des cultures dédiées</i>	4,36	2,21	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Transport des intrants</i>	1,30	1,36	1,88	1,96	0,00	0,00
<i>Emissions au stockage des intrants</i>	1,41	2,18	3,79	0,00	0,00	0,00
<i>Prétraitement</i>	0,25	1,36	5,74	8,30	0,00	0,00
<i>Traitement de l'air</i>	0,00	0,00	0,30	10,24	0,00	0,00
<i>Digestion</i>	10,23	10,26	9,19	6,09	0,00	0,00
<i>Torchage</i>	0,41	0,34	1,39	0,65	0,00	0,00
<i>Epuration</i>	19,97	19,55	19,54	19,82	8,21	21,01
<i>Injection</i>	0,12	1,14	1,51	1,27	0,92	0,92
<i>Transport et distribution</i>	1,11	0,11	0,22	0,11	0,11	0,11
<i>Combustion chaudière</i>	1,69	1,69	1,69	1,69	1,69	1,69
Total	43,56	42,30	45,24	50,12	10,93	23,73

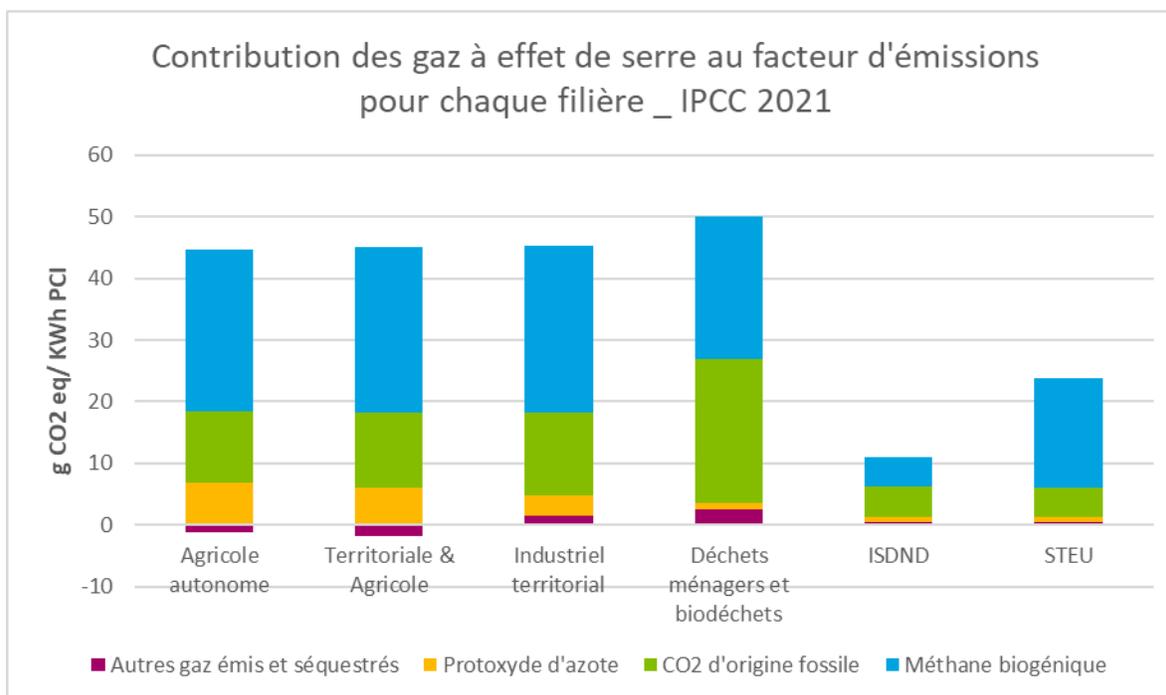


Figure 33 – Contribution des émissions et de la séquestration de gaz à effet de serre au changement climatique pour l'ensemble des filières

L'analyse des six filières constitutives de la filière biométhane a mis en avant la contribution quasi exclusive de trois gaz à effet de serre : le méthane biogénique, le dioxyde de carbone d'origine fossile et le protoxyde d'azote (Figure 33).

Le protoxyde d'azote est émis principalement au niveau de la fertilisation des cultures (CIVE et cultures dédiées) et du stockage des effluents d'élevage, alors que le dioxyde de carbone d'origine fossile provient principalement des transports des intrants, de la consommation de fuel des engins agricoles et enfin, de l'utilisation de gaz naturel pour les filières ayant besoin d'une hygiénisation. Les autres gaz à effet de serre résiduels impactant le changement climatique sont des gaz issus des fumées de combustion mais également du dioxyde de carbone séquestré par l'application de digestat dans les cultures, expliquant les valeurs négatives pour les filières AA et AT.

Enfin, le méthane biogénique est en grande majorité émis sous forme de fuite au niveau de la digestion et de l'épuration mais également du torchage et de l'injection (Figure 33 – Contribution des émissions et de la séquestration de gaz à effet de serre au changement climatique pour l'ensemble des filières).

Le taux de fuite est donc un paramètre structurant de la présente étude qui influe de manière conséquente sur les impacts sur le changement climatique de la filière biométhane. Au bilan sur le mix, les fuites de méthane biogénique sont à hauteur de 57,9% du facteur d'émission du biométhane.

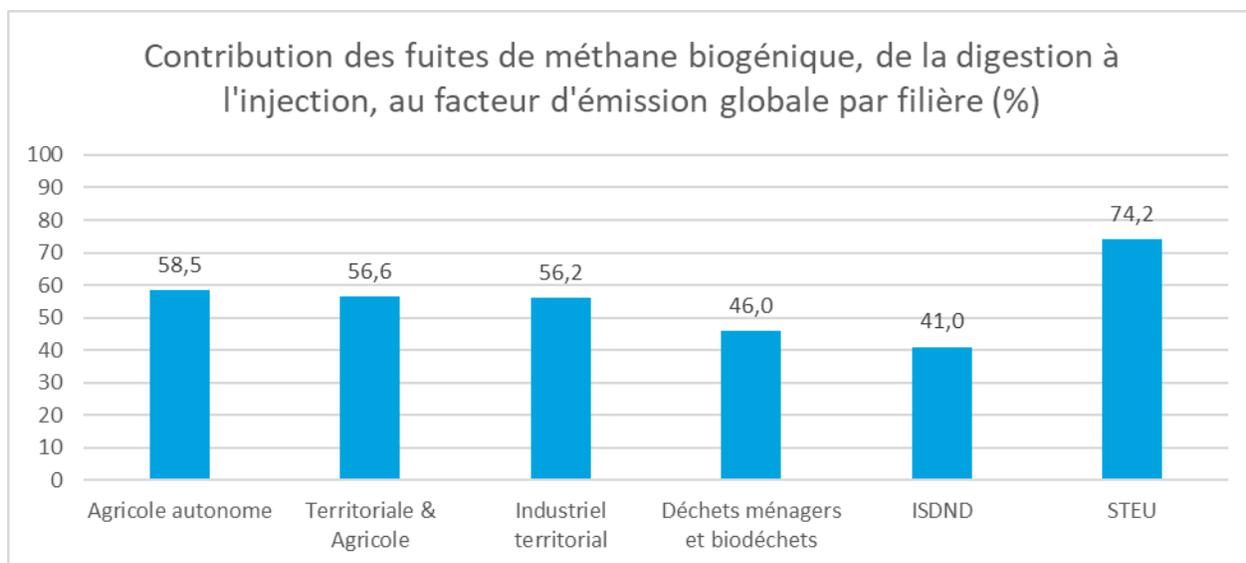


Figure 34 – Contribution des fuites de méthane biogénique, du niveau de la digestion à l'injection, au changement climatique pour l'ensemble des filières

6.2. Résultats multi-indicateurs (méthode EF 3.0)

6.2.1. Résultats du mix de production du biométhane en France

Différents types de résultats sont présentés dans ce rapport pour la méthode EF3.0 :

- **Résultats de caractérisation** : Ce sont les contributions relatives (en %) des différentes étapes du cycle de vie ou postes d'émissions à différentes catégories d'impacts. Ces résultats permettent d'attribuer un « poids » à chaque étape du cycle de vie, à chaque processus ou à chaque flux du système modélisé pour chaque indicateur.
- **Résultats de score unique** : Ce sont des scores agrégés avec les différentes catégories d'impact permettant une interprétation des résultats plus simples. Pour arriver à agréger les catégories d'impacts, la méthodologie 3.0 normalise les résultats de caractérisation permettant de donner plus de poids aux catégories d'impact ayant une valeur supérieure à l'impact d'un européen moyen. La normalisation remet en perspective l'importance d'une catégorie d'impact à la vue de la valeur obtenue dans l'étude. Cela permet de mettre en avant les impacts environnementaux les plus conséquents de la filière étudiée. Les résultats normalisés sont ensuite pondérés en fonction de l'importance de l'enjeu environnemental et de la robustesse scientifique de l'indicateur. Par exemple, le changement climatique est considéré comme un enjeu majeur et dont la robustesse scientifique de l'indicateur est forte, par conséquent son facteur de pondération est élevé. La somme des valeurs normalisés et pondérés de chaque catégorie d'impact constitue le score unique. Pour plus d'informations sur le score unique, veuillez consulter : <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/EnvironmentalFootprint.html>

La pondération des catégories d'impacts pour la conception du score unique est décrite dans la Figure 35.

The recommended weighting set, robustness factors and final weighting factors for all midpoint impact categories¹

	Aggregated weighting set	Robustness factors	Intermediate Coefficients	Final weighting factors (incl. robustness)
	(A)	(B)	C=A*B	C scaled to 100
Climate change	12.90	0.87	11.18	21.06
Ozone depletion	5.58	0.60	3.35	6.31
Human toxicity, cancer effects	6.80	0.17	1.13	2.13
Human toxicity, non-cancer effects	5.88	0.17	0.98	1.84
Particulate matter	5.49	0.87	4.76	8.96
Ionizing radiation, human health	5.70	0.47	2.66	5.01
Photochemical ozone formation, human health	4.76	0.53	2.54	4.78
Acidification	4.94	0.67	3.29	6.20
Eutrophication, terrestrial	2.95	0.67	1.97	3.71
Eutrophication, freshwater	3.19	0.47	1.49	2.80
Eutrophication, marine	2.94	0.53	1.57	2.96
Ecotoxicity freshwater	6.12	0.17	1.02	1.92
Land use	9.04	0.47	4.22	7.94
Water use	9.69	0.47	4.52	8.51
Resource use, minerals and metals	6.68	0.60	4.01	7.55
Resource use, fossils	7.37	0.60	4.42	8.32

Figure 35 : Construction des facteurs de pondération pour chaque catégorie d'impact de la méthodologie EF3.0 pour la conception du score unique ([//doc.agribalyse.fr/documentation/methodologie-acv](http://doc.agribalyse.fr/documentation/methodologie-acv))

Il est important de noter que l'indicateur « Resource use, fossils » prend en compte également l'extraction d'uranium et va donc au-delà de l'extraction de ressources fossiles telles que le pétrole, le charbon ou le gaz naturel. Etant donné, la contribution conséquente de la consommation d'électricité française à cet indicateur, et pour éviter toute erreur d'interprétation, il est proposé, dans la suite de rapport de nommer cet indicateur : Utilisation de ressources énergétiques non-renouvelables.

La contribution relative des filières au score unique montre que les filières les plus contributrices au score unique sont AA et AT (Figure 36), essentiellement dû à leur grande part dans le « Panorama biogaz 2021 », soit respectivement, 60% et 26% de la filière biogaz.

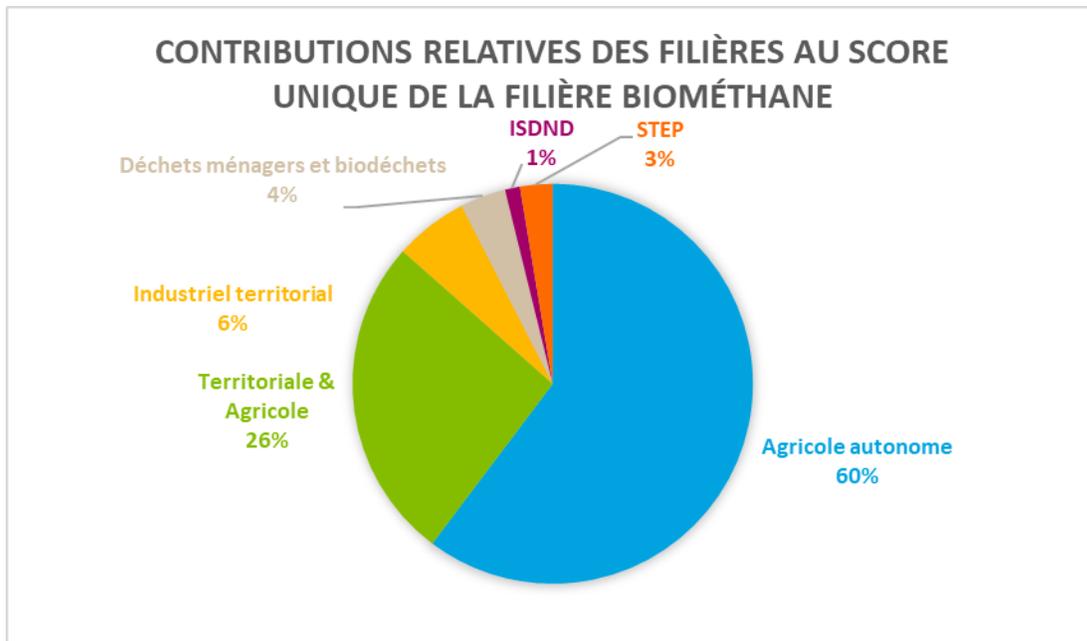


Figure 36 : Contribution relative des filières au score unique de la filière biométhane (méthode EF3.0)

La contribution relative des catégories d'impacts au score unique en Figure 37, montre que les catégories d'impacts les plus contributrices au score unique sont :

- L'utilisation de ressources énergétiques non-renouvelables (22%) avec une consommation d'électricité française majoritairement nucléaire nécessitant d'extraire de l'uranium ;
- Le changement climatique (17%) avec des émissions directes de méthane biogénique sous forme de fuites ;
- L'acidification (9%) avec les émissions d'ammoniac provenant de la fertilisation des cultures ;
- Les radiations ionisantes (9%) avec l'usage d'une électricité majoritairement nucléaire ;
- Les émissions de particules fines (9%), l'eutrophisation terrestre (8%) provenant également de la production d'ammoniac ;
- L'eutrophisation marine (5%) via les émissions de nitrates provenant également de la fertilisation des cultures ;
- L'éco-toxicité des eaux douces (5%) provenant de la production du réseau électrique et de l'électricité nucléaire.

Ces catégories d'impacts pourront donc faire l'objet d'une interprétation spécifique dans les prochaines parties de ce rapport dédiées à l'analyse multicritère de chaque filière.

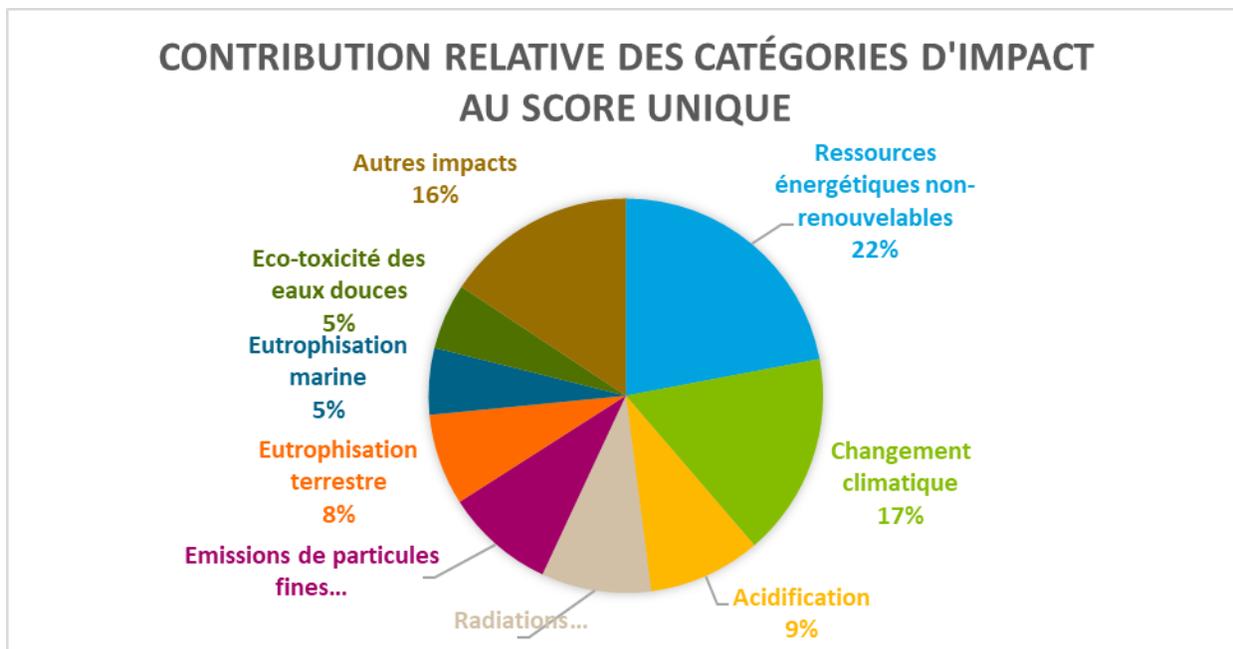


Figure 37 - Contribution relative des catégories d'impact au score unique de la méthode EF3.0

6.2.2. Résultats par filière

Comparaison toutes filières

La Figure 38 compare les scores uniques des filières étudiées et met en perspective l'importance des enjeux environnementaux relatives à chaque filière tout en donnant un ordre de grandeur comparatif de leur impact environnemental global respectif. La Figure 39 renverse la perspective en mettant en avant la contribution des différents postes d'émissions des filières au score unique.

Les scores uniques des filières AA (8,3 μ Pt) et AT (8,0 μ Pt) sont du même ordre de grandeur avec des impacts environnementaux majeurs de même nature et des contributions relatives des postes d'impacts proches. Cette légère différence s'explique principalement par leur mix d'intrants respectifs. En effet, la part plus importante d'intrants agricoles pour la filière AA par rapport à la filière AT augmente légèrement son empreinte environnementale, notamment par le biais d'une plus grande part d'effluents d'élevage (20% de plus en AA). Les cultures (CIVE et cultures dédiées), bien que dans des proportions différentes au sein des deux filières représentent une proportion totale semblable avec 22% en AA et 24% en AT. Ils n'influencent pas majoritairement sur la différence de résultat.

Le profil environnemental de la filière IT comporte logiquement beaucoup moins d'impact relatif à la production agricole (eutrophisation, acidification, éco-toxicité, particules fines). Les impacts additionnels de cette filière associés au prétraitement et au traitement de l'air restent globalement faibles par rapport aux émissions de la fertilisation des productions agricoles des filières AA et AT. Le score unique de cette filière s'établit à 5,7 μ Pt.

La filière Biodéchets a le plus grand score unique des filières étudiées (9,3 μ Pt) à cause de ses consommations plus importantes de ressources énergétiques non-renouvelables et d'eau au niveau du pré-traitement et du traitement de l'air. Le traitement de l'air a un impact environnemental majeur pour cette filière.

Enfin, les filières ISDND et STEU, dont le périmètre d'étude ne prend pas en compte la production, le stockage et le traitement d'intrants ainsi que la digestion, atteignent un score unique respectif de 3,1 et de 3,3 μ Pt. Le profil environnemental de ces filières est identique et représente le profil de l'aval de la filière biométhane dans son ensemble.

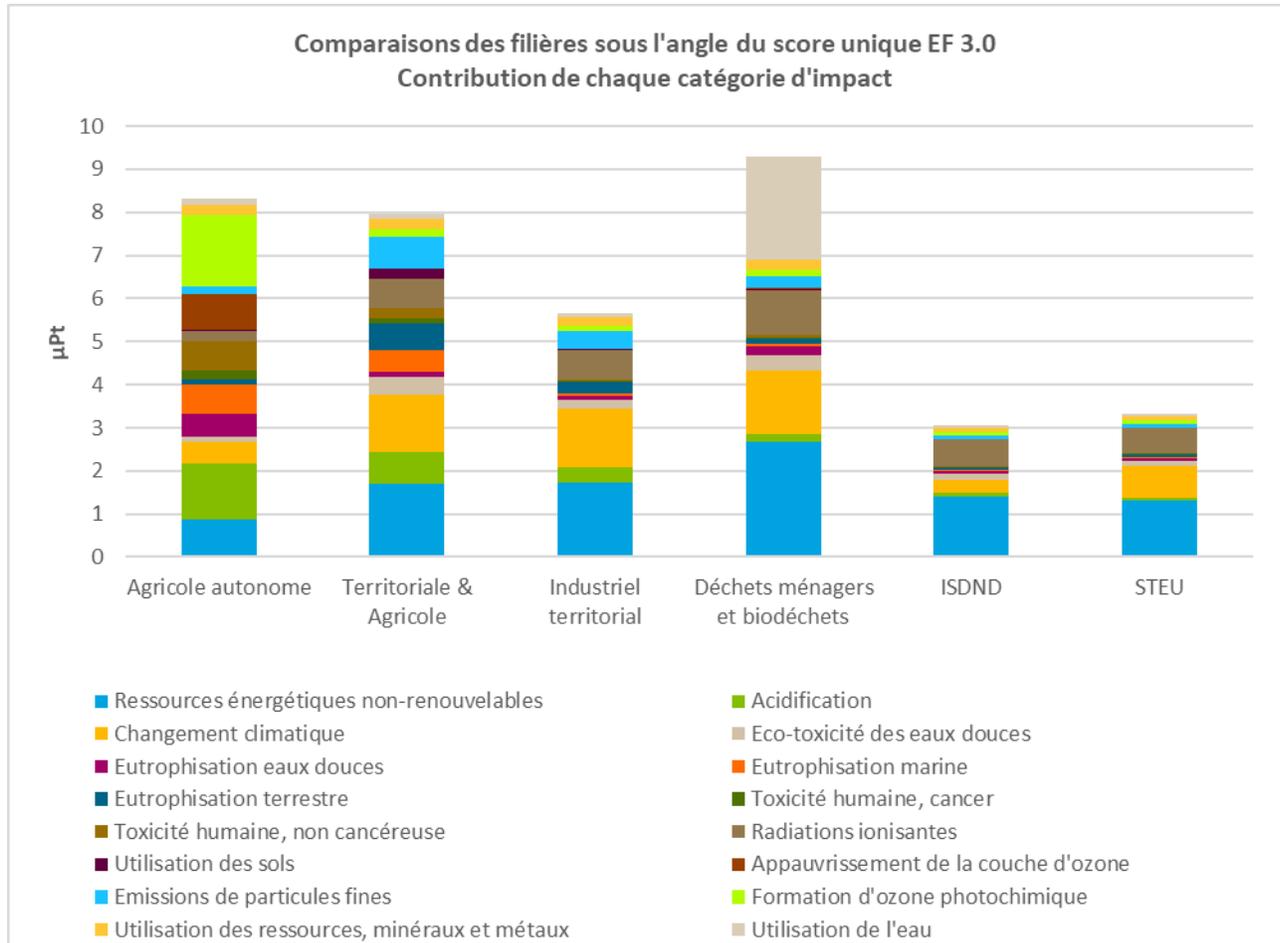


Figure 38 - Comparaison des scores uniques et des contributions de chaque catégorie d'impact pour chaque filière

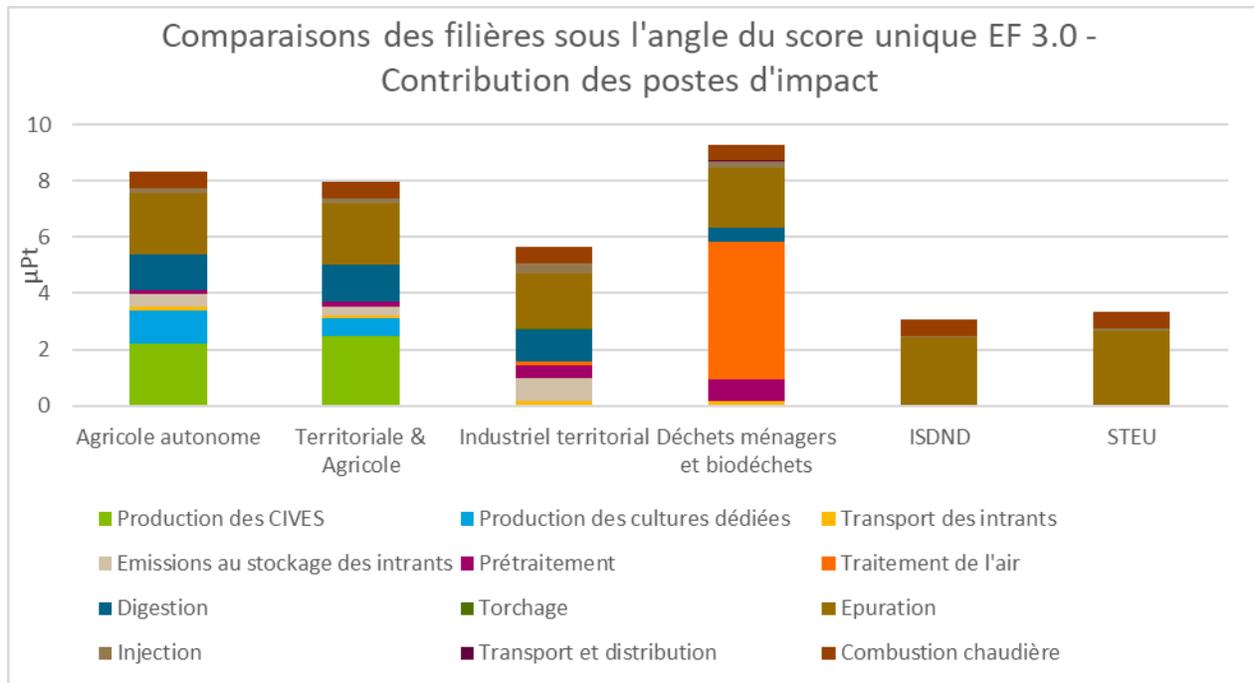


Figure 39 - Comparaison des scores uniques et des contributions de chaque poste d'impact pour chaque filière

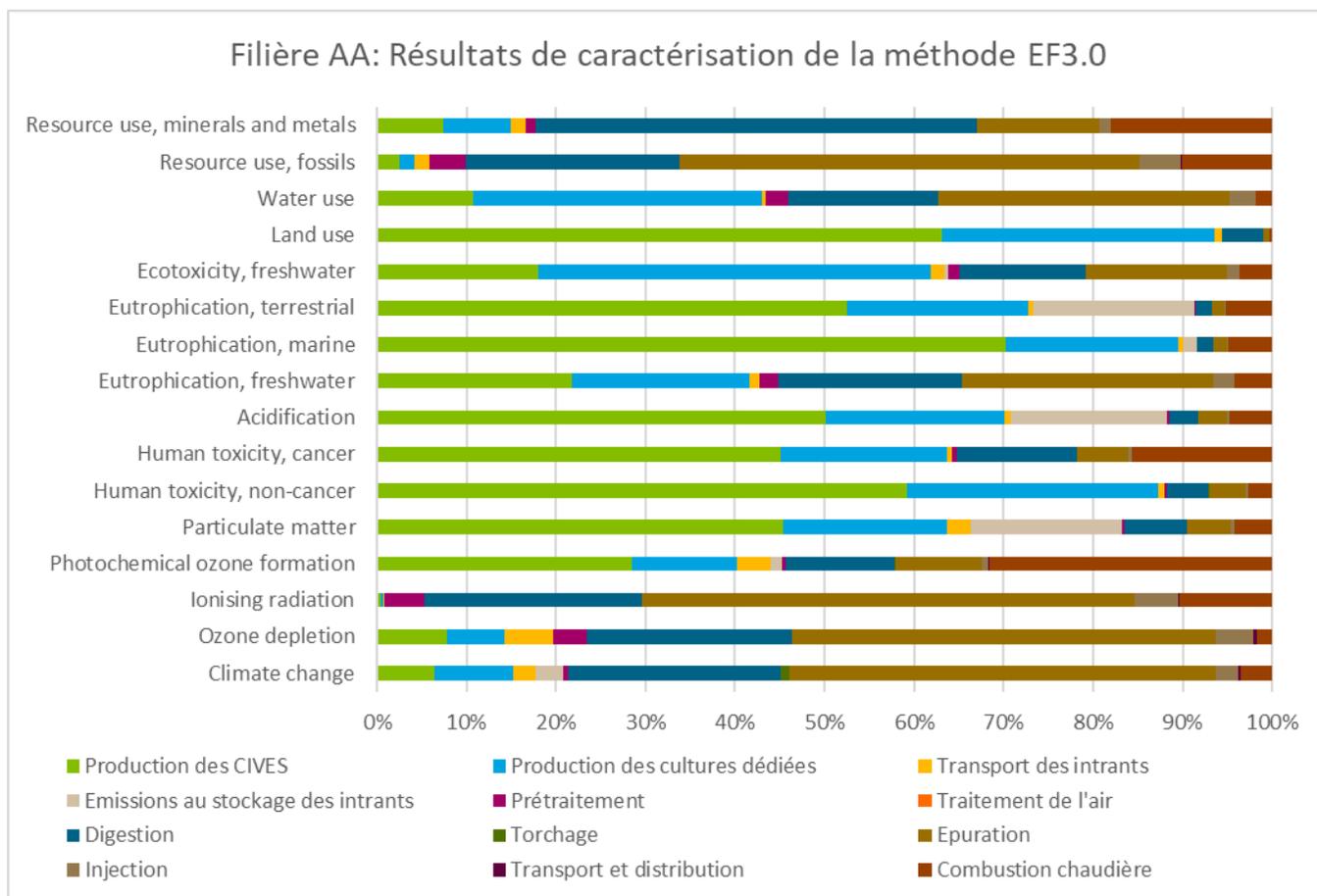


Figure 40 - Résultats EF3.0 pour la méthode par allocation économique de la filière AA

Les impacts environnementaux de la filière AA (Figure 40) proviennent principalement de la production des CIVE (27% du score unique), de l'épuration (26%), de la digestion (15%) et de la production des cultures dédiées (14%). Ces étapes du cycle de vie du biométhane comportent des enjeux sur plusieurs catégories d'impacts environnementaux notamment :

- L'utilisation de ressources énergétiques non-renouvelables via majoritairement la consommation d'électricité (82% de l'impact) nécessaire pour faire fonctionner la filière biométhane. La consommation électrique est française et comporte donc une forte part d'électricité nucléaire. La filière nucléaire a besoin d'extraire de l'uranium qui est une ressource limitée dans le temps et impacte donc en majorité cet indicateur. C'est l'épuration, plus consommatrice d'électricité, qui contribue pour moitié à cette catégorie d'impact (51%) ;
- Le changement climatique provenant principalement de fuites de méthane au niveau de la digestion et de l'épuration comme expliqué en 6.1.2. Les émissions de méthane biogénique à ces deux postes contribuent pour 59% au changement climatique ;

L'acidification, l'eutrophisation et les émissions de particules fines proviennent majoritairement de la production agricole et notamment de la production des CIVE (51% de l'acidification, 53% de l'eutrophisation terrestre et 46% des émissions de particules fines), des cultures dédiées (20% de l'acidification et de l'eutrophisation terrestre, 18% des émissions de particules fines) et du stockage des effluents d'élevage (18% de l'acidification, de l'eutrophisation terrestre et 17% des émissions de particules fines). La production agricole nécessite en effet d'appliquer des engrais et du digestat qui génèrent des

émissions d'ammoniac impactant ces trois enjeux environnementaux. L'eutrophisation marine est causée principalement par les émissions de nitrates.

A noter que le transport des intrants a un impact relativement faible par kWh produit pour l'ensemble des catégories d'impact et que la distribution du gaz est anecdotique du point de vue environnemental. Enfin, la combustion du biométhane ne figure pas parmi les plus importants postes d'émissions car le CO₂ émis est principalement biogénique et son impact sur le changement climatique est considéré comme nul dans la méthode EF3.0.

Agricole Territorial

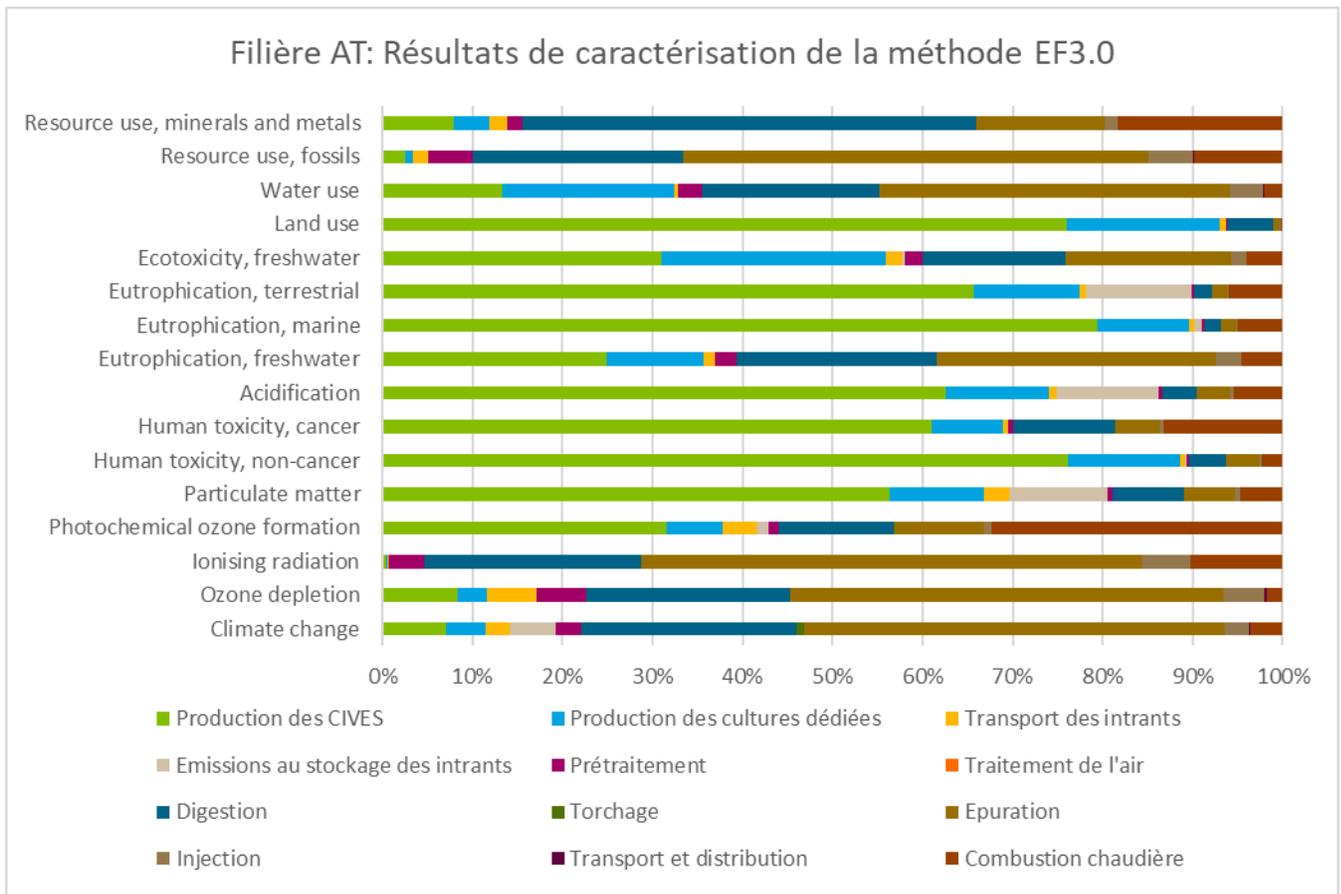


Figure 41 - Résultats EF3.0 pour la méthode par allocation économique de la filière AT

Les impacts environnementaux de la filière AT (Figure 41) proviennent principalement de la production des CIVE (32% du score unique), de l'épuration (28%), de la digestion (16%) et de la production des cultures dédiées (8%). Les postes d'impact sont donc assez proches de la filière AA avec un impact plus conséquent des CIVE par rapport aux cultures dédiées. Ces mêmes étapes du cycle de vie du biométhane comportent des enjeux sur des catégories d'impacts environnementaux similaires à AA :

- L'utilisation de ressources énergétiques non-renouvelables via la consommation d'électricité de l'épuration (52%), du digesteur (24%), du système d'injection (5%) et de la chaudière (10%) de manière similaire à la filière AA ;

- Le changement climatique provenant principalement de fuites de méthane biogénique au niveau de la digestion et de l'épuration (58% pour ces deux postes) comme expliqué en 6.1.2 ;
- L'acidification, l'eutrophisation, et les émissions de particules fines via majoritairement les émissions d'ammoniac comme pour la filière AA avec une contribution respective de ce flux à ces trois indicateurs de 78%, 80% et 76%.

Industriel Territorial

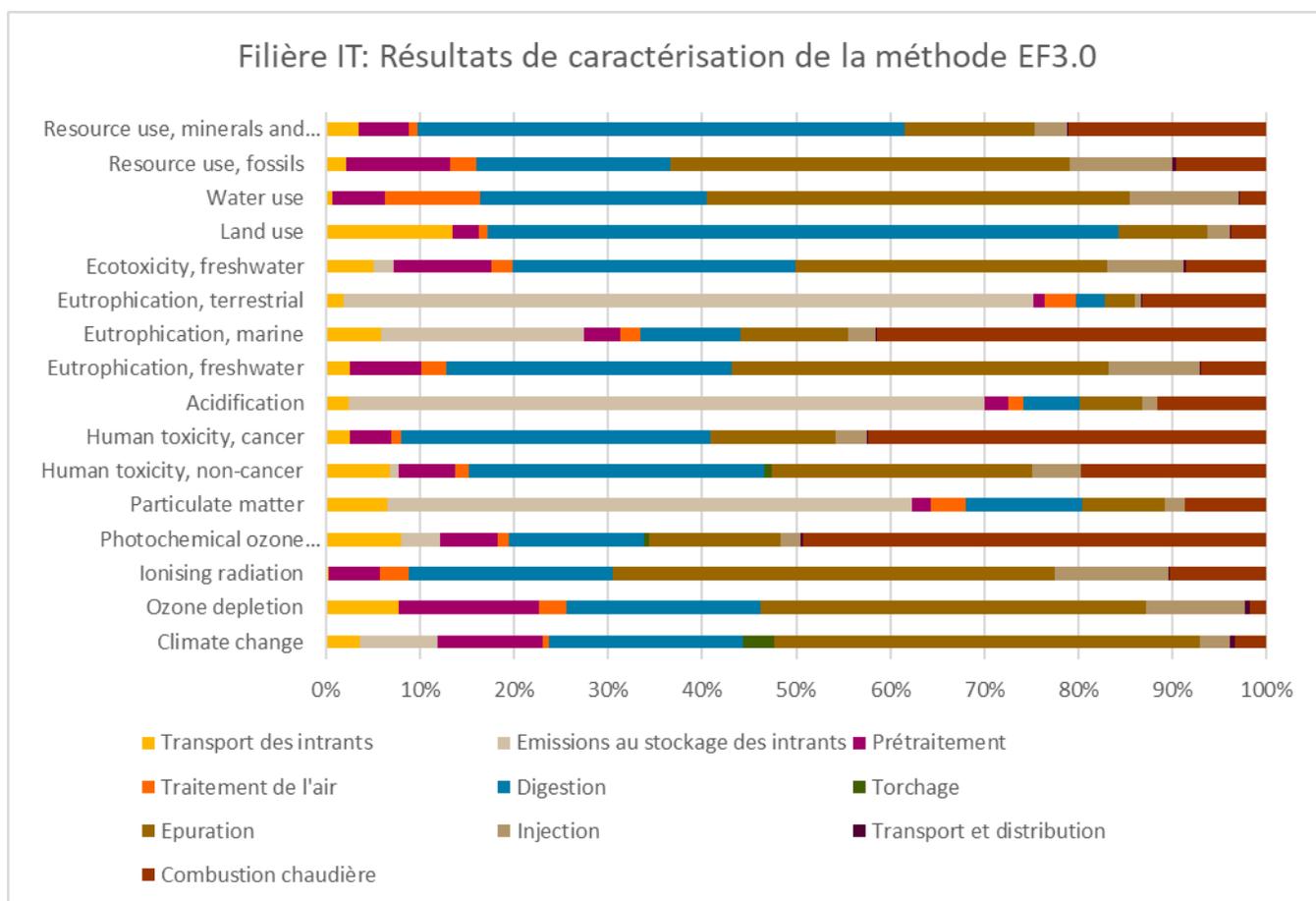


Figure 42 - Résultats EF3.0 pour la méthode par allocation économique de la filière IT

Les impacts environnementaux de la filière IT (Figure 42) proviennent principalement de l'épuration (35% du score unique), de la digestion (20%) des émissions au stockage des intrants (14%), de la combustion à la chaudière (10%) et du prétraitement (8%). Le profil environnemental de la filière IT diffère largement des filières AA et AT via un approvisionnement ne s'appuyant pas sur des cultures agricoles. Cette différence dans les intrants de la filière AT induit l'utilisation d'un procédé supplémentaire tel que le prétraitement et une augmentation des émissions au stockage des intrants. Ces étapes du cycle de vie du biométhane comportent des enjeux sur plusieurs catégories d'impacts environnementaux notamment :

- L'utilisation de ressources énergétiques non-renouvelables et les radiations ionisantes qui sont largement impactées par la production électrique française comme pour les filières AA et AT. C'est l'épuration qui contribue respectivement à chaque indicateur à hauteur de 43% et 47% ;

- Le changement climatique provenant principalement de fuites de méthane au niveau de la digestion et des pertes à l'épuration (55% pour ces deux postes) comme expliqué en 6.1.2. A cela, se rajoute la consommation de gaz naturel au niveau du pré-traitement (11%) et des émissions accrues de protoxyde d'azote et de méthane au niveau du stockage des intrants (8%) ;
- L'eutrophisation terrestre, l'acidification et les émissions de particules fines sont impactées principalement par le stockage des intrants (respectivement 73%, 68% et 56%) avec ses émissions d'ammoniac.

ISDND

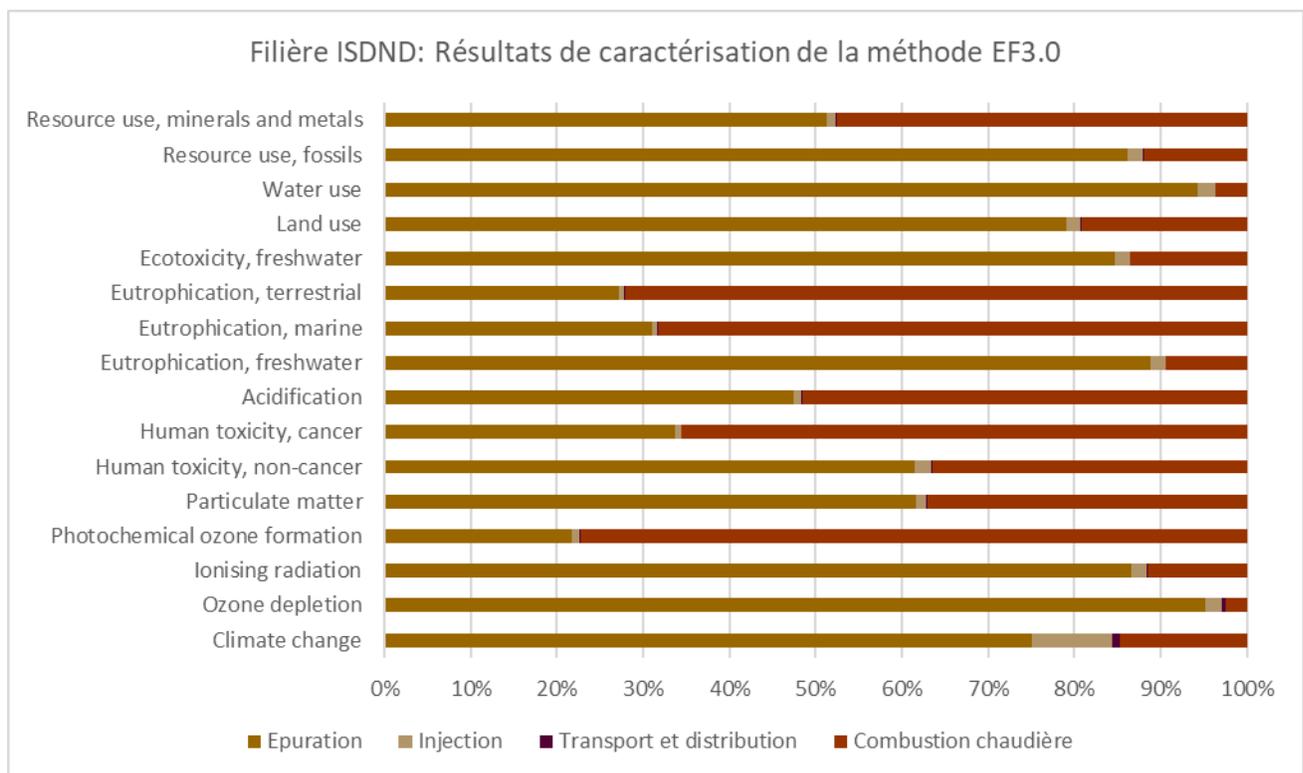


Figure 43 - Résultats EF3.0 pour la méthode par allocation économique de la filière ISDND

La filière ISDND comporte un périmètre différent des filières précédemment étudiées, ce qui explique une analyse des résultats se concentrant sur l'aval de la filière biométhane.

Les impacts environnementaux de la filière ISDND (Figure 43) proviennent principalement de l'épuration (79% du score unique) et de la combustion (19%). Ces étapes du cycle de vie du biométhane comportent des enjeux sur des catégories d'impacts environnementaux similaires à l'aval des autres filières :

- L'utilisation de ressources énergétiques non-renouvelables et les radiations ionisantes provenant de la consommation d'électricité nucléaire nécessaire pour le procédé d'épuration (respectivement 86% et 88% de l'impact des indicateurs) et pour le fonctionnement de la chaudière (12% pour les deux indicateurs) ;
- Le changement climatique provenant principalement de fuites de méthane au niveau de l'épuration et de l'injection (44% de l'impact de l'indicateur pour ces deux postes) mais également

de la consommation électrique française (48%) bien que celle-ci soit considérée comme raisonnablement bas carbone.

L'injection et la distribution ont des impacts faibles comme cela est le cas dans les autres filières étudiées.

STEU

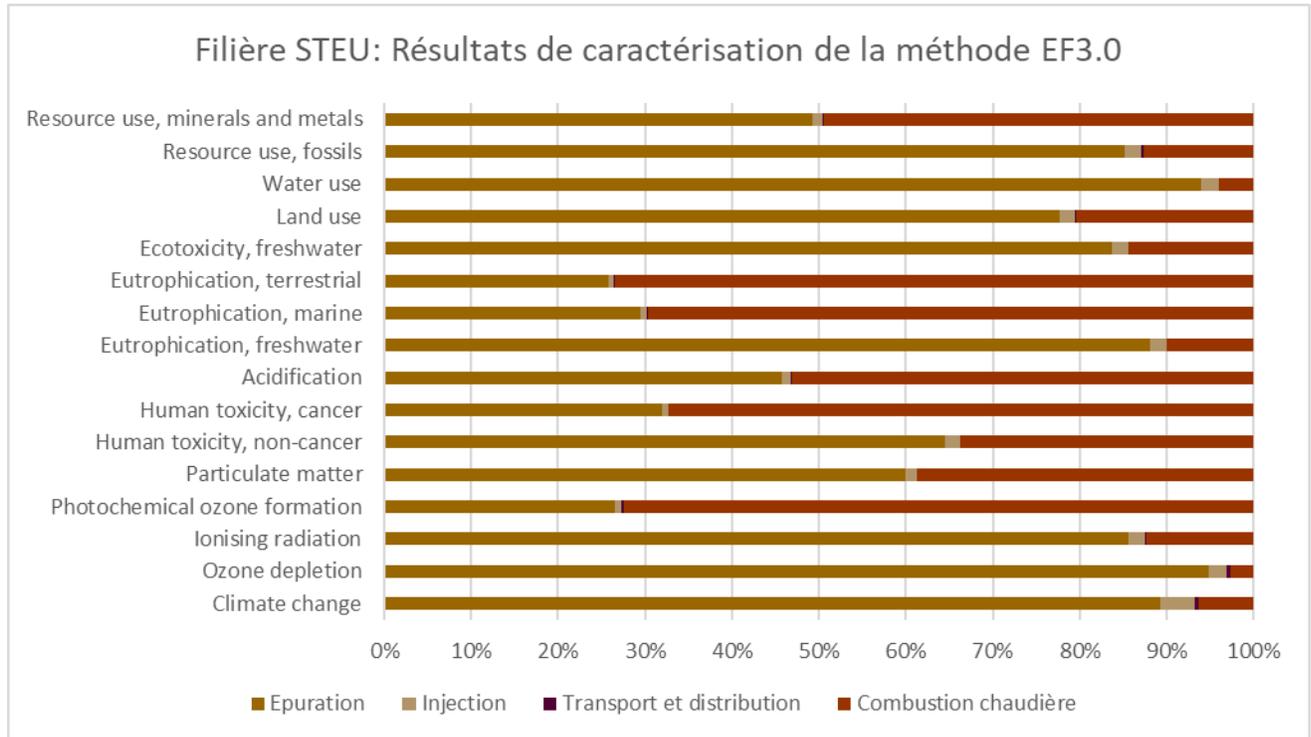


Figure 44 - Résultats EF3.0 pour la méthode par allocation économique de la filière STEU

De la même manière que pour la filière ISDND, la filière STEU comporte un périmètre réduit par rapport aux filières AA, AT et IT.

Les impacts environnementaux de la filière STEU (Figure 44) proviennent principalement de l'épuration (80% du score unique) et de la combustion (17%). Ses impacts sont comparables à la filière ISDND.

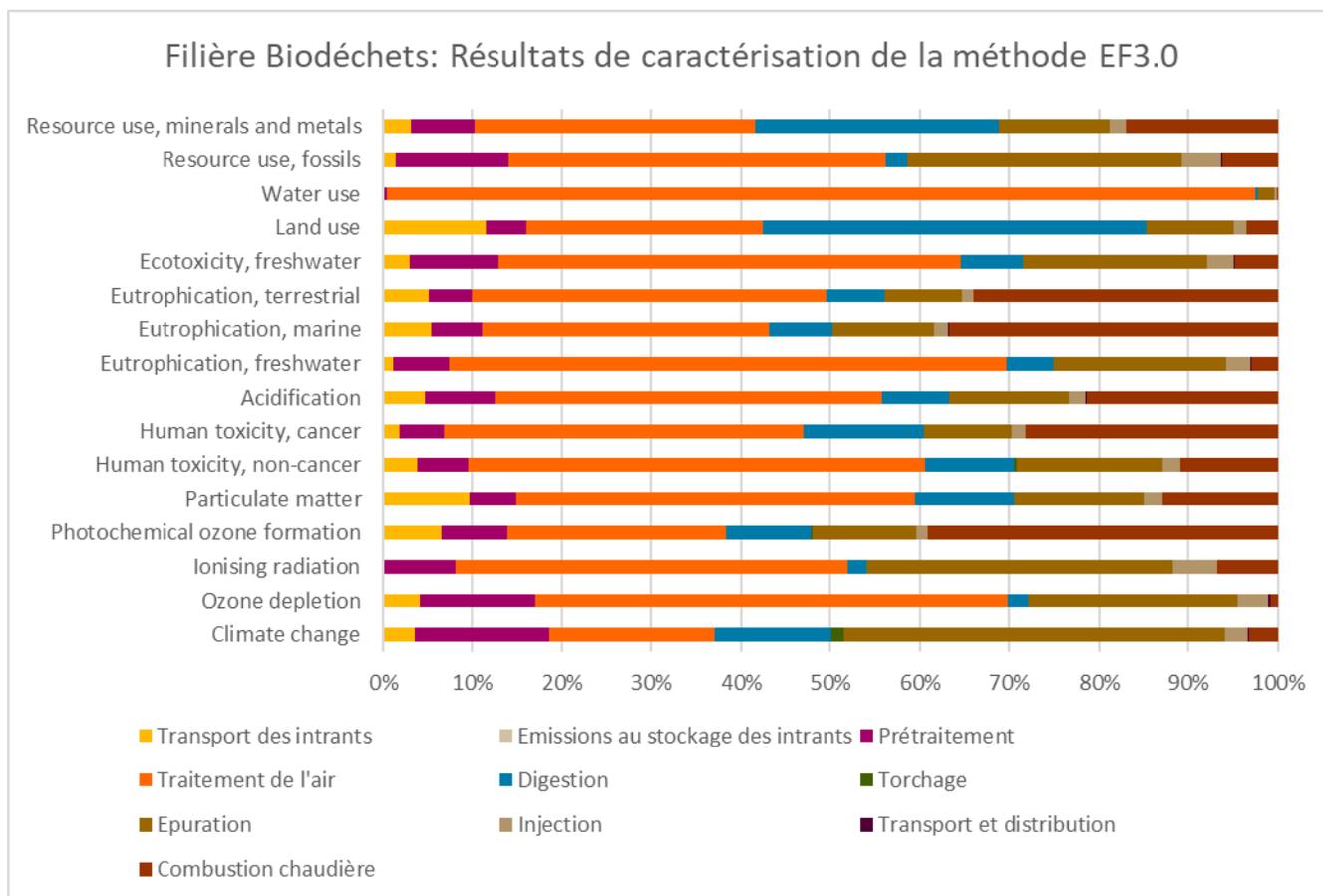


Figure 45 - Résultats EF3.0 pour la méthode par allocation économique de la filière Biodéchets

Les impacts environnementaux de la filière Biodéchets (Figure 45) proviennent principalement du traitement de l'air (53% du score unique), de l'épuration (23%) et du prétraitement (8%). Ces étapes du cycle de vie du biométhane comportent des enjeux sur plusieurs catégories d'impacts environnementaux notamment :

- L'utilisation de ressources énergétiques non-renouvelables via majoritairement la consommation d'électricité (87% de l'impact dont 6% au niveau de la combustion en chaudière) pour faire fonctionner l'unité de méthanisation ;
- Les postes de traitement de l'air et d'épuration consomment la majorité de l'électricité impactant davantage cet indicateur. A noter que l'étape d'hygiénisation dans cette filière consomme du gaz naturel comptant pour 6% de cet indicateur ;
- L'empreinte eau provenant principalement de l'importante consommation d'eau des laveurs au niveau du traitement de l'air (93%) ;
- Le changement climatique provenant principalement de fuites de méthane au niveau de la digestion et de l'épuration (48% pour ces deux postes) comme expliqué en 6.1.2, de la consommation d'électricité du laveur au traitement de l'air et des technologies à l'épuration (14%) et de la consommation de chaleur produite à partir de gaz naturel pour l'hygiénisation (14%) ;
- Les radiations ionisantes provenant de la consommation d'électricité.

7. Analyses de sensibilité

Les hypothèses retenues pour faire varier les paramètres de chacune des analyses de sensibilité sont présentées ci-dessous.

1. La variation de la proportion des CIVE dans le mix d'intrants : AA et AT. La variation de la proportion des effluents d'élevage dans le mix d'intrants : AA.

Au regard des différents contextes agricoles français, des évolutions à venir sur les besoins en biomasse et du sujet croissant des CIVE en méthanisation, la proportion de CIVE est augmentée afin d'atteindre 36% dans le mix d'intrants. Dans la même logique, les effluents d'élevage peuvent occuper un poids différent dans les rations selon le contexte agricole. De fait, les effluents sont les intrants diminués prioritairement afin de compenser l'augmentation des CIVE. Ainsi, l'analyse de sensibilité permet de mesurer l'évolution du facteur d'émission en substituant majoritairement les effluents à la production de CIVE.

Tableau 63 - Evolution du mix d'intrants des filières AA et AT pour l'analyse de sensibilité sur la proportion de CIVE

Substrats	Référence		Analyse de sensibilité	
	AA	AT	AA	AT
Effluents d'élevage	60%	40%	36%	24%
CIVE	15%	20%	36%	48%
Cultures dédiées	6,5%	4%	6%	3,7%
Résidus de cultures	9%	7%	9%	7%
Déchets IAA (hors SPAN)	8,5%	16%	10%	10%
Déchets verts	1%	4%	3%	2,3%
Déchets IAA – SPAN	-	2%	-	2%
Biodéchets	-	7%	-	3%

Les nouvelles proportions de la filière AA (Tableau 63) sont tirées d'une adaptation des données de l'Observation régionale de la méthanisation en région Grand Est²⁸ ainsi que de l'analyse technico-économique de 84 unités de méthanisation agricole¹⁰¹. Les proportions de la filière AT ont été calculées pour la plupart des intrants (effluents d'élevage, CIVE, cultures dédiées et résidus de culture) sur la base de leur pourcentage d'évolution dans la filière AA. Par exemple, la proportion de CIVE dans le mix d'intrants en AA passe de 15% dans le scénario de référence à 36% dans l'analyse de sensibilité, soit une augmentation de leur proportion à hauteur de 140%. Cette augmentation est appliquée au mix en AT pour estimer le nouveau mix de l'analyse de sensibilité. Pour les autres substrats (déchets IAA et SPAN, déchets verts et biodéchets) les données sont directement issues de la référence de l'Observation Grand Est. Le Tableau 64 récapitule les choix réalisés pour la filière AT.

¹⁰¹ Analyse technico-économique de 84 unités de méthanisation agricole, PROdige : programme d'acquisition et de diffusions de références sur la méthanisation agricole, 2022

Tableau 64 : Choix réalisés pour l'évolution des proportions de la filière AT pour l'analyse de sensibilité concernant la proportion de CIVE dans le mix

Substrats	AT	Source de l'évolution des proportions
Effluents d'élevage	24,0%	Application des variations par rapport à AA
CIVE	48,0%	Application des variations par rapport à AA
Cultures dédiées	3,7%	Application des variations par rapport à AA
Résidus de cultures	7,0%	Application des variations par rapport à AA
Déchets IAA (hors SPAN)	10,0%	Application de la donnée de l'Observation Grand Est ²⁸
Déchets verts	2,3%	Calcul = 100% - somme des autres substrats
Déchets IAA - SPAN	2,0%	Maintien de la donnée
Biodéchets	3,0%	Application de la donnée de l'Observation Grand Est ²⁸

2. La variation des proportions de CIVE d'hiver et d'été : AA et AT.

Les évolutions climatiques à venir rendront davantage complexe l'implantation et la réussite des CIVE d'été, compte-tenu de la contrainte hydrique estivale de plus en plus marquée¹⁰². La production de CIVE pourrait donc se diriger en priorité vers des CIVE d'hiver. La proportion de CIVE d'hiver est donc augmentée dans cette analyse : 75% de CIVE d'hiver et 25% de CIVE d'été (respectivement 54% et 46% dans la référence).

3. L'autoconsommation de biogaz pour l'étape d'hygiénisation à la place du gaz naturel pour toutes les filières comportant des intrants hygiénisés : AT, IT et biodéchets.

Dans l'arrêté du 10 juin 2023⁶¹ fixant les conditions d'achat du biométhane injecté dans les réseaux de gaz naturel, Légifrance indique que le fonctionnement de l'unité de méthanisation ne doit pas être satisfait par du charbon ou du gaz naturel d'origine fossile. Cela s'applique notamment à l'étape d'hygiénisation. Une analyse de sensibilité est donc réalisée avec une autoconsommation de biogaz pour cette étape plutôt qu'avec du gaz naturel.

4. La variation du type de stockage du digestat pour les filières : AA, AT et IT.

Le stockage des effluents d'élevage est émetteur de N₂O, NH₃, NO_x, et de CH₄. De fait, la couverture des fosses de stockage est un enjeu important de décarbonation pouvant fortement limiter les émissions. Dans cette analyse, deux situations sont simulées et comparées au scénario de référence :

- Scénario de référence : stockage couvert sans récupération du biogaz (sauf pour IT qui fonctionne avec un système de récupération) ;
- Scénario naturel : stockage ouvert avec lagune et croûte, en AA, AT et IT ;
- Scénario optimum : stockage couvert avec récupération de biogaz en AA et AT.

Dans le scénario de référence, le facteur d'abattement utilisé est de 80%. Ce dernier passe à 70% dans le scénario naturel en cohérence avec la méthodologie de la directive REDII¹⁰³. Cette analyse est modélisée

¹⁰² RECITAL, Capitaliser et valoriser les informations sur les Cultures IntermédiaIRES à Vocation Energétique

¹⁰³ Solagro, INRAE Transfert, Outil de calcul des émissions de GES de la production d'énergie par méthanisation suivant les règles de calcul prévues par la directive RED II – Rapport méthodologique Version 2, 2022

avec la méthode par substitution et extension de frontière étant donné que l'étape de stockage des digestats est hors du périmètre de l'approche par allocation économique.

5. La variation du prix du digestat pour toutes les filières concernées : AA, AT et IT

Dans la référence actuelle utilisée, le prix du digestat est estimé en fonction des prix des unités fertilisantes NPK sur le marché des fertilisants minéraux en excluant l'année 2022 des calculs (car non représentative du marché moyen). Dans cette analyse, le prix de l'azote est basé sur ceux de l'année 2022. Le prix de l'unité d'azote 2022 utilisé est de 2.76€/kg N (1,73€/kg N dans la référence).

6. La variation des taux de pertes de CH₄ pour les filières : toutes les filières

Avec les évolutions de la réglementation ICPE, les émissions au niveau des étapes de digestion, torchage et épuration connaissent des changements importants. Afin de mesurer l'impact de ces trois postes sur les émissions, quatre scénarios sont comparés à la référence :

- Scénario de référence : 0,5% de fuites au digesteur, entre 0,9% et 4,1% de biogaz envoyé en torchère selon la filière*(2,6% d'imbrulé + 0% de fuite à la torchère (torchère automatique)) au torchage, 1% de perte à l'épuration, 0,05% de perte à l'injection ;
- Scénario fuites à la torchère : 0,5% de fuites au digesteur, entre 0,9% et 4,1% de biogaz envoyé en torchère selon la filière*(2,6% d'imbrulé + 1% de fuite à la torchère (torchère automatique)) au torchage, 1% de perte à l'épuration, 0,05% de perte à l'injection. Les filières ISDND et STEU ne sont pas concernées ;
- Scénario réglementation ICPE et bonnes pratiques : **0,05%** de fuites au digesteur, entre 0,9% et 4,1% de biogaz envoyé en torchère selon la filière*(2,6% d'imbrulé au torchage + 0% de fuite à la torchère (torchère automatique)), **0,5%** de perte à l'épuration, 0,05% de perte à l'injection. Toutes les filières sont concernées ;
- Scénario « Meilleures pratiques atteignables » : **0,05%** de fuites au digesteur, entre 0,9% et 4,1% de biogaz envoyé en torchère selon la filière*(2,6% d'imbrulé au torchage + 0% de fuite à la torchère (torchère automatique)), **0,05%** de perte à l'épuration, 0,05% de perte à l'injection. Toutes les filières sont concernées ;
- Scénario valeur pivot : de **0,9% à 4,3%** de fuites selon les filières au digesteur, entre 0,9% et 4,1% de biogaz envoyé en torchère selon la filière*(2,6% d'imbrulé au torchage + 0% de fuite à la torchère (torchère automatique)), 1% de perte à l'épuration, 0,05% de perte à l'injection. Les taux de fuites ont été déterminés via la méthode par substitution. L'objectif est d'évaluer les impacts d'un taux de pertes de méthane qui, s'il était dépassé, rendrait les impacts GES de la filière de méthanisation plus importante que les impacts qu'elle permet d'éviter. Seulement les filières AA, AT et IT sont concernées.

7.1. Modification du mix d'intrants

Dans cette analyse de sensibilité, le mix d'intrants de la filière AA évolue considérablement. Pour rappel, dans ce nouveau scénario :

- La part des effluents d'élevage diminue, passant de 60% à 36% du mix ;
- La part des CIVE augmente, passant de 15% à 36% du mix ;
- La part des cultures dédiées diminue, passant de 6,5% à 6,0% du mix ;
- La part des résidus de culture reste inchangé à 9% du mix ;
- La part des déchets d'IAA (hors SPAN) augmente, passant de 8,5% du mix à 10% ;
- La part des déchets verts triple, passant de 1 à 3%.

L'augmentation consécutive de la part de CIVE induit une augmentation de leurs impacts de 116% (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Cette augmentation d'impact n'est pas compensée par la diminution tout aussi consécutive des effluents d'élevage dont l'impact diminue de 47,9%.

De plus, à tonnage d'intrants constant, l'augmentation de la part de CIVE dans le mix a fait évoluer positivement le potentiel méthanogène du mix d'intrants, conduisant à une augmentation du biométhane produit de 27%. Cette évolution de la production se visualise bien avec la diminution des impacts par kWh produit des cultures dédiées de 19,2% alors que sa part dans le mix est restée relativement stable.

Enfin, la modification du mix entraîne une augmentation de 7,5% des impacts du torchage et de la digestion (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Concernant la filière AT, le mix d'intrants évolue ainsi (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) :

- La part des effluents d'élevage diminue, passant de 40% à 24% du mix ;
- La part des CIVE augmente, passant de 20% à 48% du mix ;
- La part des cultures dédiées diminue, passant de 4% à 3,7% du mix ;
- La part des résidus de culture reste inchangé à 7% du mix ;
- La part des déchets d'IAA (hors SPAN) diminue, passant de 16% du mix à 10% ;
- La part des déchets verts diminue, passant de 4,0% à 2,3%.

L'augmentation consécutive de la part de CIVE induit une augmentation de leurs impacts de 143% (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Cette augmentation d'impact n'est pas compensée non plus par la diminution tout aussi consécutive des effluents d'élevage dont l'impact diminue de 39,8%.

Pour la filière AT l'évolution du mix d'intrants entraîne une augmentation du biométhane produit de 10%. Cette évolution de la production se visualise bien avec la diminution des impacts par kWh produit des cultures dédiées de 8,6% alors que sa part dans le mix est restée relativement stable.

Enfin la modification du mix entraîne une augmentation de 8% des impacts du torchage et de la digestion (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Au bilan, l'évolution du mix d'intrants a un impact fort sur le modèle ACV, et non-négligeable sur le facteur d'émission de gaz à effet de serre avec une augmentation du facteur de 5,6% pour la filière AA et de 7,9% pour la filière AT, combinant effets favorables (augmentation du potentiel méthanogène, diminution des émissions au stockage des effluents d'élevage) et défavorables (augmentation des impacts liés à la fertilisation des CIVE et augmentation de la consommation d'énergie de la filière). Le facteur d'émission passe ainsi de 43,56 g de CO₂e/kWh PCI à 45,99 g de CO₂e/kWh PCI pour la filière AA et de 43,20 g de CO₂e/kWh PCI à 46,63 g de CO₂e/kWh PCI pour la filière AT.

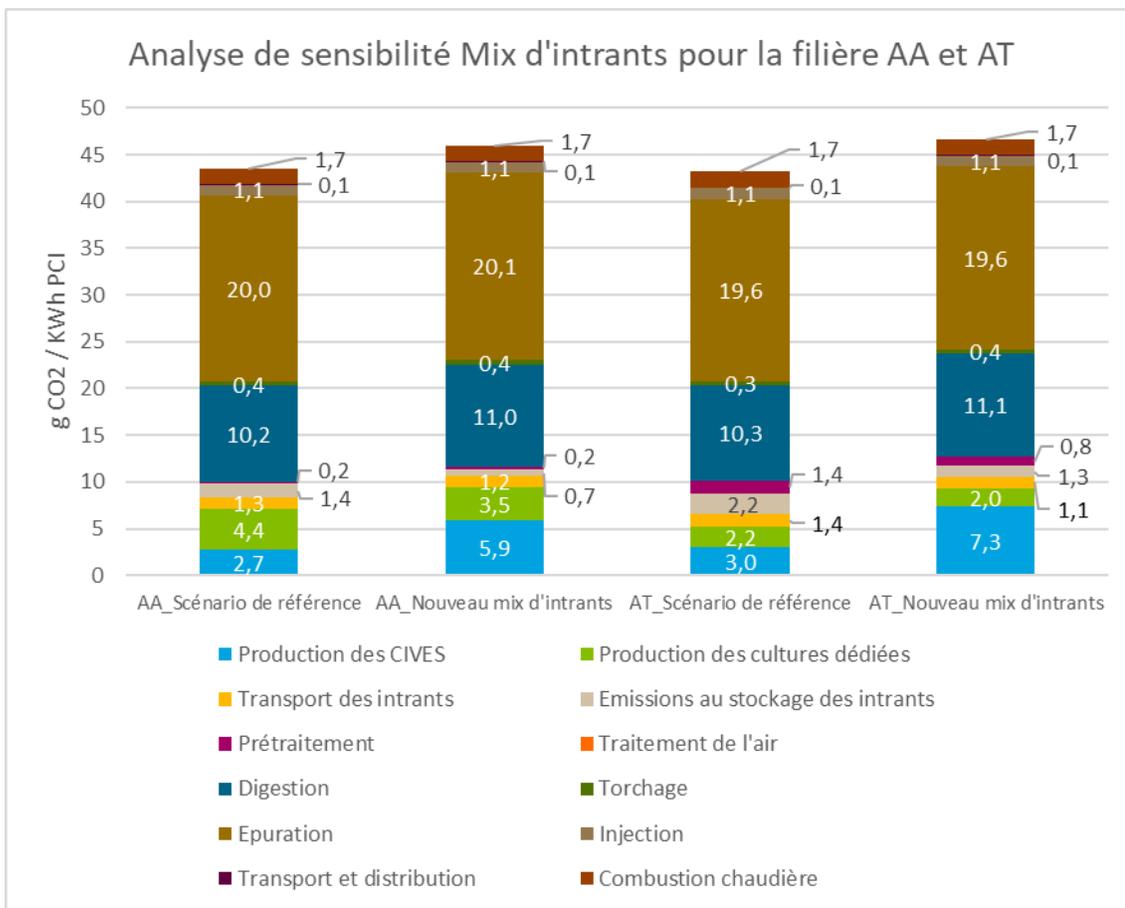


Figure 46 - Analyse comparative entre le scénario de référence et la modification du mix d'intrants pour la filière AA et AT (IPCC2021)

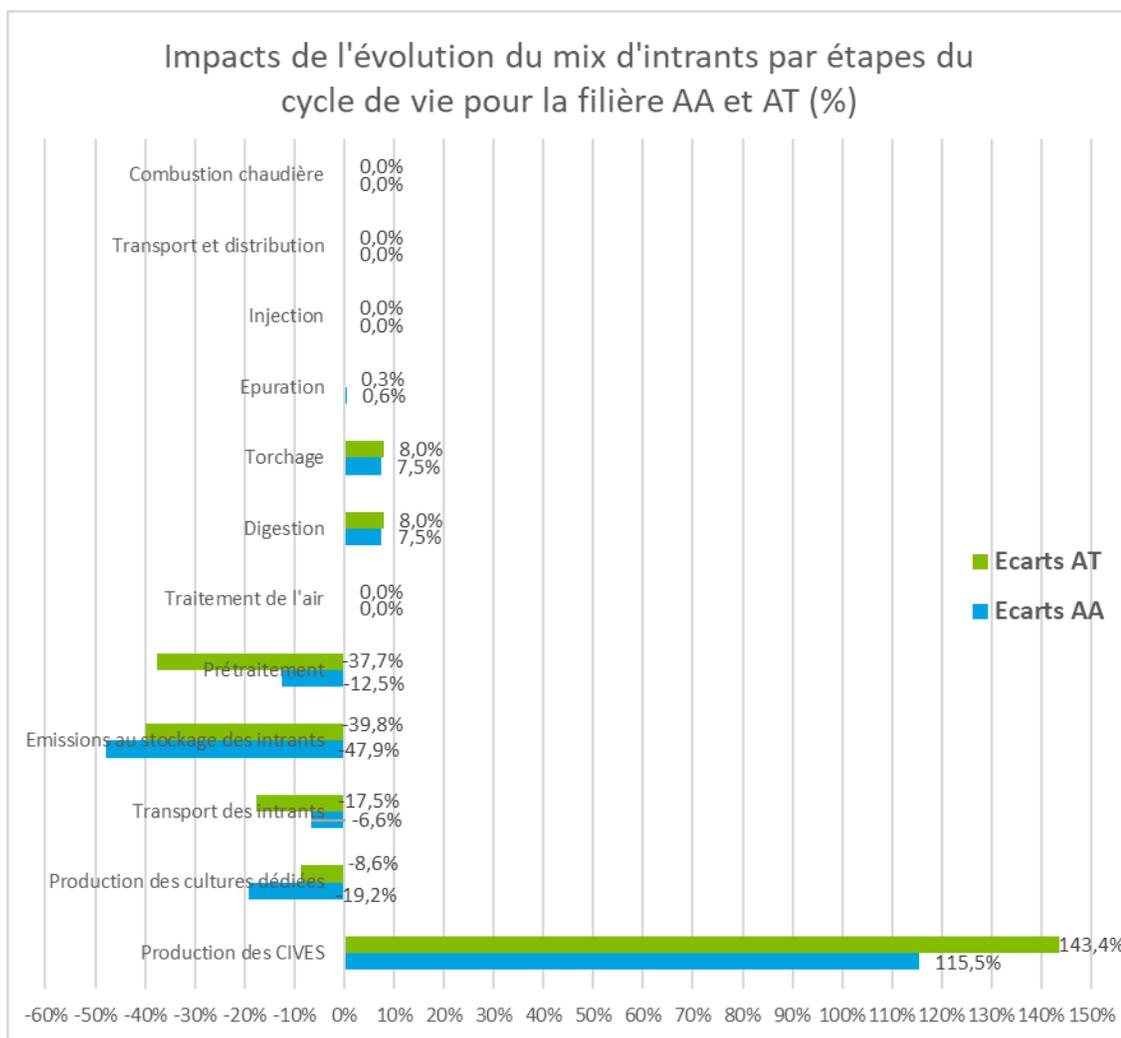
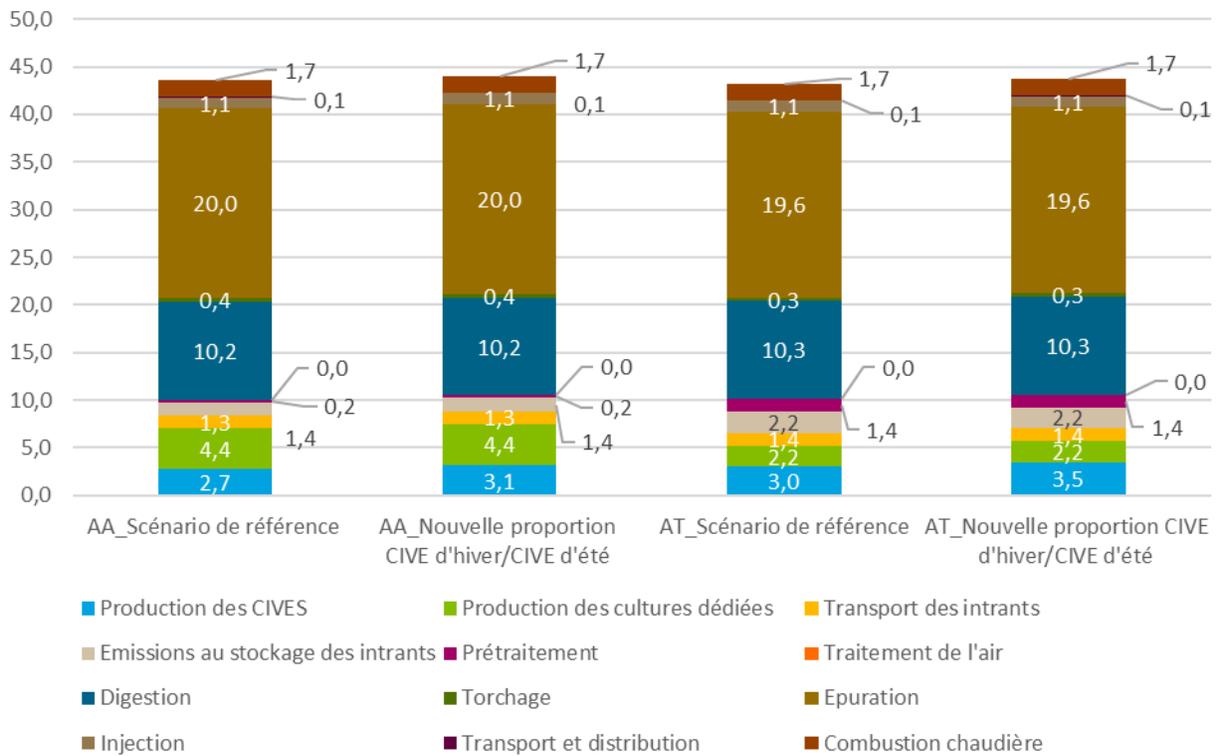


Figure 47 - Impacts de l'évolution du mix d'intrants par étapes du cycle de vie pour la filière AA (IPCC2021)

7.2. Modification de la proportion CIVE d'hiver CIVE d'été

Dans cette analyse de sensibilité la proportion de CIVE d'hiver par rapport à CIVE d'été est passée d'un ratio 54%/46% à un ratio 75%/25%. La modification de cette proportion a un impact faible sur le facteur d'émission de gaz à effet de serre de la

Analyse de sensibilité CIVE d'hiver/CIVE d'été pour les filière AA et AT



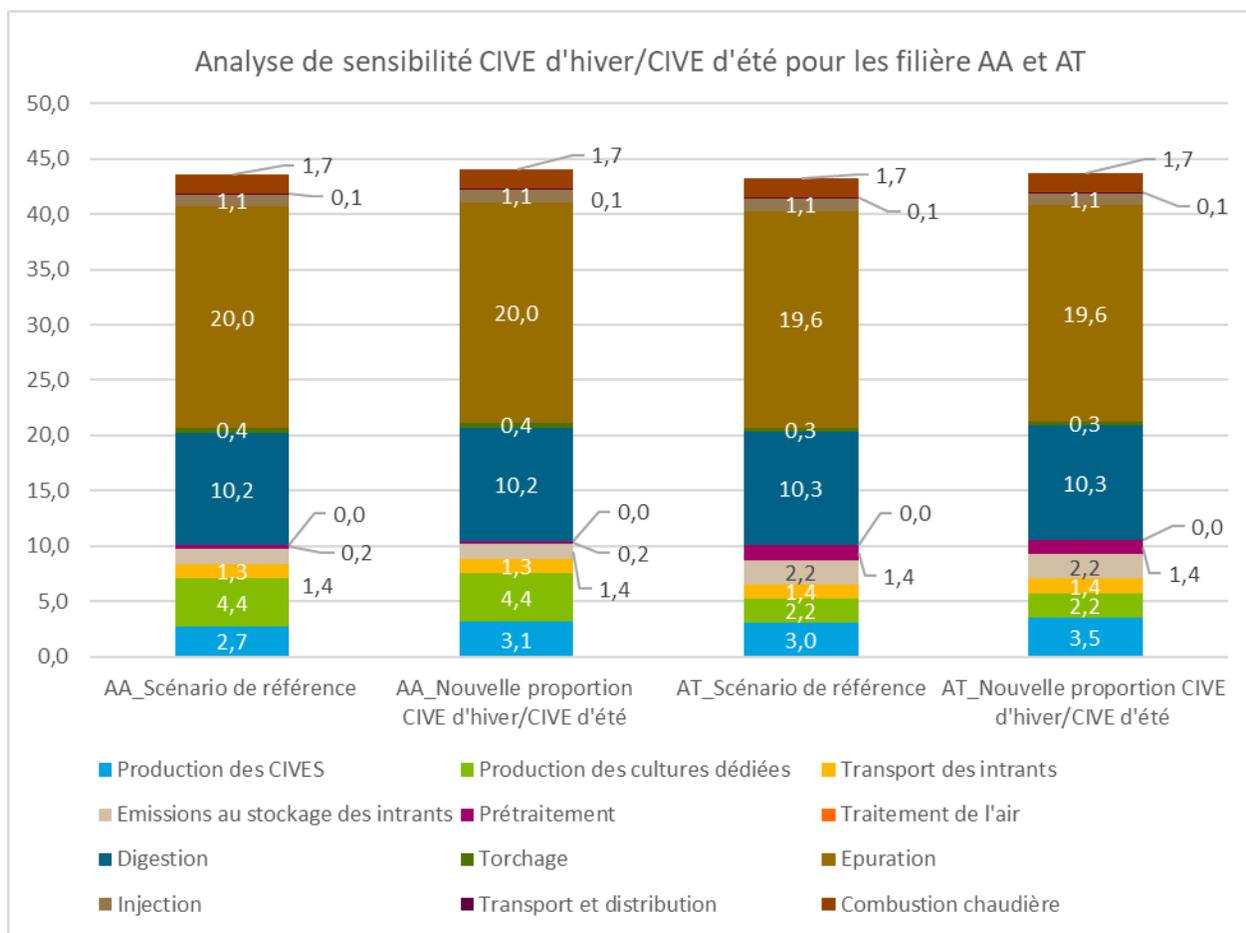


Figure 48). L'augmentation du facteur est de 15,5% pour la production des CIVE en AA et en AT. Cela entraîne une augmentation totale de 1,0% sur l'ensemble de la filière AA et de 1,1% sur l'ensemble de la filière AT. Le facteur d'émission de la filière biométhane passe donc d'une valeur de 43,56 g CO₂e/ kWh PCI à une valeur de 44,01 g CO₂e/ kWh PCI pour la filière AA et d'une valeur de 43,20 g CO₂e/ kWh PCI à une valeur de 43,69 g CO₂e/ kWh PCI pour la filière AT. Les potentielles incertitudes liées à la proportion des CIVE d'hiver par rapport aux CIVE d'été et son évolution dans le futur n'impactent pas le facteur d'émission de la filière biométhane de manière significative et ne modifient pas les conclusions de l'étude.

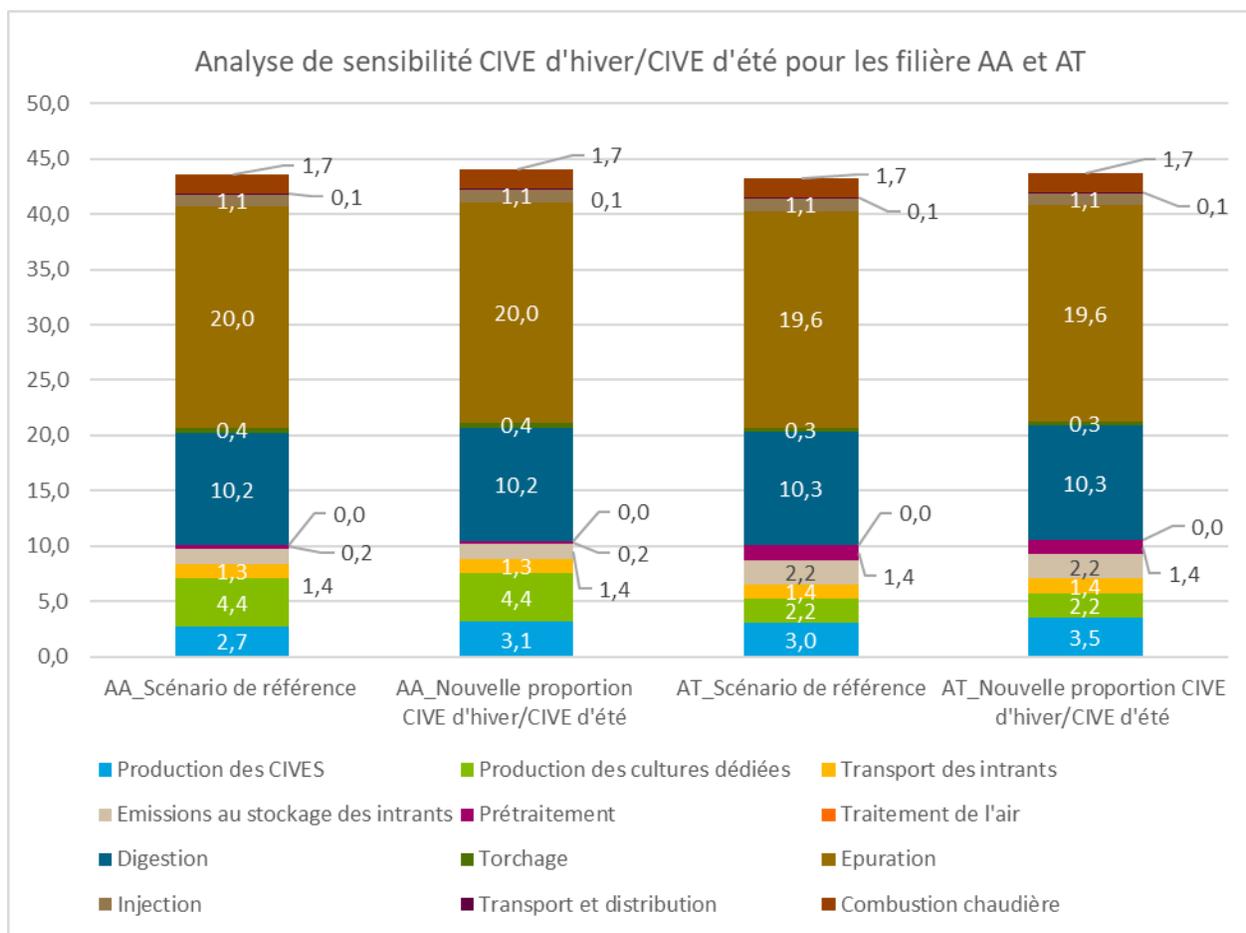


Figure 48 - Analyse comparative entre le scénario de référence et la modification de la proportion CIVE d'hiver versus CIVE d'été pour les filières AA et AT (IPCC2021)

7.3. Autoconsommation en biométhane pour le pré-traitement

Dans cette analyse, le gaz naturel utilisé comme source énergétique thermique au niveau du prétraitement est remplacé par le biogaz produit par les filières AT, IT et Biodéchets (la ration envoyée au méthanisateur est composée de certaines typologies d'intrants qui nécessitent une hygiénisation). De fait, les impacts de la production et de l'approvisionnement en gaz naturel sont substitués par l'utilisation d'une partie de la production de biométhane, entraînant une réduction de la production de 0,3% pour la filière AT, de 1,9% pour la filière IT et de 3,4% pour la filière Biodéchets.

L'utilisation de biogaz en autoconsommation à la place du gaz naturel permet de réduire les impacts sur le changement climatique de 2,5% pour la filière AT, de 11,5% pour la filière IT et de 14,4% pour la filière Biodéchets (Figure 49). Les émissions de CO₂e pour ces filières passent donc de :

- 43,20 g CO₂e par kWh PCI à 42,11 g CO₂e par kWh PCI pour la filière AT ;
- 45,24 g CO₂e par kWh PCI à 40,04 g CO₂e par kWh PCI pour la filière IT ;
- 50,12 g CO₂e par kWh PCI à 42,89 g CO₂e par kWh PCI pour la filière Biodéchets.

La substitution du gaz naturel s'effectue au niveau du prétraitement réduisant très fortement les impacts de cette étape du cycle de vie avec -83% d'impact sur le changement climatique pour la filière AT, -94% pour la filière IT et -91% pour la filière Biodéchets (Figure 50). L'impact de la perte de rendement lié à la

baisse de production du biométhane reste faible et ne dépasse pas les 1% pour la filière AT et les 7% pour les filières IT et Biodéchets. Plus la filière dédie une part importante de sa consommation d'énergie au prétraitement, meilleur est le gain environnemental de l'autoconsommation. C'est pourquoi la filière Biodéchets, qui hygiénise 100% de ses intrants, est impactée positivement et dans une amplitude de baisse du facteur d'émission plus importante.

Au bilan, la substitution du gaz naturel par un système d'autoconsommation de biométhane a un impact considéré comme positif et non-négligeable pour l'ensemble des filières intégrant un système de prétraitement avec une étape d'hygiénisation. L'utilisation de ce levier de réduction des gaz à effet de serre comme perspective d'évolution de la filière biométhane semble pertinente et en cohérence avec les évolutions réglementaires⁶¹.

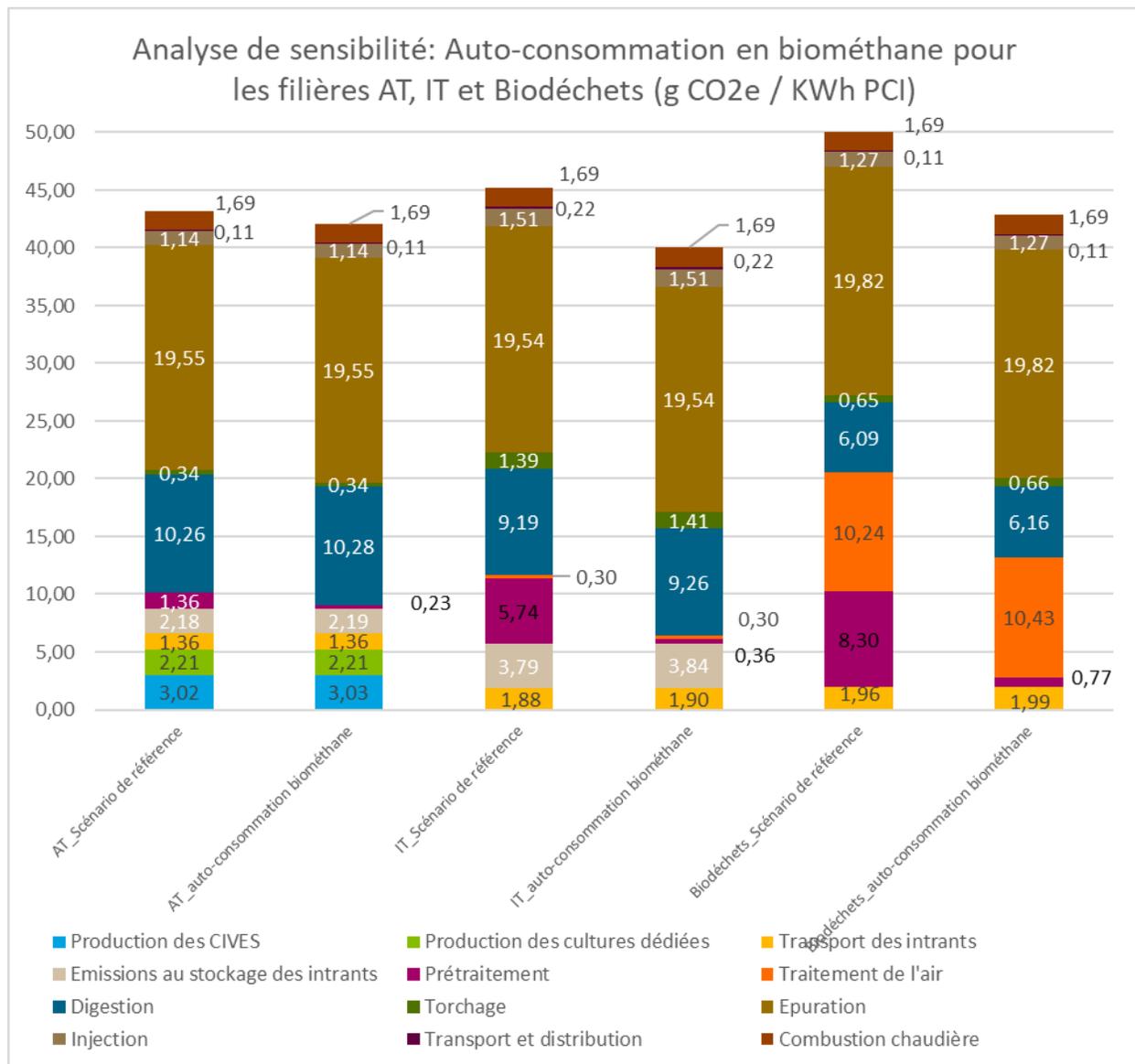


Figure 49 - Analyse comparative entre le scénario de référence utilisant du gaz naturel et le scénario d'autoconsommation du biométhane produit pour les filières AT, IT et Biodéchets (IPCC2021)

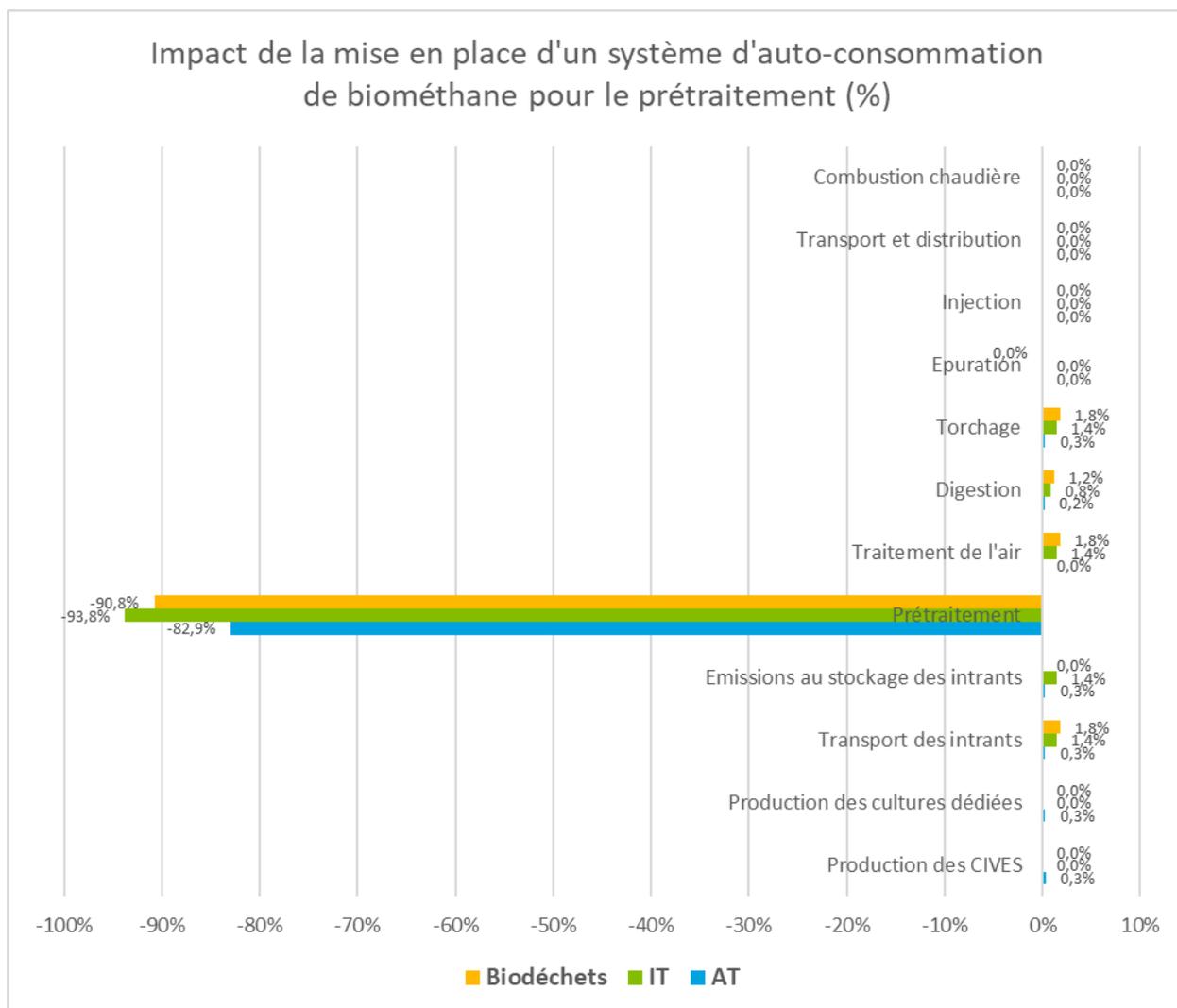


Figure 50 - Impacts de l'utilisation de l'autoconsommation de biométhane par étapes du cycle de vie pour la filière AT, IT et Biodéchets (IPCC2021)

7.4. Modification du stockage du digestat

Le stockage du digestat est considéré comme couvert sans récupération de biogaz pour le scénario de référence modélisé dans cette étude. Les deux autres cas testés dans cette analyse de sensibilité sont :

- Un stockage ouvert en lagune avec formation d'une croûte ;
- Un stockage couvert avec récupération de biogaz.

Les filières AA, AT et IT ont été analysées avec ces modes de stockages alternatifs. A savoir, que comme la filière IT récupère déjà le biogaz dans la référence, uniquement le scénario ouvert avec lagune et croûte a été testé pour cette filière.

Cette analyse de sensibilité ne concerne que l'approche par substitution et extension de frontière. En effet, le stockage du digestat étant hors périmètre de l'approche par allocation économique, l'analyse de sensibilité a été conduite avec l'approche par substitution pour les trois filières.

Agricole autonome

L'utilisation d'un stockage ouvert en lagune avec formation d'une croûte libère davantage de gaz à effet de serre et génère une augmentation de 4,5% des impacts induits à la filière biométhane intégrant le traitement, le stockage, la distribution et l'épandage du digestat (Figure 51 - Analyse comparative entre le scénario de référence utilisant un stockage couvert sans récupération de biogaz et les scénarios alternatifs de stockage ouvert et couvert avec récupération du biogaz pour la filière AA (IPCC2021)). Les impacts évités sont réduits de 0,9% ce qui s'explique par les modifications de la composition du digestat dues aux émissions au stockage. De fait, la teneur en azote du digestat diminue et les émissions qu'il permet d'éviter en se substituant à un engrais minéral diminuent d'autant. Dans la Figure 52 - Impacts de la modification du mode de stockage des digestats pour la filière AA (IPCC2021), il est possible d'analyser la répartition de l'évolution des impacts de chaque étape du cycle de vie. Il est constaté que l'ensemble des différentes étapes du cycle de vie sont très légèrement impactées par une modification du stockage du digestat, car ce même digestat est épandu pour la production des CIVE, utilisées comme intrant de la filière. Il est également possible d'observer que le passage d'un abattement de 80% à 70% provoque une augmentation de 50% des émissions de gaz à effet de serre au niveau du stockage du digestat. Au global, le facteur d'émission passe de -66,5 g CO₂e par kWh PCI à -61,0 g CO₂e par kWh PCI, soit une diminution de l'impact positif sur le changement climatique de la filière de 8,3%.

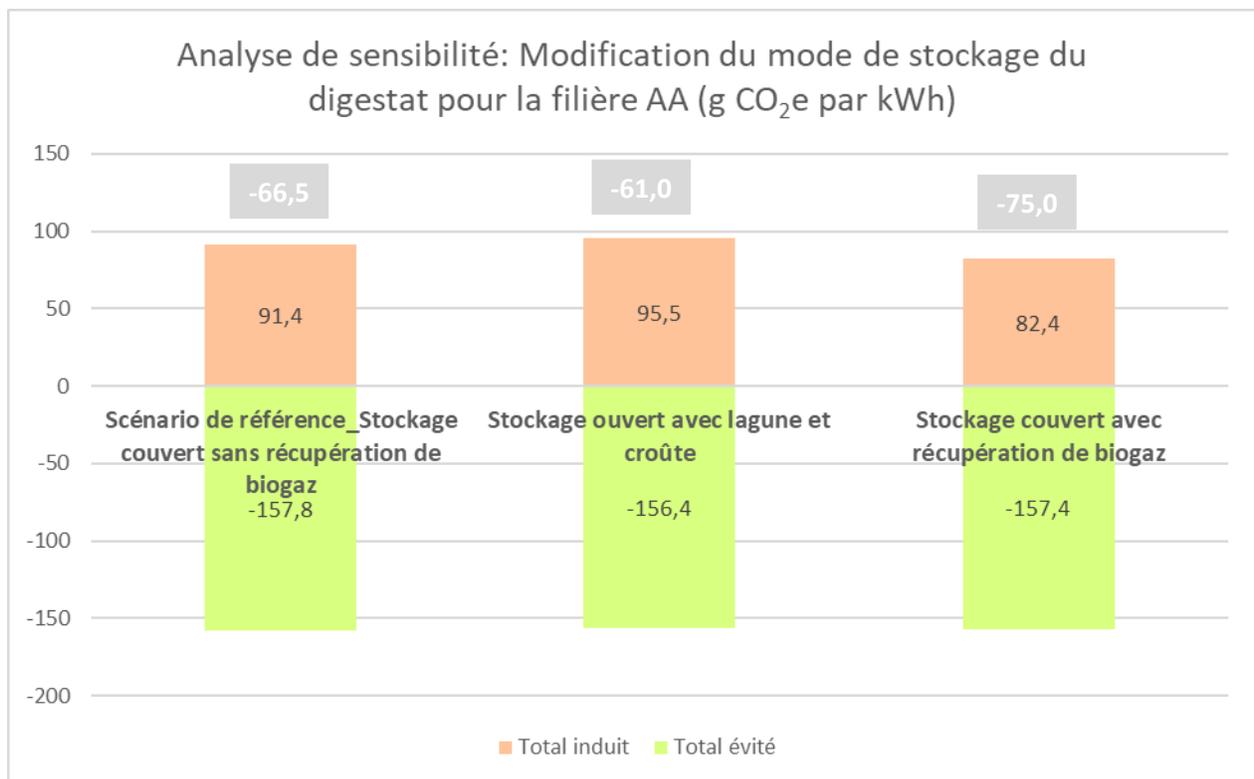


Figure 51 - Analyse comparative entre le scénario de référence utilisant un stockage couvert sans récupération de biogaz et les scénarios alternatifs de stockage ouvert et couvert avec récupération du biogaz pour la filière AA (IPCC2021)

Avec un système de récupération de biogaz, les émissions au niveau du stockage du digestat sont considérées comme nulle, réduisant ainsi son impact de 100%. Cet abattement des gaz permet de réduire les impacts induits de la filière biométhane AA de 9,8%, en passant de 91,4 g CO₂e/kWh PCI à 82,4 g

CO₂e/kWh PCI. Les émissions évitées restent relativement stables. Au global, en récupérant le biogaz au niveau du digestat, le facteur d'émission de la filière AA passe de -66,5 g CO₂e/kWh PCI à -75,0 g CO₂e/kWh PCI, soit une augmentation de l'impact positif sur le changement climatique de la filière de 12,8%.

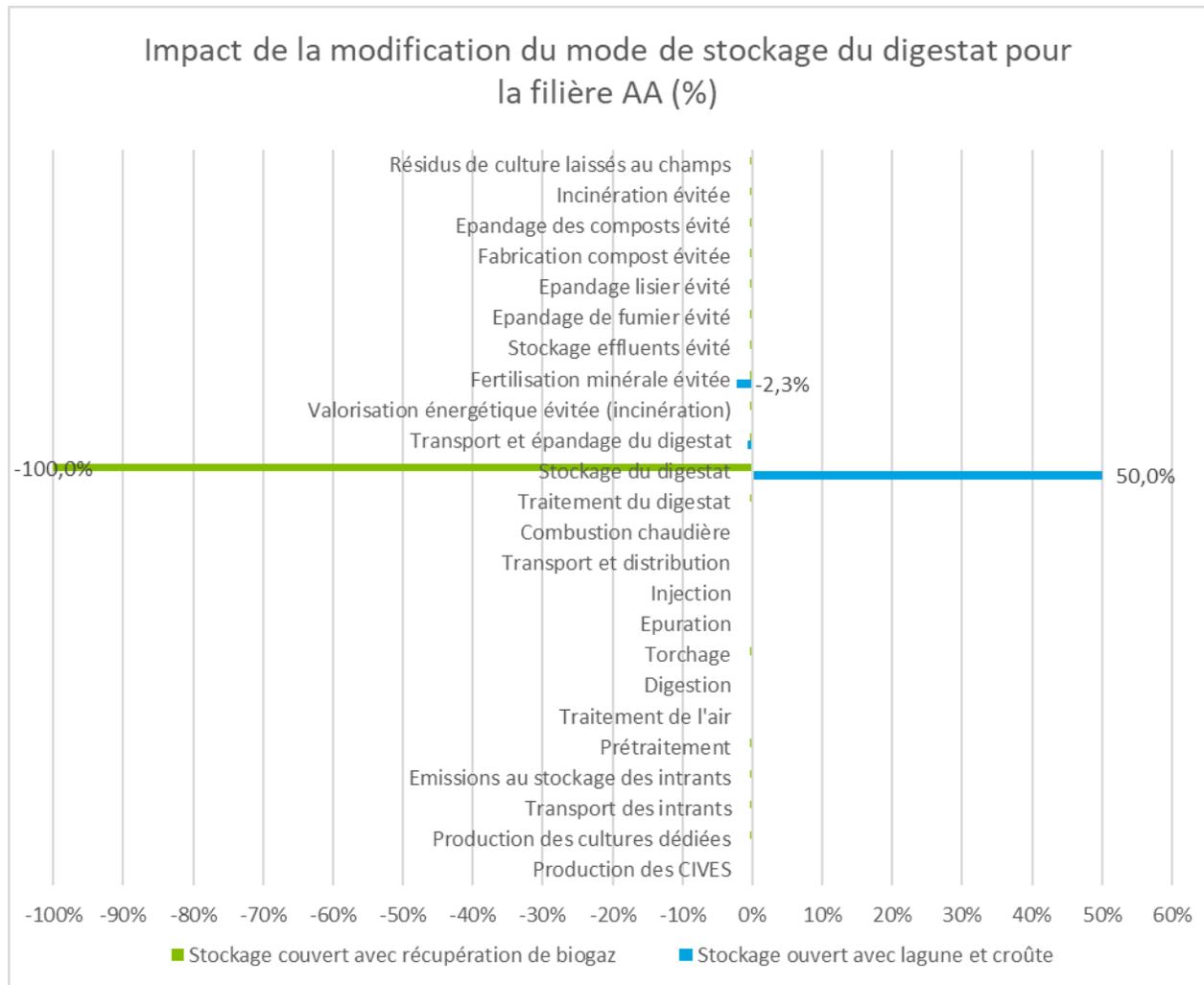


Figure 52 - Impacts de la modification du mode de stockage des digestats pour la filière AA (IPCC2021)

Agricole territorial

Comme pour la filière AA, l'utilisation d'un stockage ouvert en lagune avec formation d'une croûte libère davantage de gaz à effet de serre et celle d'un stockage avec récupération de biogaz évite des émissions de gaz à effet de serre de manière non-négligeable. Le passage à un stockage ouvert génère une augmentation de 4,6% des impacts induits à la filière biométhane (Figure 53 - Analyse comparative entre le scénario de référence utilisant un stockage couvert sans récupération de biogaz et les scénarios alternatifs de stockage ouvert et couvert avec récupération du biogaz pour la filière AT (IPCC2021)) alors que la récupération de biogaz permet de réduire de 10% les impacts induits. Les impacts évités sont eux réduits de 0,9% par l'ouverture du stockage et de 0,2% par la récupération du biométhane.

Au global :

- En utilisant un système de stockage ouvert en lagune avec formation d'une croûte, le facteur d'émission passe de -56,2 g CO₂e/kWh PCI à -50,9 g CO₂e/kWh PCI, soit une diminution de l'impact positif sur le changement climatique de la filière de 9,4% ;
- En utilisant un système de stockage couvert avec récupération du biogaz, le facteur d'émission passe de -56,2 g CO₂e/kWh PCI à -64,5 g CO₂e/kWh PCI, soit une augmentation de l'impact positif sur le changement climatique de la filière de 14,9%.

Les ordres de grandeur des évolutions de la filière AT restent donc similaires à celles de la filière AA (Figure 51 - Analyse comparative entre le scénario de référence utilisant un stockage couvert sans récupération de biogaz et les scénarios alternatifs de stockage ouvert et couvert avec récupération du biogaz pour la filière AA (IPCC2021)).

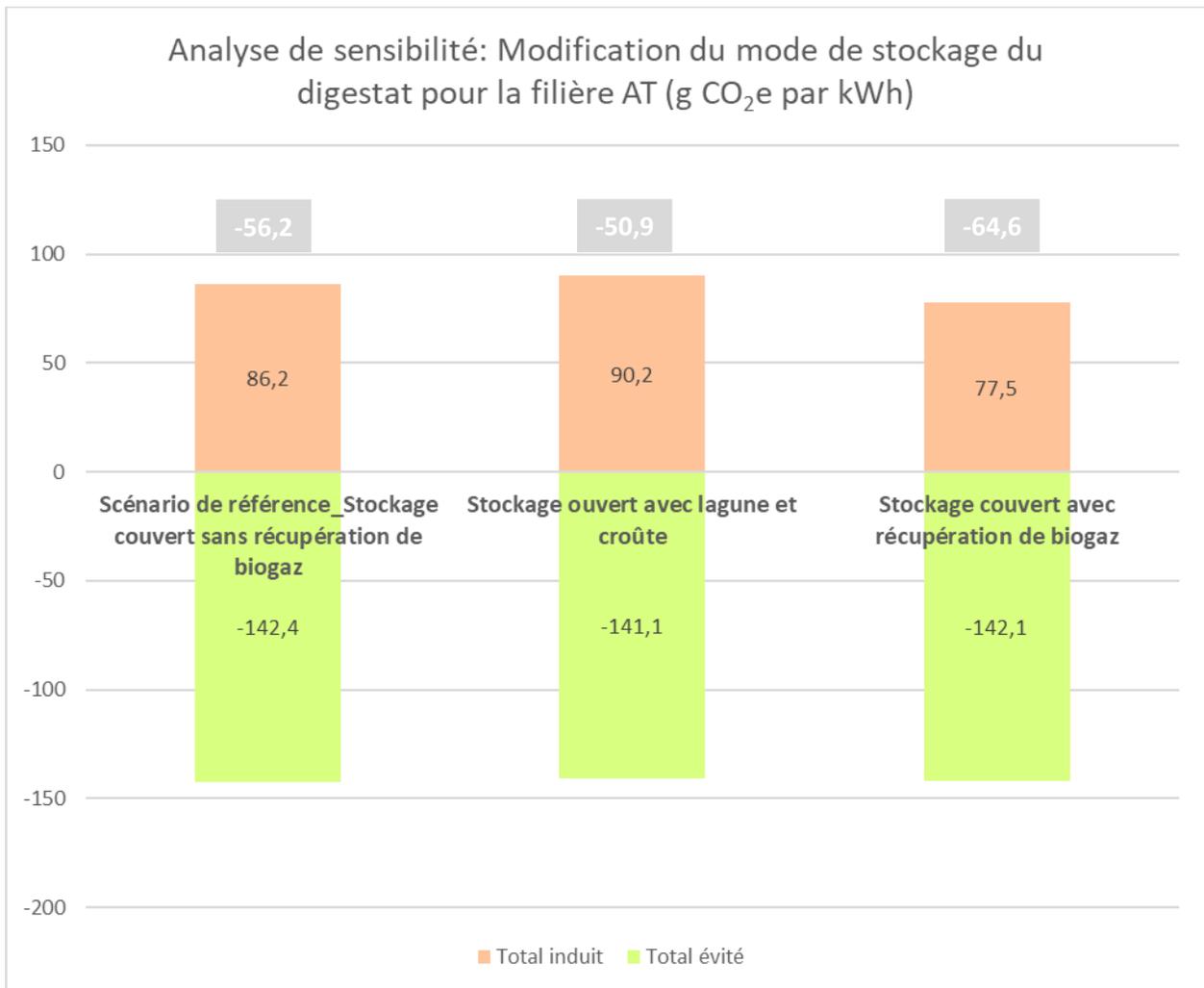


Figure 53 - Analyse comparative entre le scénario de référence utilisant un stockage couvert sans récupération de biogaz et les scénarios alternatifs de stockage ouvert et couvert avec récupération du biogaz pour la filière AT (IPCC2021)

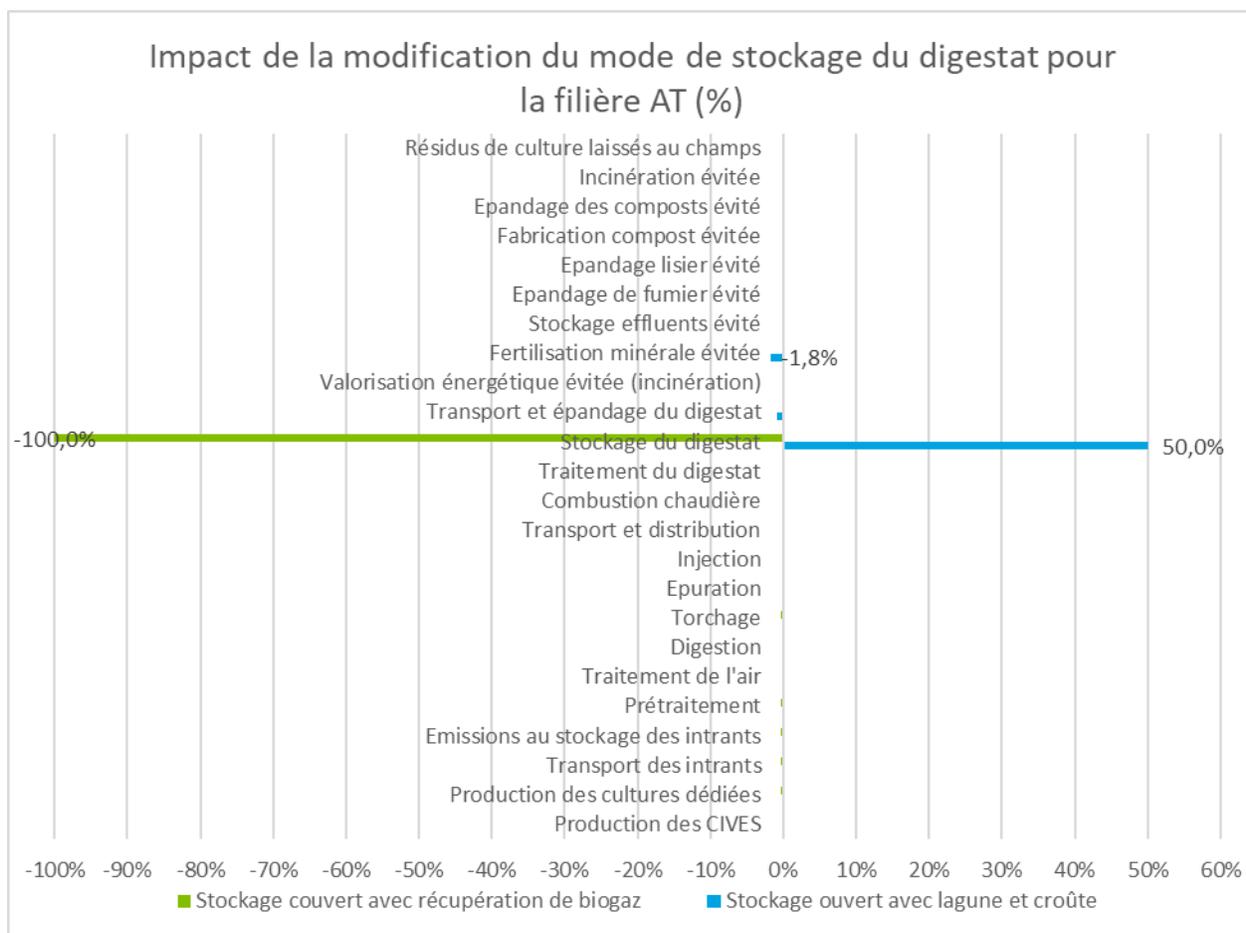


Figure 54 - Impacts de la modification du mode de stockage des digestats pour la filière AT (IPCC2021)

Industriel territorial

Le passage d'un stockage couvert avec récupération de biométhane à un stockage ouvert en lagune avec formation d'une croûte, génère davantage de gaz à effet de serre, soit une augmentation de 13,5% des impacts induits à la filière biométhane (Figure 55 - Analyse comparative entre le scénario de référence utilisant un stockage couvert avec récupération de biogaz et le scénario alternatif de stockage ouvert pour la filière IT (IPCC2021)). Le stockage de digestat passe ainsi d'un impact de 0 g CO₂e par kWh PCI à 11,7g CO₂e par kWh PCI. Les impacts évités sont eux réduits de 0,9% par l'ouverture du stockage.

Au global, en utilisant un système de stockage ouvert avec formation d'une croûte, le facteur d'émission passe de -7,7 CO₂e par kWh PCI à 4,4 g CO₂e par kWh PCI, ce qui signifie que la fertilisation évitée par la production de digestat via la méthanisation ne permet plus de compenser les impacts sur le changement climatique de la filière.

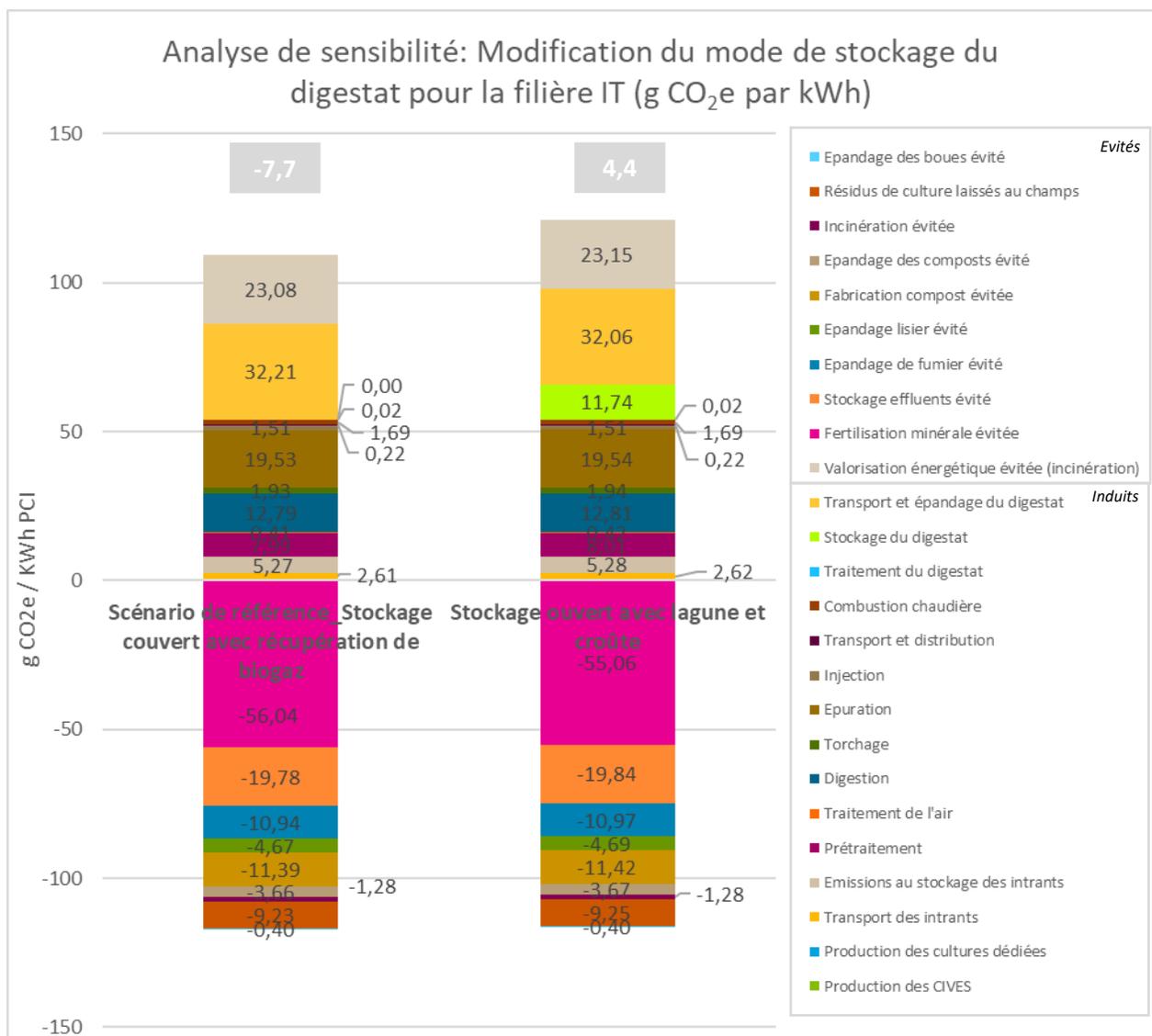


Figure 55 - Analyse comparative entre le scénario de référence utilisant un stockage couvert avec récupération de biogaz et le scénario alternatif de stockage ouvert pour la filière IT (IPCC2021)

Au global, l'utilisation d'un système de stockage en lagune avec formation d'une croûte et le mise en place d'un système de récupération immédiate du biogaz au stockage du digestat ont des effets non-négligeables sur l'impact total de la filière méthanisation. Le mode de stockage du digestat peut être considéré comme un levier pertinent de réduction des gaz à effet de serre.

7.5. Variation du prix du digestat

Du fait de l'utilisation d'une allocation économique, le prix du digestat peut potentiellement avoir un impact important sur le facteur d'émission du biométhane. Le prix du digestat est d'ailleurs un paramètre variable dans le temps qui peut rendre le facteur d'émission instable. Il a ainsi été étudié dans cette analyse de sensibilité la robustesse du modèle face à une augmentation des prix du digestat de 60%. Le prix passe donc de 1,73 €/kg N à 2,76 €/kg N ce qui correspond aux prix du digestat en 2022, année particulièrement haussière.

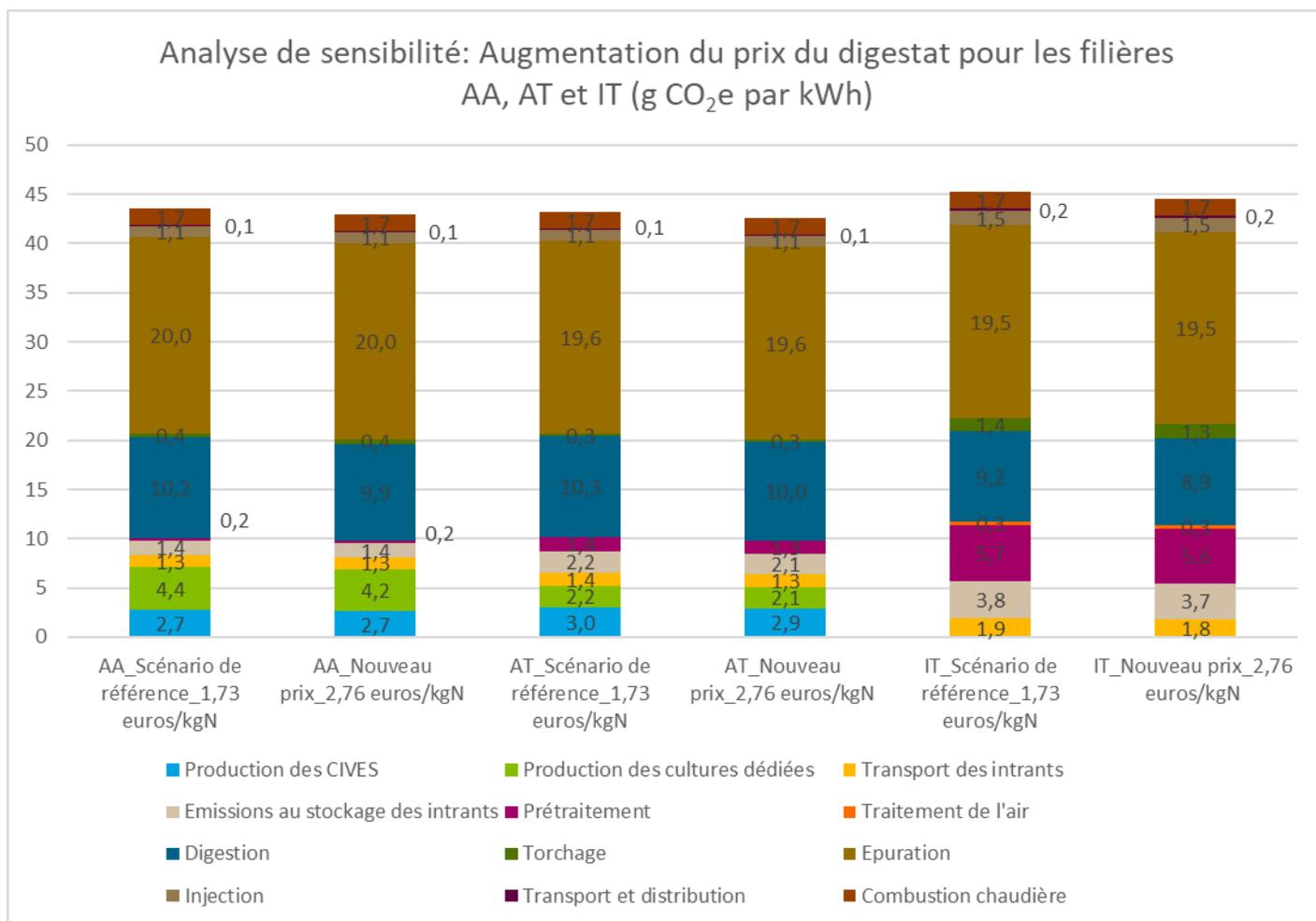


Figure 56 - Analyse comparative entre le scénario de référence avec un prix du digestat de 1,73€/kg N et le scénario alternatif avec un prix de 2,76€/kg N pour les filières AA, AT et IT (IPCC2021)

Une hausse de 60% du prix de l'azote contenu dans le digestat engendre une diminution de l'impact :

- 1,4% sur le changement climatique pour la filière AA, soit un facteur d'émission passant de 43,56 g CO₂e/kWh PCI à 42,94 g CO₂e/kWh PCI
- 1,4% sur le changement climatique pour la filière AT soit un facteur d'émission passant de 43,20 g CO₂e/kWh PCI à 42,60 g CO₂e/kWh PCI
- 1,5% sur le changement climatique pour la filière IT soit un facteur d'émission passant de 45,24 g CO₂e/kWh PCI à 44,57 g CO₂e/kWh PCI

L'impact d'une hausse de prix conséquente du prix de l'azote organique va provoquer une diminution d'environ 3% de l'impact des étapes du cycle de vie antérieures à l'épuration du biogaz. Ces étapes contribuant à environ 50% de l'impact total de la filière explique l'impact modéré d'environ 1,5% sur l'ensemble du cycle de vie.

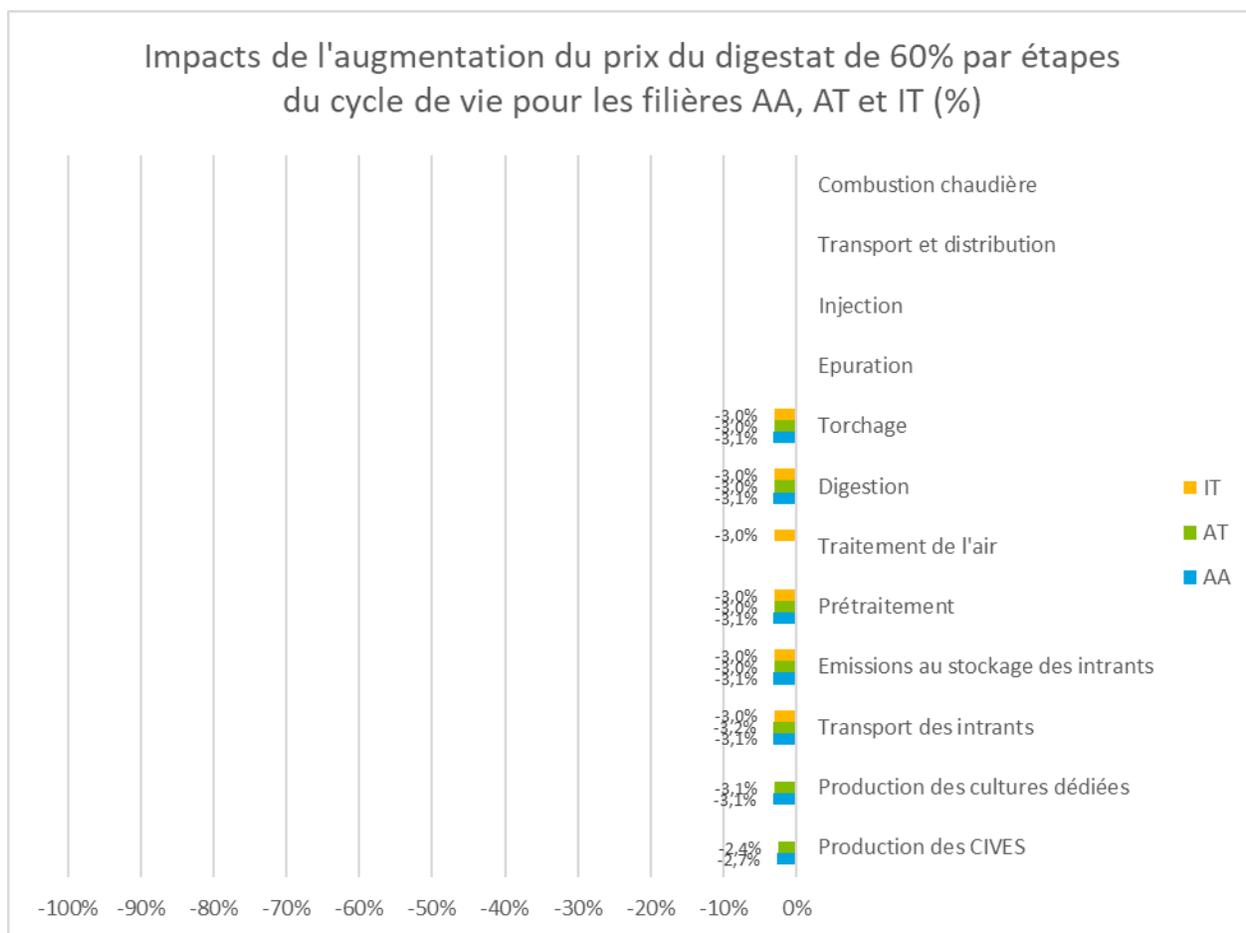


Figure 57 - Impacts de l'augmentation du prix du digestat de 60% pour les filières AA, AT et IT (IPCC2021)

Au bilan, l'évolution du prix du digestat engendre un impact relativement faible sur le facteur d'émission de gaz à effet de serre des filières AA, AT et IT pour l'approche avec allocation économique. L'impact GES de la méthanisation reste peu sensible aux fluctuations des prix de l'azote ou des digestats malgré l'utilisation d'une approche par allocation économique. A noter que ce paramètre n'a aucun impact sur le facteur d'émission de la filière pour toute autre approche de gestion de la multifonctionnalité tel que la substitution, l'extension de frontière ou l'allocation massique.

7.6. Variation des taux de perte de méthane

Comme analysé dans la partie 6.1.2 du rapport, les pertes de méthane biogénique ont un impact majeur sur le changement climatique. Or les pertes liées au procédé d'épuration ou aux fuites peuvent être variables d'une unité de méthanisation à une autre, elles sont dépendantes des technologies, de la conception des sites, des conditions d'exploitation, des pratiques de détection mises en place, du suivi et des actions de maintenance réalisées. Des fuites ponctuelles liées à des incidents peuvent également avoir lieu. Il est donc pertinent de tester le modèle de la présente étude en établissant des scénarios alternatifs de pertes de méthane. Pour rappel :

- **Scenario de référence :**
 - 0,5% de fuites au niveau du digesteur ;
 - Entre 0,9% et 4,1% de biogaz envoyé à la torchère selon la filière*(2,6% d'imbrulé + 0% fuite à la torchère (torchère automatique)) au torchage ;
 - 1% de perte à l'épuration ;
 - 0,05% de perte à l'injection.
- **Scénario fuites à la torchère :**
 - 0,5% de fuites au niveau du digesteur ;
 - Entre 0,9% et 4,1% de biogaz envoyé en torchère selon la filière*(2,6% d'imbrulé + **1%** de fuite à la torchère (torchère automatique)) au torchage pour refléter de potentiels dysfonctionnements ;
 - 1% de perte à l'épuration ;
 - 0,05% de perte à l'injection.
- **Scénario APRES ICPE (2025) + bonnes pratiques :**
 - **0,05%** de fuites au niveau du digesteur ;
 - Entre 0,9% et 4,1% de biogaz envoyé en torchère selon la filière*(2,6% d'imbrulé au torchage + 0% de fuite à la torchère (torchère automatique)) au torchage ;
 - **0,5%** de perte à l'épuration ;
 - 0,05% de perte à l'injection.
- **Scénario « Meilleures pratiques atteignables »**
 - **0,05%** de fuites au niveau du digesteur ;
 - Entre 0,9% et 4,1% de biogaz envoyé en torchère selon la filière*(2,6% d'imbrulé au torchage + 0% de fuite à la torchère (torchère automatique)) au torchage ;
 - **0,05%** de perte à l'épuration ;
 - 0,05% de perte à l'injection.
- **Scénario « Valeur Pivot » :**
 - **De 0,9% à 4,3%** de fuites au niveau du digesteur selon les filières ;
 - Entre 0,9% et 4,1% de biogaz envoyé à la torchère selon la filière *(2,6% d'imbrulé + 0% fuite à la torchère (torchère automatique)) au torchage
 - 1% de perte à l'épuration ;
 - 0,05% de perte à l'injection.

La valeur pivot représente le taux de perte qu'une filière hypothétique atteindrait pour que ses impacts sur le changement climatique soient nuls avec une approche par substitution. C'est-à-dire le moment où les impacts induits et les impacts évités seraient égaux. C'est donc à partir du taux de fuite de la valeur pivot que les impacts générés par la méthanisation (gestion du digestat inclus) deviennent supérieurs aux impacts évités par le remplacement d'une fertilisation minérale.

Cette valeur pivot a été déterminée par régression linéaire à partir d'analyses par substitution complémentaires effectuées.

Ainsi le taux de fuites pivot au niveau du digesteur pour :

- La filière AA est de 4,3% ;
- La filière AT est de 3,7% ;
- La filière IT est de 0,93%.

La synthèse de l'impact des différents scénarios se retrouve sur la Figure 58.

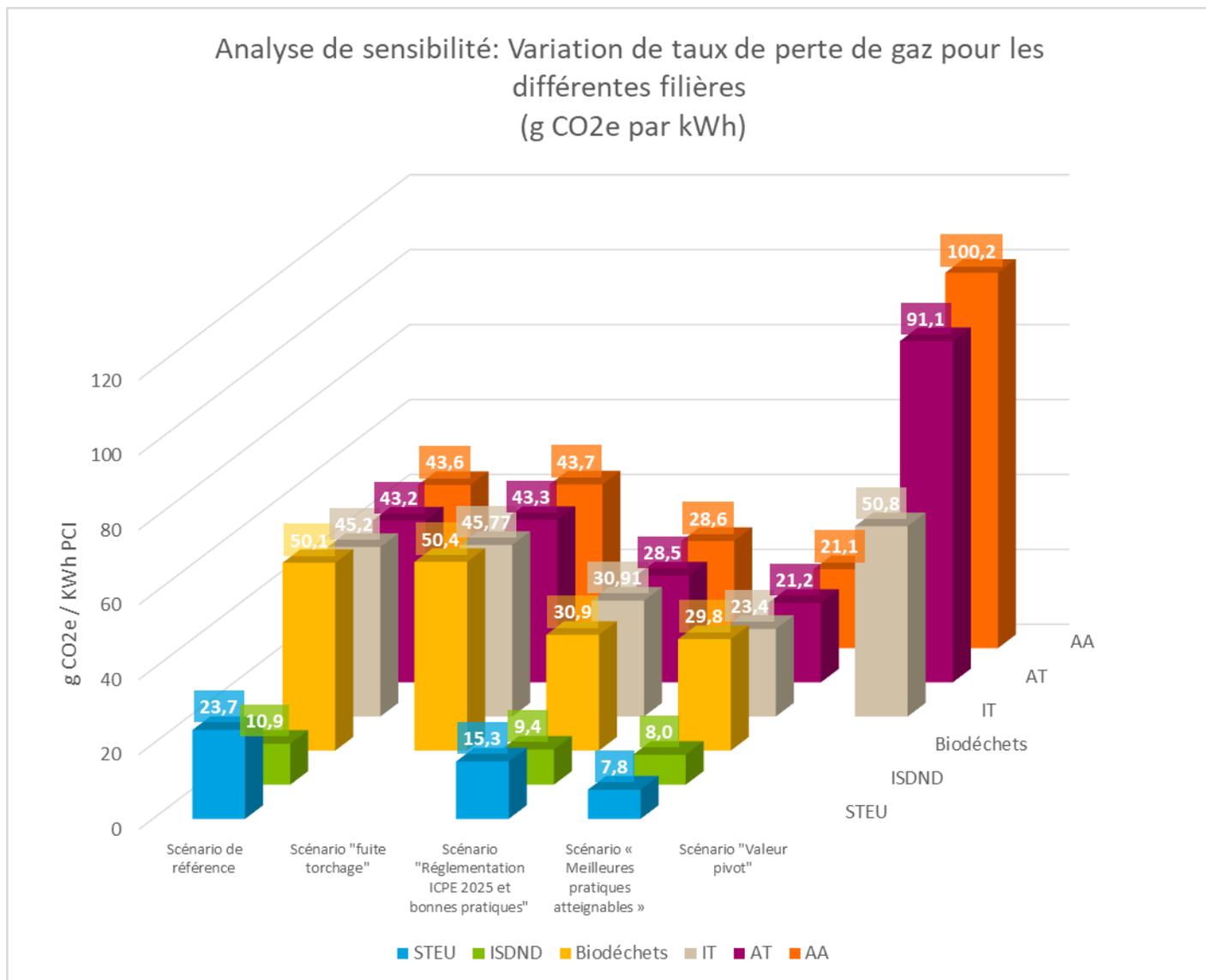


Figure 58 - Impacts de l'évolution des pertes de méthane selon le scénario « fuites à la torchère », le scénario « Réglementation ICPE 2025 », le scénario « Meilleures pratiques atteignables » et le scénario « Valeur pivot » pour l'ensemble des filières (IPCC2021)

Scénario « Fuites à la torchère »

Ce scénario prend en compte de potentiels dysfonctionnements à la torchère provoquant des pertes de méthane supplémentaires. Cette augmentation des pertes de méthane de 39% engendre une augmentation de l'impact de :

- 0,4% sur le changement climatique pour la filière AA, soit un facteur d'émission passant de 43,56 g CO₂e/kWh PCI à 43,72 g CO₂e/kWh PCI ;
- 0,3% sur le changement climatique pour la filière AT soit un facteur d'émission passant de 43,20 g CO₂e/kWh PCI à 43,33 g CO₂e/kWh PCI ;
- 1,2% sur le changement climatique pour la filière IT soit un facteur d'émission passant de 45,24 g CO₂e/kWh PCI à 45,77 g CO₂e/kWh PCI ;

- 0,5% sur le changement climatique pour la filière Biodéchets soit un facteur d'émission passant de 50,12 g CO₂e/kWh PCI à 50,37 g CO₂e/kWh PCI.

L'impact sur le changement climatique, pour les filières AA, AT, IT et biodéchets, augmente de 38% au niveau de l'étape de torchage uniquement.

Les fuites au torchage émettent des quantités de gaz à effet de serre relativement faibles par rapport à d'autres postes d'émissions. Cela est fortement dépendant de la quantité de biogaz envoyée vers la torchère. De fait, avec des quantités relativement faibles de biogaz envoyées en torchère, une augmentation conséquente de ces fuites via des dysfonctionnements ne fait pas augmenter de manière significative les impacts sur le changement climatique du biométhane.

Scénario « Réglementation ICPE 2025 et bonnes pratiques »

Ce scénario modélise des niveaux de pertes réalistes par rapport à la mise en place des bonnes pratiques sur la détection des fuites et des seuils maximaux d'émission de CH₄ dans les off-gaz qui seront rendus obligatoires par la réglementation ICPE à l'horizon 2025. Dans ce scénario, les fuites au digesteur sont divisées par 10 et les pertes à l'épuration sont divisées par 2.

Cette diminution conséquente des pertes de méthane engendre une diminution de l'impact de :

- 34,3% sur le changement climatique pour la filière AA, soit un facteur d'émission passant de 43,56 g CO₂e/kWh PCI à 28,63 g CO₂e/kWh PCI ;
- 34,0% sur le changement climatique pour la filière AT soit un facteur d'émission passant de 43,20 g CO₂e/kWh PCI à 28,52g CO₂e/kWh PCI ;
- 31,7% sur le changement climatique pour la filière IT soit un facteur d'émission passant de 45,24 g CO₂e/kWh PCI à 30,91 g CO₂e/kWh PCI ;
- 25,5% sur le changement climatique pour la filière Biodéchets soit un facteur d'émission passant de 50,12 g CO₂e/kWh PCI à 37,32 g CO₂e/kWh PCI ;
- 14,1% sur le changement climatique pour la filière ISDND soit un facteur d'émission passant de 10,93 g CO₂e/kWh PCI à 9,39 g CO₂e/kWh PCI ;
- 35,5% sur le changement climatique pour la filière STEU soit un facteur d'émission passant de 23,73 g CO₂e/kWh PCI à 15,31 g CO₂e/kWh PCI.

La diminution des impacts se produit logiquement aux étapes de digestion et d'épuration où les fuites sont largement réduites (Figure 59). Ce scénario permet de réduire de 62,9% à 70,3% les impacts sur le changement climatique de la digestion et de 18,6% à 43,1% ceux de l'épuration. Moins de fuites, c'est également une meilleure valorisation du potentiel énergétique des intrants par kWh produit, d'où la réduction entre 0,5% et 0,8% des étapes précédant la digestion.

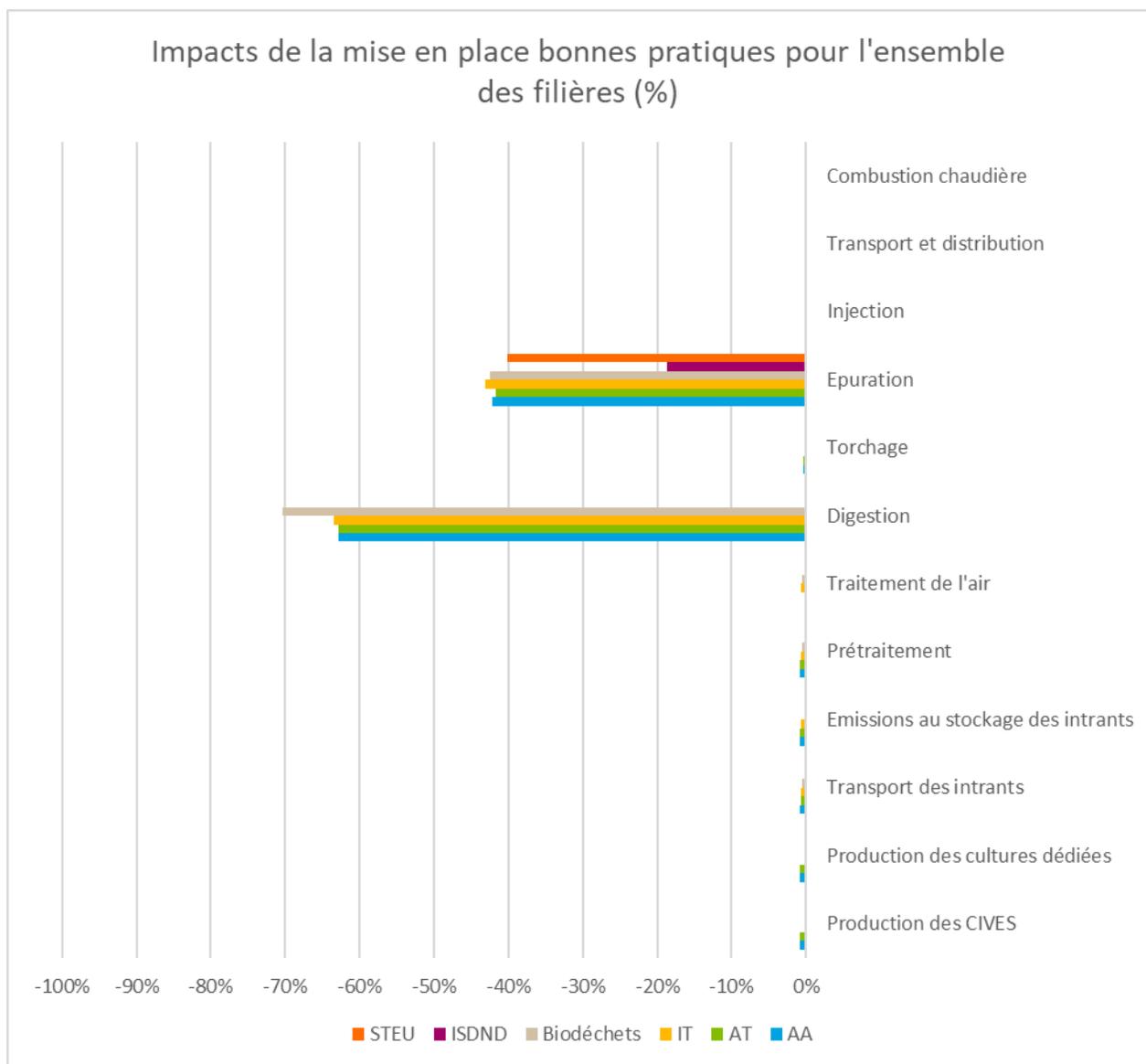


Figure 59 - Impacts de la mise en place bonnes pratiques pour l'ensemble des filières (IPCC2021)

Scénario « Meilleures pratiques atteignables »

Ce scénario modélise la présence de valorisation du CO₂ par liquéfaction permettant de récupérer et faire recirculer la quasi-totalité du CH₄ résiduel après épuration tout en gardant les bonnes pratiques au digesteur du précédent scénario. Dans ce scénario, par rapport au scénario de référence les fuites au digesteur sont divisées par 10 et les pertes à l'épuration sont divisées par 20.

Cette diminution conséquente des pertes de méthane engendre une diminution de l'impact de :

- 51,6% sur le changement climatique pour la filière AA, soit un facteur d'émission passant de 43,56 g CO₂e/kWh PCI à 21,09 g CO₂e/kWh PCI ;

- 50,9% sur le changement climatique pour la filière AT soit un facteur d'émission passant de 43,20 g CO₂e/kWh PCI à 21,21g CO₂e/kWh PCI ;
- 48,3% sur le changement climatique pour la filière IT soit un facteur d'émission passant de 45,24 g CO₂e/kWh PCI à 23,37 g CO₂e/kWh PCI ;
- 40,6% sur le changement climatique pour la filière Biodéchets soit un facteur d'émission passant de 50,12 g CO₂e/kWh PCI à 29,77 g CO₂e/kWh PCI ;
- 26,7% sur le changement climatique pour la filière ISDND soit un facteur d'émission passant de 10,93 g CO₂e/kWh PCI à 8,00 g CO₂e/kWh PCI ;
- 67,1% sur le changement climatique pour la filière STEU soit un facteur d'émission passant de 23,73 g CO₂e/kWh PCI à 7,80 g CO₂e/kWh PCI.

La diminution des impacts se produit logiquement aux étapes de digestion et d'épuration où les pertes de méthane sont largement réduites (Figure 60 - Impacts de la mise en place des meilleures pratiques atteignables pour l'ensemble des filières (IPCC2021)). Ce scénario permet de réduire de 62,9% à 70,3% les impacts sur le changement climatique de la digestion et de 35,6% à 80,4% ceux de l'épuration. Moins de pertes de méthane, c'est également moins d'intrants par kWh produit, d'où la réduction entre 0,3% et 1,2% des étapes précédant la digestion.

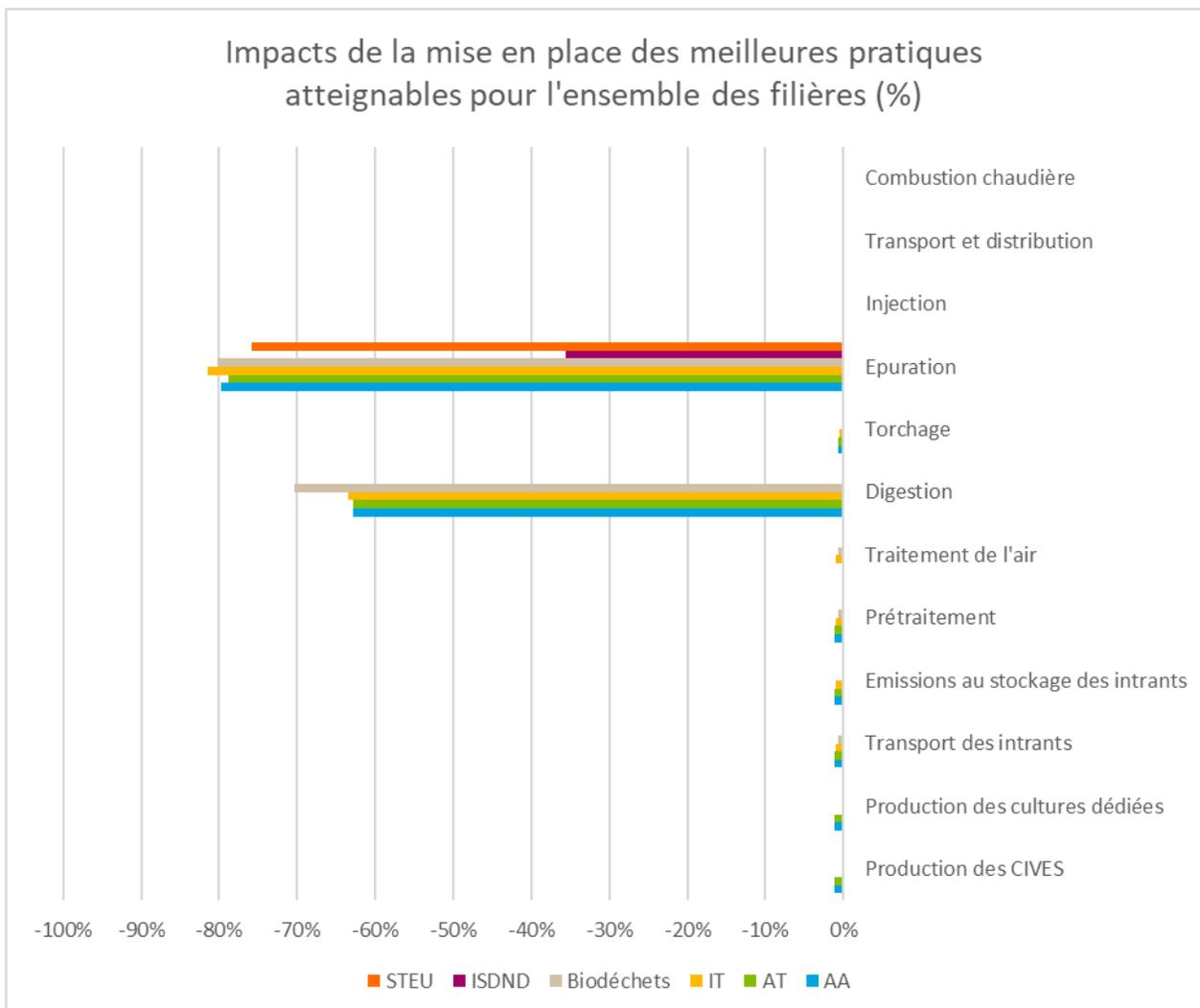


Figure 60 - Impacts de la mise en place des meilleures pratiques atteignables pour l'ensemble des filières (IPCC2021)

La mise en place de bonnes pratiques permettant de diviser par 10 les fuites de gaz à la digestion et par 20 les pertes de méthane à l'épuration ont un effet majeur sur l'impact sur le changement climatique du biogaz. A l'épuration, la mise en place de d'une technologie de valorisation du CO₂ par liquéfaction sur l'ensemble des unités des filières est dépendante du développement de la filière CO₂. Toutefois, l'analyse de sensibilité montre que la réduction des fuites est le levier d'action le plus pertinent de la filière biométhane afin de réduire de manière franche ses émissions de gaz à effet de serre.

Scénario « Valeur pivot »

Ce scénario modélise le taux de perte de méthane pivot qui, s'il est dépassé, rendrait les impacts de la filière de méthanisation plus importants que les impacts qu'elle permet d'éviter, en particulier la fertilisation minérale évitée qui est la plus importante (voir les résultats de la section 8 du rapport). Dans ce scénario, les taux de fuites au niveau du digesteur sont variables d'une filière à l'autre, elles sont multipliées par 8,6 pour la filière AA, par 7,4 pour la filière AT et 1,9 pour la filière IT. L'approche par substitution ne concernant pas les filières biodéchets, ISDND et STEU, aucune valeur pivot n'a pu être déterminée car elles ne sont pas concernées par l'approche par substitution et extension de frontière.

L'augmentation majeure des fuites à la digestion engendre une augmentation de l'impact de :

- 130% sur le changement climatique pour la filière AA, soit un facteur d'émission passant de 43,56 g CO₂e/kWh PCI à 100,2 g CO₂e/kWh PCI ;
- 111% sur le changement climatique pour la filière AT soit un facteur d'émission passant de 43,20 g CO₂e/kWh PCI à 91,10g CO₂e/kWh PCI ;
- 12,2% sur le changement climatique pour la filière IT soit un facteur d'émission passant de 45,24 g CO₂e/kWh PCI à 50,77g CO₂e/kWh PCI.

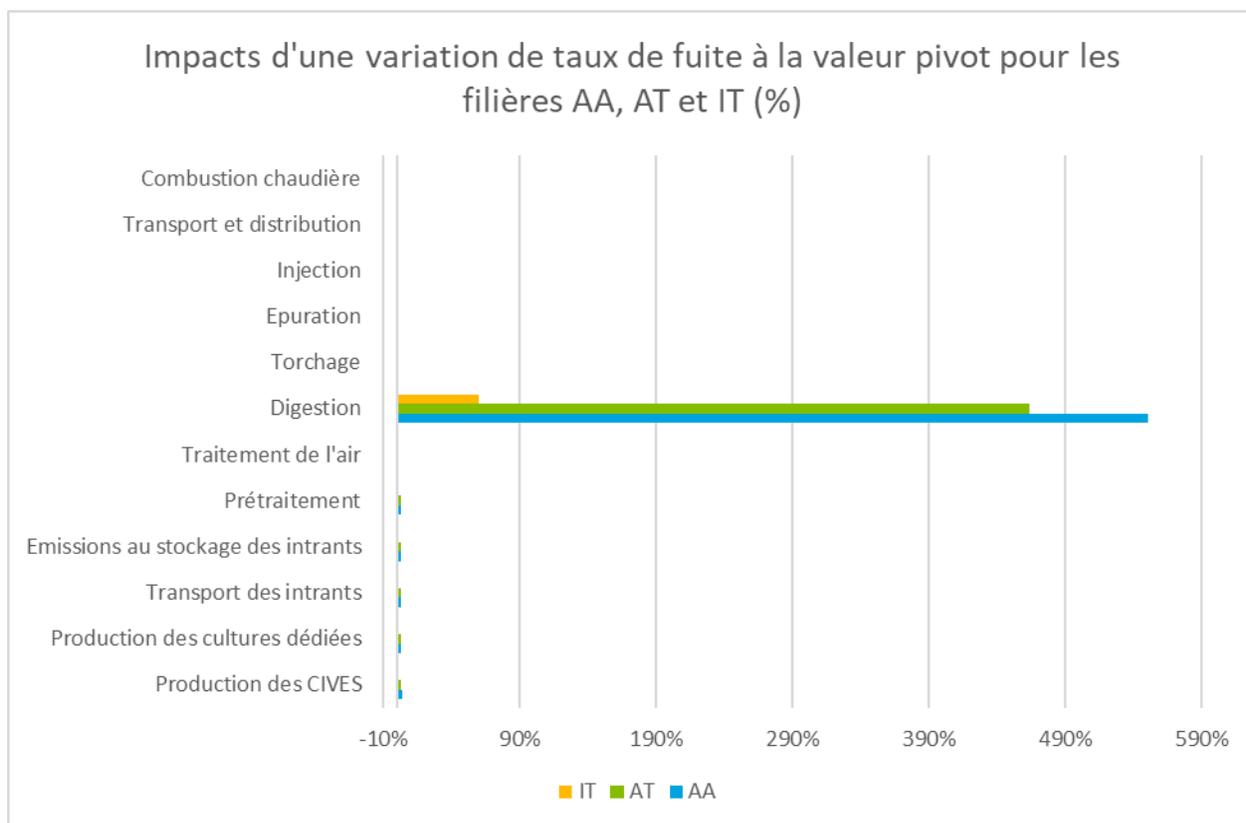


Figure 61 - Impacts d'une variation de taux de fuite à la valeur pivot pour les filières AA, AT et IT (IPCC2021)

L'augmentation des impacts se produit logiquement à l'étape de digestion où les fuites de biogaz sont le principal contributeur au facteur d'émission (Figure 61). Ce scénario augmente de 60,1% les impacts de la digestion sur le changement climatique pour la filière IT, de 464% celles de la filière AT et enfin de 551% celles de la filière AA. La perte de production entraîne une augmentation de l'impact des étapes précédentes la digestion de l'ordre de 3% pour les filières AA et AT et de seulement 0,1% pour la filière IT.

Au global, ce dernier scénario démontre l'importante sensibilité du modèle de l'étude et du facteur d'émission au taux de fuites de la digestion. L'épuration est également un poste d'émissions clé à maîtriser, comme le démontrent les précédentes analyses de sensibilité avec une fluctuation importante des résultats selon le niveau des pertes de méthane associées. Il est important de constater que les hypothèses prises de 0,5% de fuite au niveau du digesteur et de 1% de perte au niveau de l'épuration ont une contribution forte à l'impact sur le changement climatique du biométhane injecté et donc que les résultats obtenus au cours de cette étude dépendent fortement de ce choix méthodologique (4.2.3). Ainsi, une unité de méthanisation comportant un dysfonctionnement au niveau de l'épuration et du digesteur dépassant respectivement les taux de 1% et 0,5% verrait son facteur d'émission augmenter de manière significative par rapport aux facteurs d'émissions retenus dans la présente étude.

8. Résultats et interprétation - méthode par extension de frontière et substitution

8.1. Résultats sur l'indicateur des émissions de gaz à effet de serre

L'utilisation de la méthode par substitution pour cette étude permet d'analyser pour chacune des trois filières, AA, AT et IT les impacts évités par la co-production de digestat. Ces résultats permettent de comparer les impacts induits par la mise en place d'une filière de méthanisation avec ces impacts évités. Il est bon de rappeler que l'utilisation de la méthode par substitution permet de gérer la multifonctionnalité de la méthanisation en prenant en compte les impacts induits et évités par la production de digestat pour statuer de l'impact du biogaz sur le changement climatique. Ces résultats sont donc extrêmement dépendants du scénario de référence auquel vient substituer la mise en place d'une filière biométhane. Il convient donc d'interpréter ces résultats avec prudence, bien qu'ils apportent un éclairage complémentaire à l'analyse par allocation économique précédemment exposée.

Les résultats ont été calculés avec la méthode IPCC 2021. Les résultats de l'analyse multicritère sont à consulter en Annexe 8.

Comparaison des filières AA, AT et IT

L'ensemble des filières AA, AT et IT comportent des impacts évités par la co-production de digestat supérieurs aux impacts induits de la filière biométhane, ce qui amène le biogaz à bénéficier de facteurs d'émissions négatifs. Ainsi, par la somme des impacts évités et des impacts induits, la filière AA atteint **-66,5 g CO₂e/kWh PCI**, la filière AT atteint **-56,2 g CO₂e/kWh PCI** et la filière IT atteint **-7,7 g CO₂e/kWh PCI** (Figure 62).

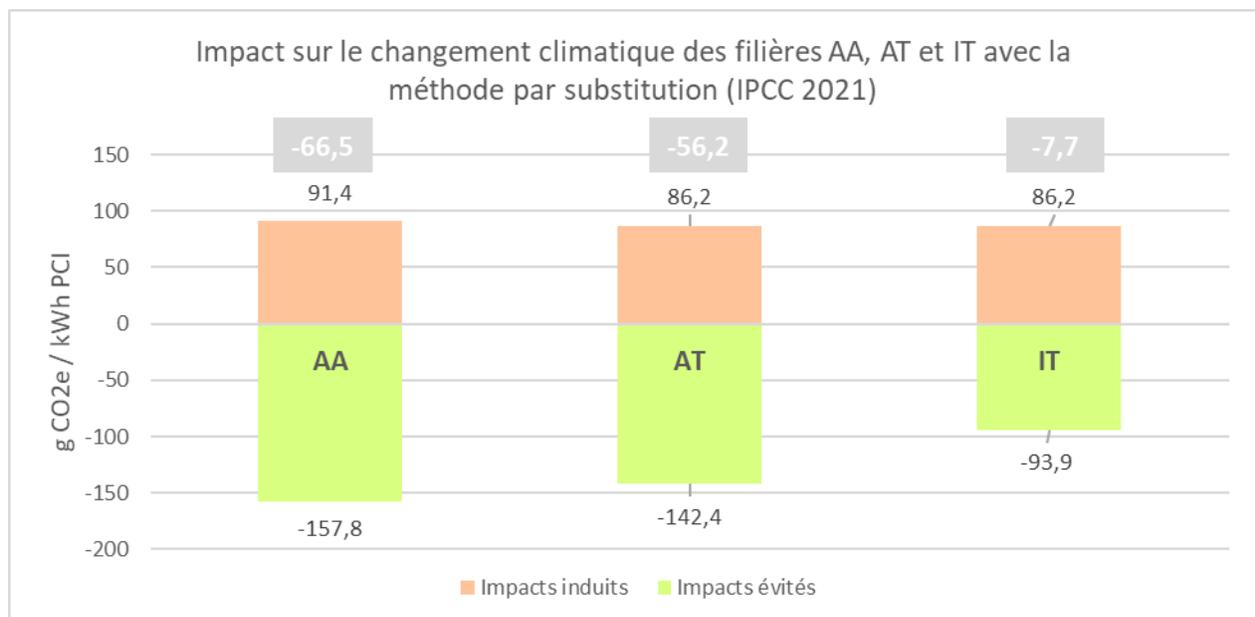


Figure 62 - Impacts sur le changement climatique des filières AA, AT et IT pour la méthode par substitution (IPCC 2021)

Agricole Autonome

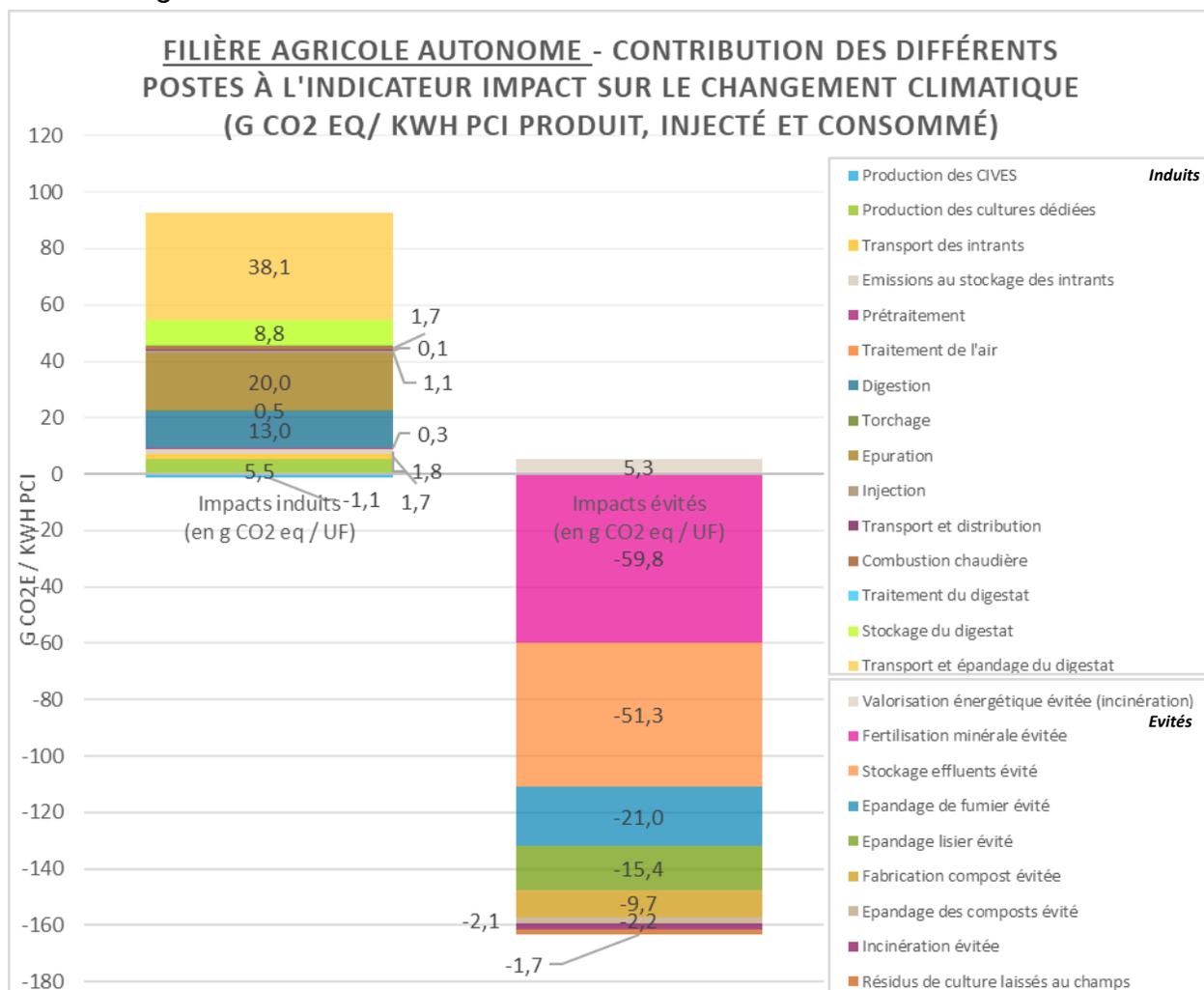


Figure 63 - Impacts sur le changement climatique de la filière AA pour la méthode par substitution (IPCC 2021)

Parmi ces impacts induits, 49% proviennent de la filière méthanisation et 51% du transport, stockage et épandage du digestat. En effet, l'étape de stockage du digestat engendre un impact induit à hauteur de 8,8 g CO₂e/kWh PCI et l'étape de transport et épandage du digestat émet 38,1 g CO₂e/kWh PCI. Suivent ensuite les mêmes postes principaux que dans la méthode par allocation économique. C'est-à-dire la digestion et l'épuration qui représentent respectivement 14% et 22% des impacts induits.

- L'impact de l'épuration provient des fuites principalement ainsi que des consommations d'énergie nécessaires aux différentes technologies d'épuration utilisées (voir 6.1.2) ;
- À l'étape de digestion, les émissions sont principalement liées aux fuites de CH₄ et de CO₂, à la consommation d'électricité et à l'infrastructure du digesteur (voir 6.1.2).

A ces impacts induits, se rajoutent des impacts que la mise en place d'une filière biométhane empêche d'éviter, comme la valorisation énergétique qui aurait pu bénéficier à certains déchets utilisés comme intrants à la méthanisation. Ces impacts additionnels comptent pour 5% des impacts positifs, et constituent un poste peu contributeur sur le changement climatique à la vue de la faible présence dans le mix d'intrants de déchets incinérables.

Les impacts évités par la mise en place d'une filière biométhane AA sont supérieurs à ses impacts induits, et atteignent 157,8 g CO₂e/kWh PCI. Les principaux impacts évités sont liés au fait que la mise en place d'une filière biométhane AA évite de produire, et d'épandre, de nouveaux fertilisants (engrais minéraux, compost, fumier et lisier), et évite également d'incinérer certains biodéchets. Enfin, la mise en place d'une filière biométhane AA limite la durée de stockage des effluents d'élevage permettant d'éviter certaines émissions. Ainsi :

- La fertilisation minérale évitée contribue à hauteur de 38% du total des impacts évités (émissions de N₂O évitées à l'épandage) ;
- Le stockage d'effluent évité permet également d'économiser des émissions de N₂O supplémentaires pour une contribution à hauteur de 32% du total des impacts évités ;
- L'épandage du fumier et du lisier évité contribuent, quant à eux, à hauteur de 23% du total des impacts évités.

L'impact de ces trois postes provient essentiellement des émissions de N₂O, qu'il s'agisse des émissions au champs liées à l'épandage de la fertilisation minérale ou des effluents, ou encore les émissions liées au stockage de ces derniers.

Finalement, avec une approche par substitution, le facteur d'émission du biométhane AA est de -66,5 g CO₂e/kWh PCI. Cela signifie que les impacts évités par la co-production de digestat sont supérieurs aux impacts induits de la filière biométhane AA.

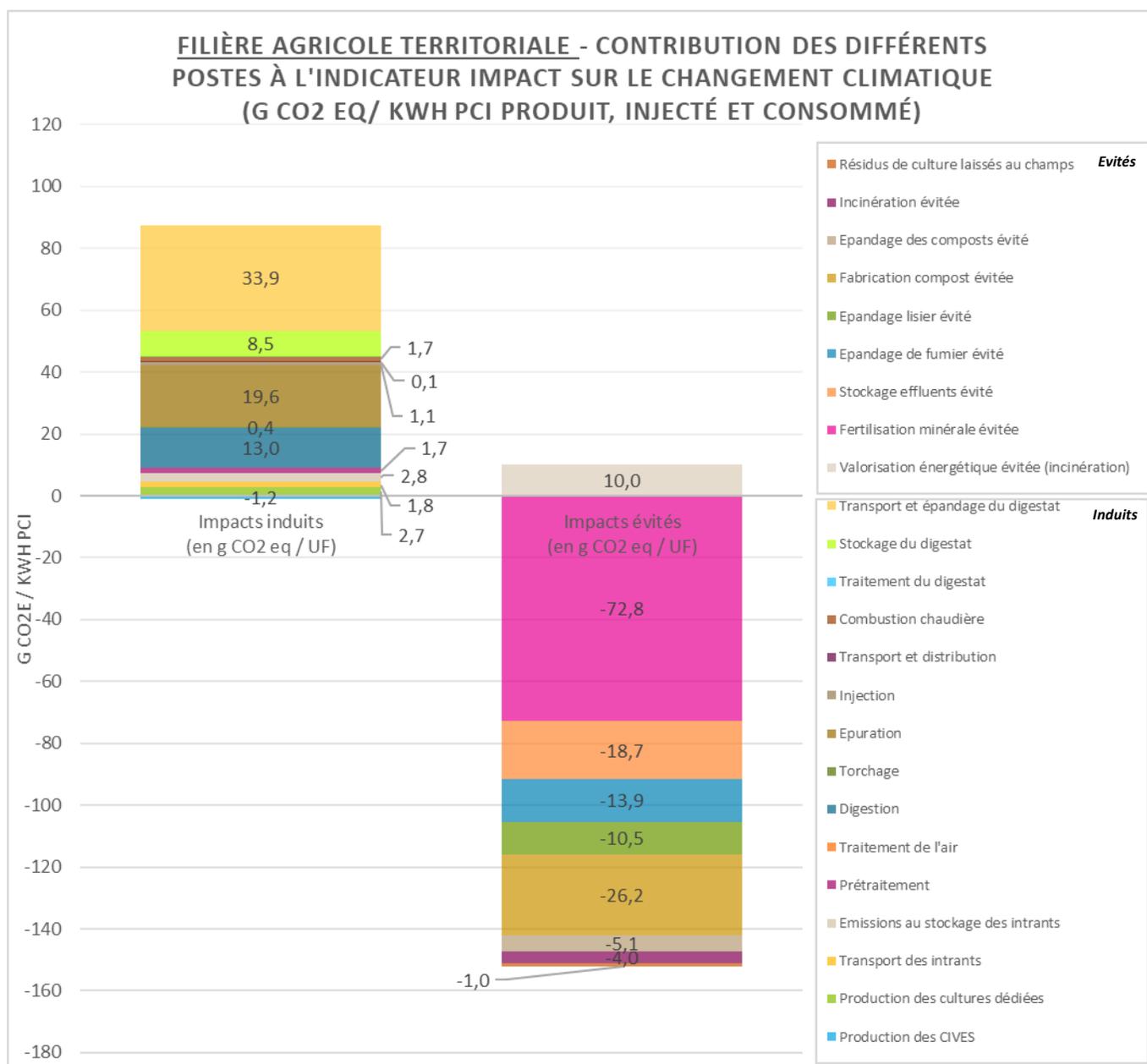


Figure 64 - Impacts sur le changement climatique de la filière AT pour la méthode par substitution (IPCC 2021)

Pour la filière AT, la prise en compte des impacts induits par la gestion et l'application du digestat comme fertilisant fait augmenter de manière significative l'impact de la filière pour atteindre 86,2 g CO₂e/kWh PCI (Figure 64). Parmi ces impacts induits, 51% proviennent de la filière méthanisation et 49% du stockage et de l'épandage du digestat. Les impacts sur le changement climatique liés à la gestion du digestat étant en grande majorité causés par les émissions de N₂O au stockage et au champ. A ces impacts induits, se rajoutent des impacts que la mise en place d'une filière biométhane empêche d'éviter, comme la valorisation énergétique qui aurait pu bénéficier à certains déchets utilisés comme intrants à la méthanisation. Ces impacts additionnels comptent pour 10% des impacts positifs, ce qui constitue une différence majeure avec la filière AA, expliquée par la plus grande présence dans le mix d'intrants de déchets incinérables.

Les impacts évités par la mise en place d'une filière biométhane AT sont supérieurs aux impacts induits de cette même filière, et atteignent 142,4 g CO₂e/kWh PCI. Tout comme pour la filière AA, les principaux impacts évités sont liés au fait que la mise en place de la filière biométhane AT évite de produire, et d'épandre, de nouveaux fertilisants (engrais minéraux, compost, fumier et lisier), tout en évitant également d'incinérer certains biodéchets. Enfin, la mise en place d'une filière biométhane AT limite la durée de stockage des effluents d'élevage permettant d'éviter certaines émissions. Ainsi :

- La fertilisation minérale évitée contribue à hauteur de 51% du total des impacts évités (émissions de N₂O évitées à l'épandage) ;
- La fabrication du compost évitée (à hauteur de 18% du total des impacts évités) permet d'économiser des émissions de méthane biogénique et de N₂O ;
- Le stockage d'effluent évité permet également d'économiser des émissions de N₂O supplémentaires pour une contribution à hauteur de 13% du total des impacts évités ;
- L'épandage du fumier et du lisier évité contribuent, quant à eux, à hauteur de 17% du total des impacts évités.

Finalement, avec une approche par substitution, le facteur d'émission du biométhane AT est de -56,2 g CO₂e/kWh PCI. Cela signifie que les impacts évités par la co-production de digestat sont supérieurs aux impacts induits de la filière biométhane AT.

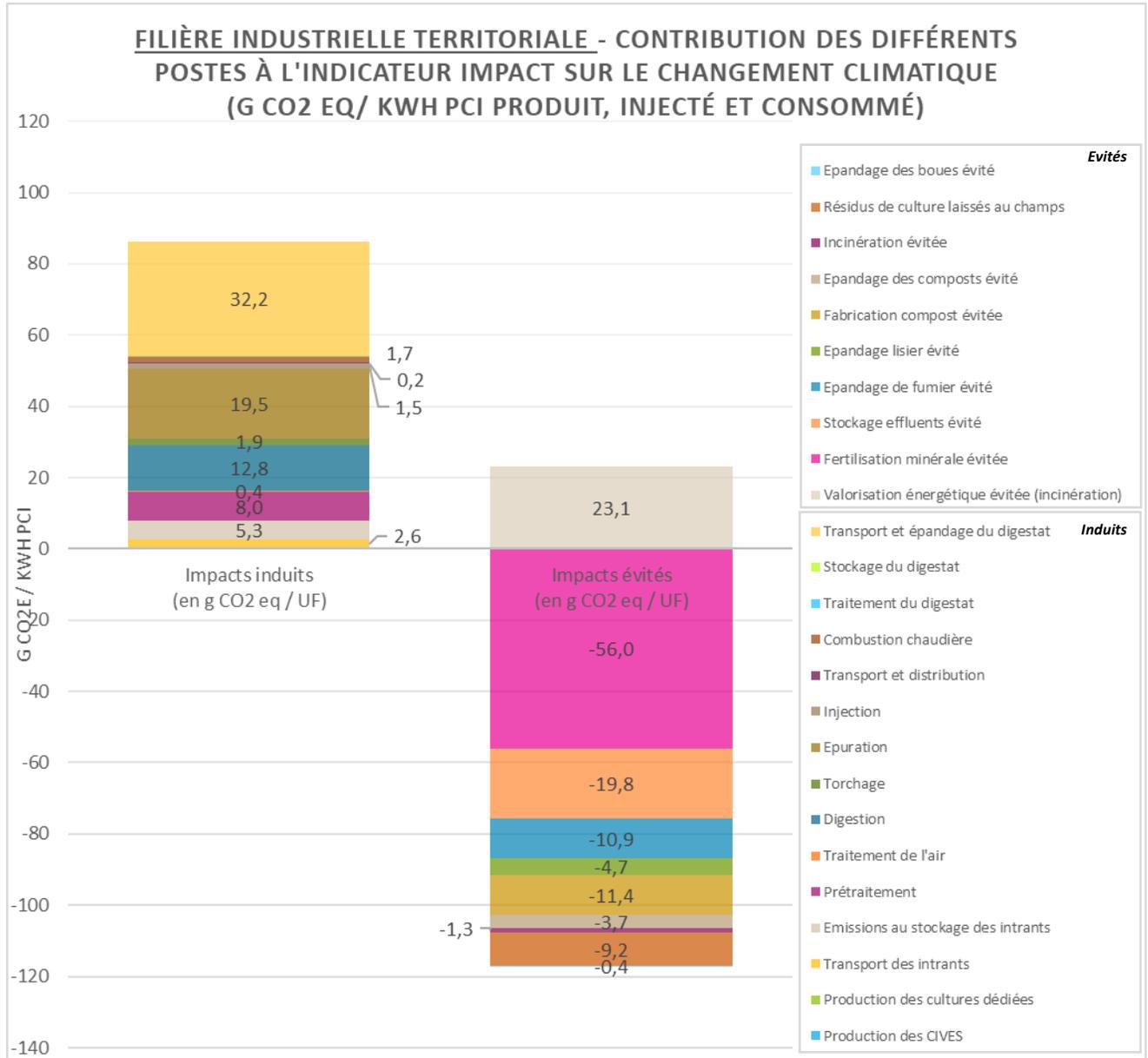


Figure 65 - Impacts sur le changement climatique de la filière IT pour la méthode par substitution (IPCC 2021)

Pour la filière IT, la prise en compte des impacts induits par la gestion et l'application du digestat comme fertilisant fait augmenter de manière significative l'impact de la filière pour atteindre 86,2 g CO₂e/ kWh PCI (Figure 65). Parmi ces impacts induits, 63% proviennent de la filière méthanisation et 37% du stockage et de l'épandage du digestat. Les impacts sur le changement climatique liés à la gestion du digestat étant en grande majorité causés par les émissions de N₂O au stockage et au champs. A ces impacts induits, se rajoutent des impacts de valorisation énergétique que la mise en place d'une filière biométhane empêche d'éviter, comme pour la filière AT. Ces impacts additionnels comptent pour 21% des impacts positifs, ce qui est nettement plus important qu'en filière AT.

Les impacts évités par la mise en place d'une filière biométhane AT sont supérieurs aux impacts induits de cette même filière, et atteignent 93,9 g CO₂e/kWh PCI. Tout comme pour les filières AA et AT, les principaux impacts évités sont liés au fait que la mise en place d'une filière biométhane IT évite de

produire, et d'épandre, de nouveaux fertilisants (engrais minéraux, compost, fumier et lisier), tout en évitant également d'incinérer certains biodéchets. Enfin, la mise en place d'une filière biométhane IT limite la durée de stockage des effluents d'élevage permettant d'éviter certaines émissions. Ainsi :

- La fertilisation minérale évitée contribue à hauteur de 60% du total des impacts évités (émissions de N₂O évitées à l'épandage) ;
- Le stockage d'effluent évité permet d'économiser des émissions de N₂O supplémentaires pour une contribution de à hauteur de 21% du total des impacts évités ;
- La fabrication du compost évitée (à hauteur de 12% du total des impacts évités) permet d'économiser des émissions de méthane biogénique et de N₂O ;
- L'épandage du fumier et du lisier évité contribuent à eux deux à hauteur de 17% du total des impacts évités.

Finalement, avec une approche par substitution, le facteur d'émission du biométhane IT est de -7,7 g CO₂e/kWh PCI. Cela signifie que les impacts évités par la co-production de digestat sont légèrement supérieurs aux impacts induits de la filière biométhane AT.

9. Limites et perspectives

Bien que cette étude vise à actualiser la dernière étude d'analyse du cycle de vie du biométhane injecté dans le réseau de gaz naturel français, à travers une combustion en chaudière pour la production de chaleur sur la base de données et d'hypothèses sourcées et plus récentes, le nombre important de modification entre cette étude et la précédente ACV induit un grand nombre de facteurs de variation : en absence d'analyse d'incertitude, cette mise à jour d'ACV ne permet pas de conclure sur la significativité de la différence observée entre les deux valeurs de facteur d'émission de GES (41,64 g CO₂ e/kWh PCI de biométhane ici calculé, versus 44,1 g CO₂e/kWh PCI dans la précédente étude).

Un enjeu majeur de la représentativité temporelle, géographique et technologique de cette modélisation repose sur les nombreuses hypothèses et données utilisées dans cette étude. La disponibilité des données permettant de décrire la filière au plus juste ainsi que la grande diversité de fonctionnement des unités de méthanisation et l'évolution constante de cette filière fait que certains indicateurs mesurés pourraient se dégrader ou encore s'améliorer. Par exemple d'un point de vue technologique, les données évoluent selon l'âge des unités, ou encore dans le cas des filières AA et AT, d'un point de vue agronomique, les données évoluent du fait de la grande diversité des systèmes d'exploitation, des contextes pédoclimatiques, de l'évolution de la réglementation et des pratiques.

De plus, cette analyse, bien qu'étayée par l'étude de deux approches ACV l'une par approche en allocation économique et l'autre par substitution et extension de frontières, ne parvient pas à rendre compte de toutes les conséquences et services environnementaux engendrés. En effet, dans le cas des filières agricoles (AA et AT), cette ACV attributionnelle ne mesure pas les effets indirects de l'implantation d'une unité de méthanisation sur le fonctionnement de l'exploitation. Par exemple, la modification de la rotation ou de la conduite des cultures, ne sont pas mesurées ici, bien que ces changements pourraient exercer une influence positive ou négative sur les résultats de certains indicateurs environnementaux. Une ACV conséquentielle pourrait permettre de mesurer ces impacts.

De même, les effets à long terme de l'apport de matière organique par le digestat ou encore la partie racinaire des CIVE peuvent améliorer la structure du sol, et ainsi contribuer à favoriser le développement des cultures de la rotation. Les impacts indirects sur la fertilité physico-chimique et la biodiversité du sol ne sont pas mesurés ici. Les co-bénéfices amenés par l'implantation de CIVE, comme la gestion des adventices qui pourrait engendrer une diminution de l'usage d'herbicides, ne sont également pas analysés ici.

L'analyse de sensibilité a pu démontrer que l'étude est sensible à deux enjeux importants :

- L'impact du biométhane est dépendant du **mix d'intrants** dont les caractéristiques sont très diverses. Chaque unité de méthanisation utilise une ration spécifique. Les valeurs du mix d'intrants sont des paramètres structurants de l'ACV. Visant une représentativité « en moyenne », les résultats de l'étude ne rendent pas compte de l'ensemble des cas possibles.

Avec le développement de la filière méthanisation ainsi que de la bioéconomie, les gisements de matières organiques sont de plus en plus prisés. Les ressources en effluents d'élevage pourraient représenter une moindre part du mix d'intrants, comblées par les CIVE, entraînant ainsi un risque d'augmentation des émissions de CO₂e de la filière. Notons par exemple le cas de la filière IT, de nouvelles unités basent une partie de leurs apports en biomasse sur des CIVE. Cette pratique n'a cependant pas été étudiée au sein de la présente étude réalisée à partir de l'analyse des plans d'approvisionnement d'installations existantes en 2021, pour l'estimation du mix d'intrant de cette filière. À l'avenir, dans le cas d'une potentielle mise à jour du facteur d'émission du biométhane, l'actualisation du mix d'intrants de la filière fera varier ses résultats en monocritère et multicritères. De plus, si l'utilisation de CIVE vient en remplacement d'intrants considérés comme des déchets dans le mix actuel, la filière connaîtra probablement une augmentation de son facteur d'émission.

Par ailleurs, les conditions climatiques à venir et en particulier les problématiques de sécheresse seront de moins en moins propices à l'implantation de CIVE d'été sans irrigation si les exploitants souhaitent parvenir à un taux de réussite de la culture suffisant et également atteindre des niveaux de rendements suffisants. L'étude actuelle ne considère pas d'irrigation des CIVE d'été, cependant selon les évolutions réglementaires et les modes de gestion des unités de méthanisation agricoles, cet impact pourrait à l'avenir demander une analyse approfondie.

- L'impact du biométhane est très dépendant **des taux d'émissions de méthane : fuites au niveau du digesteur et pertes liées au procédé d'épuration** qui structurent de manière conséquente le facteur d'émission de la filière. C'est le sujet majeur d'amélioration continue pour la performance GES de la filière et sa prise en compte dans les futures ACV.

D'autres part, le paragraphe suivant regroupe un ensemble de limite sur les données de l'amont agricole concernant ainsi les filière AA et AT.

- Le **stockage des effluents d'élevage** en amont du méthaniseur est un poste d'émissions dont les résultats peuvent beaucoup varier en fonction de la couverture ou non de la fosse de stockage de lisier. Les conséquences engendrées par le Plan national de Réduction des Emissions de Polluants Atmosphériques (PREPA) pour la période 2022-2025, comme le développement de l'utilisation de couvertures de fosses à lisier, pourront avoir un impact positif sur les émissions des filières qui utilisent cet effluent.
- Le stockage de carbone est estimé selon les proportions en ZV ou ZNV, cependant les agriculteurs en ZNV peuvent déjà mettre en place des cultures intermédiaires. Le stockage de carbone pourrait alors évoluer. En se basant sur l'étude de *Thomsen et al., 2013*, il n'a pas été considéré de déstockage de carbone sur le long terme lié à l'exportation des effluents d'élevage afin d'être digérés au sein du méthaniseur, ces derniers retournant au sol via l'apport de digestat (*cf. 4.3.3*). Cependant, une thèse publiée en juillet 2023 (postérieurement à la définition des hypothèses de cette étude) a démontré que la digestion des effluents d'élevage pouvait diminuer leur pouvoir amendant et engendrer un léger déstockage de carbone sur le long terme¹⁰⁴. Toutefois, cela concerne un digestat produit à partir d'un mix d'intrants composé à 100% d'effluents d'élevage.

Ce dernier paragraphe regroupe l'ensemble des limites concernant les données de logistique et technologique.

¹⁰⁴ LAUNAY Camille, Insertion de cultures intermédiaires énergétiques dans les systèmes de cultures en France : évaluation multi-échelles du potentiel de production et des impacts eau-azote-carbone, 2023

- Les données actuelles de distances de transport sont une première estimation des distances. Cependant, encore une fois selon le contexte local, la disponibilité des gisements de biomasse pourrait demander à retravailler ces données. De même, dans le cas de certaines unités de méthanisation regroupant un nombre conséquent de partenaires (fournisseurs de substrats), les distances pourraient être sous-évaluées. Ces aspects concernent cependant des cas particuliers, qui à l'heure actuelle restent anecdotiques.
- Les **consommations électriques** des équipements nécessaires au procédé de méthanisation peuvent être des contributeurs importants aux émissions de GES. A l'avenir, le mix électrique français devrait se décarboner davantage. Les émissions associées aux différents postes consommateurs d'électricité pourraient diminuer.
- L'impact de la mise en place de rebours au sein des réseaux de production de biométhane n'est pas pris en considération dans cette étude. En fonction de son développement dans les années à venir, l'intégration de cette étape dans le périmètre d'étude pourrait devenir judicieuse. Dans la mesure où le biométhane est aujourd'hui principalement consommé localement (injecté majoritairement dans le réseau de distribution), la mise en place de rebours demandera également à prendre en compte les potentielles fuites sur le réseau de transport de gaz.

10. Conclusions

La filière biométhane se développe de manière importante depuis plusieurs années et dans le même temps les enjeux énergétiques et de transition écologiques sont croissants. Cette ACV vise à actualiser les précédentes études réalisées par QUANTIS – ENEA Consulting depuis 2017. Les mises à jour successives permettent d'affiner les résultats d'impacts de la filière, en utilisant les avancées scientifiques, le développement des bases de données et ressources bibliographiques propres à la méthanisation.

L'étude évolue en parallèle de la filière comme pour les typologies de filières. En effet, l'ancienne filière Territoriale & Agricole est maintenant scindée en 3 filières : AA, AT et IT. De nouveaux aspects environnementaux tels que le stockage de carbone sont intégrés et les hypothèses de modélisation sont affinées.

Différentes méthodes d'ACV sont étudiées pour mesurer la multifonctionnalité de la filière : par l'allocation économique et par substitution et extension de frontières. Les méthodes de caractérisation IPCC 2021, EF 3.0 et INIES sont utilisées pour présenter les résultats d'une part en mono-indicateur et d'autre part en multi-indicateurs.

Avec un facteur d'émission de 41,64 g CO₂e/kWh PCI, le biométhane a un impact potentiel sur le changement climatique 82% plus faible que celui du gaz naturel. Son facteur d'émission reste cependant supérieur à celui d'autres énergies renouvelables ¹⁰⁵en France (biomasse bois énergie : 13,0 g CO₂e/kWh PCI, solaire thermique : 21,2 g CO₂e/kWh PCI...). La filière biométhane permet de décarboner de manière importante l'utilisation du gaz et d'accompagner la transition énergétique de la France vers une moindre dépendance aux énergies fossiles.

Afin de réduire le facteur d'émission et de s'approcher de celui d'autres énergies renouvelables, la gestion des émissions de méthane est un point de vigilance majeur, d'autant qu'elles peuvent survenir au niveau de plusieurs postes. Dans le cas des étapes de digestion et d'épuration, elles contribuent principalement aux émissions de GES. Sachant que ces deux postes sont pour les deux filières majeures, AA et AT, ceux

¹⁰⁵ FEDENE, méthodologie de calcul indicateurs de l'enquête nationale des réseaux de chaleur et de froid, 2021
https://www.fedene.fr/wp-content/uploads/sites/2/2021/04/Guide_m%C3%A9thodologique_EARCF2021-1.pdf

qui contribuent le plus aux émissions de GES en allocation économique. Le méthane biogénique est le GES qui influe le plus sur le facteur d'émission pour quatre des filières, c'est-à-dire AA, AT, IT et STEU. En filière Biodéchets et ISDND, les émissions de CO₂ et de CH₄ biogénique sont quasiment équivalentes rapportées en CO₂e. Finalement, les émissions de méthane biogénique issues de fuites ou de pertes participent à 57,9% du facteur d'émission de la filière biométhane. Dans la mesure où l'unité fonctionnelle de cette ACV est fonction d'une quantité d'énergie produite, les fuites peuvent rapidement faire varier les résultats étant donné que pour une même quantité d'intrants (et tous les impacts qui en découlent), la quantité de biométhane valorisable diminue. Enfin, cette contribution majeure des émissions de méthane aux impacts sur le changement climatique du biométhane, rend l'étude très sensible et dépendante des hypothèses de taux de fuite sélectionnées affectant ainsi l'incertitude du facteur d'émission de la filière.

L'analyse multicritères a pu mettre en avant des enjeux environnementaux complémentaires de la filière, autre que le changement climatique, tels que l'utilisation de ressources énergétiques non-renouvelables, les émissions de particules fines ou encore l'acidification des milieux. Bien qu'utilisant de la matière organique renouvelable comme source d'énergie, la filière biométhane reste dépendante de ressources non-renouvelables pour sa consommation énergétique que ce soit par le biais de l'électricité française à majorité nucléaire ou du gaz naturel pour certaines étapes (hygiénisation par exemple, ce qui à l'avenir devrait évoluer vers l'autoconsommation de biogaz). Enfin, les filières AA et AT, qui produisent la majorité du biogaz en France, sont dépendantes de la fertilisation des cultures, acidifiant et dégradant la qualité de l'air via des émissions d'ammoniac.

Enfin, l'approche par substitution avec extension de frontière montre que les impacts évités grâce à la méthanisation et ses cofonctions sont supérieurs aux impacts induits par la filière. La mise en place de filières biométhane semble donc avoir des impacts positifs du point de vue climatique, au vu du scénario de référence modélisé, et des hypothèses d'émissions de méthane retenues. Cette conclusion pourrait être consolidée par le biais d'une étude ACV conséquente complémentaire.