



ANALYSE DE CYCLE DE VIE DU BIOGAZ ISSU DE CULTURES ÉNERGETIQUES

Valorisation en carburant véhicule et en chaudière, après injection
dans le réseau de gaz naturel

Synthèse finale

Mars 2011

Cette étude a été réalisée pour le compte de l'ADEME par : Bio Intelligence Service
en partenariat avec l'EREP (Contrat n°0901C0149)

Coordination technique : Service Bioressources - Direction Production et Énergies Durables
(DEPD) – Service Prévention et Gestion des Déchets – Direction Consommation durable et
Déchets (DCDD) - ADEME

■ Remerciements - Avertissement

L'ADEME remercie vivement les membres du comité technique et le MAAPRAT pour leur participation, leurs apports à l'étude, la relecture des documents et leurs commentaires et suggestions.

Malgré la rigueur apportée à la collecte des données, des erreurs, omissions ou inexactitudes peuvent s'insérer dans cette étude. Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs. Les interprétations, positions et recommandations figurant dans ce rapport ne peuvent être attribuées aux membres du comité technique.

Comité de pilotage		
ADEME (services SBIO, SPGD, SAF, STM)		MAAPRAT
Comité technique		
APCA	APESA	ARVALIS
FNE	GrDF	MEDDTL
VEOLIA ENVIRONNEMENT		

■ Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

L'ADEME en bref

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer et du ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Elle participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable.

Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

www.ademe.fr

Sommaire

1. Glossaire.....	5
2. Résumé	7
3. Contexte, objectif et organisation de l'étude	9
3.1. Contexte.....	9
3.2. Objectifs de l'étude	9
3.3. Déroulement de l'étude	10
4. Principaux choix méthodologiques de l'ACV	12
4.1. Le référentiel 2008	12
4.2. Les filières étudiées.....	12
4.3. Les indicateurs d'impacts environnementaux suivis	13
4.4. Les frontières du système	14
4.5. L'unité fonctionnelle.....	15
4.6. La modélisation du digestat	16
4.7. Les sources de données.....	17
4.8. Filière de référence et tests réalisés.....	19
5. Limites de l'étude.....	20
6. Synthèse des résultats et enseignements	21
6.1. Quel est l'impact de l'introduction de cultures énergétiques dans le bilan environnemental d'une unité de méthanisation ?	21
6.2. Synthèse des paramètres clés	29
6.3. Perspectives d'amélioration	30

1. GLOSSAIRE

ACV : Analyse de Cycle de Vie

AFGNV : Association Française du Gaz Naturel pour Véhicules

AFSSET : Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail

BCAE : Bonnes Conditions Agricoles Environnementales

BioGNV : Gaz Naturel Véhicule produit à partir de biogaz

BOM : Benne à Ordures Ménagères

CH₄ : méthane

CIPAN : Cultures Intermédiaires Pièges à Nitrate

CITEPA : Centre Interprofessionnel Technique d'Etude de la Pollution Atmosphérique

CORPEN : Comité d'Orientation pour des Pratiques Environnementales Respectueuses

COVNM : Composés Organiques Volatils Non Méthaniques

CML : Centrummanagement Leiden (Institut des sciences environnementales de Leiden)

Directive ENR : Directive 2009/28/CE du Parlement Européen et du Conseil du 23 avril 2009, relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables

DMTA-p : Di-MéThénAmid-P, molécule active présente dans certains pesticides

GES : Gaz à Effet de Serre

GIEC : Groupement Intergouvernemental pour l'Etude du Climat. Aussi appelé IPCC en anglais, pour « Intergovernmental Panel on Climate Change »

GNV : Gaz Naturel Véhicule

HAP : Hydrocarbures aromatiques polycycliques

IAA : Industrie Agro-Alimentaire

IFP : Institut Français du Pétrole

ITB : Institut Technique de la Betterave

JRC : Joint Research Centre

MAAPRAT : Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du Territoire

MEDDTL : Ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement

MF : Matière Fraiche

MO : matière organique

MS : Matière Sèche

MSV : Matière Sèche Volatile

PAC : Politique Agricole Commune

PCI : Pouvoir calorifique inférieur

PSA : *Pressure Swing Adsorption*

THT : Tétrahydrothiophène, ou thiolane

tMF : tonne de matière fraiche

UF : Unité Fonctionnelle

UFIP : Union Française des Industries Pétrolières

VL : véhicule léger

2. RESUME

La méthanisation des déchets organiques de diverses origines est une voie prometteuse de traitement des déchets qui permet une production d'énergie. Produisant un gaz riche en méthane, le biogaz, pouvant être épuré, elle permet de proposer un produit de substitution au gaz naturel. Elle offre de plus un coproduit, le digestat, hautement valorisable en tant qu'engrais et amendement organique.

On peut toutefois s'interroger sur les bilans environnementaux de ces filières dès lors qu'elles ne sont plus uniquement une manière efficace de valoriser des déchets. En effet, les agriculteurs peuvent être tentés d'incorporer au mélange à méthaniser des matières premières agricoles cultivées à cette fin. Ces cultures dites énergétiques entraînent l'émission de molécules ayant un impact reconnu sur l'environnement (N_2O , NO_3 , NH_3 , etc) ainsi qu'une consommation d'énergie lors de leur production, directement ou à travers la production d'engrais.

C'est pour répondre à cette question que cette étude a été menée. Elle vise à dresser un premier diagnostic sur le rôle des cultures énergétiques dans les bilans environnementaux d'une filière de méthanisation.

Toutes les situations n'ont pu être étudiées. Un seul substrat principal a été étudié (le lisier) en co-digestion avec les cultures énergétiques ainsi que deux utilisations du biométhane produit (en carburant véhicule et en chaudière, après injection dans le réseau de gaz naturel). Elle a de plus été prudente dans les données utilisées. Si cette étude ne couvre pas toute la réalité des filières, elle permet cependant de proposer une première base d'analyse des effets de ces cultures sur les bilans environnementaux de la méthanisation agricole.

Ces travaux confirment les réductions d'émissions de GES intéressantes de la filière de méthanisation par rapport aux filières fossiles, comprises entre 50% et 70% selon les cultures et leur taux d'incorporation. Ces gains sont estimés sans prendre en compte les changements d'affectation des terres, qu'ils soient directs ou indirects. De tels changements, s'ils devaient exister, pourraient être de nature à réduire, voire annuler, ces gains. Les changements directs restent cependant peu probables et bien encadrés. Les liens de causalité entre l'utilisation de la culture énergétique et des changements indirects d'affectation des sols semblent quant à eux plus ténus que dans le cas des biocarburants du fait des quantités en jeu, des zones concernées, et de la diversité des matières pouvant entrer dans la composition d'un méthaniseur.

Ils montrent surtout que l'introduction de cultures énergétiques n'est pas de nature à annuler les réductions intéressantes d'émissions de GES d'une filière de méthanisation par rapport à des équivalents fossiles, sauf à imaginer des enjeux conséquents tels que les changements d'affectation des sols indirects. Avec un substrat à base de lisier, l'augmentation du taux d'incorporation des cultures énergétiques va même jusqu'à réduire les émissions de GES par MJ de biométhane obtenu du fait de la réduction des étapes de transport et de méthanisation liée au potentiel méthanogène supérieur des cultures énergétiques par rapport au lisier. Le test réalisé pour un mélange fumier-culture énergétique illustre une autre situation, pour laquelle les émissions de GES par MJ de biométhane sont très réduites à faible taux d'incorporation, et augmentent avec le taux de cultures énergétiques. Le niveau atteint à fort taux d'incorporation pour ce type de mélange est équivalent au niveau d'émission le plus bas obtenu pour le mélange lisier-culture énergétique (pour les plus faibles taux d'incorporation), montrant que même dans cette situation, le bilan GES reste assez peu dégradé par l'augmentation de l'incorporation de cultures énergétiques.

Les gains par rapports aux filières fossiles sur la consommation d'énergie non renouvelable apparaissent moins marqués à forte concentration en lisier en raison d'une consommation d'électricité notable lors de la méthanisation. L'apport de cultures énergétiques, très méthanogènes, permet de réduire la consommation d'énergie non renouvelable par MJ produit.

Ces gains se font au détriment d'autres problématiques environnementales. On parle alors de transferts de pollution. L'incorporation de cultures énergétiques entraîne des évolutions globalement défavorables sur les autres catégories d'impacts comme l'acidification, le potentiel d'eutrophisation, ou la consommation d'eau. Toutefois ces transferts n'existent pas pour les bandes enherbées ou restent modérés pour les cultures les plus extensives ou offrant de très bons rendements de matière fraîche à

l'hectare (prairies, betteraves à sucre). Par rapport aux impacts du Diesel, ces transferts n'apparaissent réellement problématiques que pour l'eutrophisation (quel que soit le taux d'incorporation) et l'acidification (à taux d'incorporation de cultures élevé).

Une analyse plus large devrait être menée afin d'estimer si les gains environnementaux (et technico-économiques) dépassent les transferts de pollution soulignés par cette étude. De même, une quantification des réductions possibles des pollutions par des pratiques agricoles améliorées pourrait mettre en perspective ce résultat en fournissant les niveaux d'impacts théoriques atteignables techniquement à moyen terme.

Aussi, ces résultats restent en partie dépendants des limites de modélisation inhérentes aux connaissances et outils actuels. L'amélioration de méthodes de caractérisation sur des indicateurs comme le potentiel de toxicité, la définition de méthodologies consensuelles, et l'acquisition de données plus fines sur les pratiques agricoles et sur les émissions permettront d'affiner l'image ici présentée.¹

Tableau 1 - Synthèse des résultats de cette étude

Synthèse des résultats	Positionnement des filières biométhane de référence (dans le cadre de cette étude)	Impact du taux d'incorporation	Paramètres déterminant ces effets
Emissions GES	+++	+ (possibles dans d'autres situations)	- transport - mix électrique - co-substrat
Consommation d'Energie non Renouvelable	+ (par rapport au GN) = (par rapport au Diesel)	+ +	- électricité et gaz naturel consommée lors de la méthanisation - mix électrique
Epuisement des ressources naturelles	+ + (sur le Epuis. Energies Fossiles) (Non déterminé sur Epuis. Métaux)	Non déterminé	Epuis. Energie Fossiles : - énergie consommée lors de la méthanisation; - puis Diesel et intrants des cultures
Consommation d'eau	- (non irrigué) - - (irrigué)	+ (non irrigué) - - (irrigué)	- irrigation - consommation d'électricité
Oxydation photochimique	++ (Diesel) - (GNV : utilisation véhicule) - - (GN : utilisation chaleur)	= (véhicule) + (chaleur)	- réduction des émissions de NOx lors de l'utilisation de carburants gazeux - effet des cult. éner. : effet balancé entre les émissions de NOx au champs et le moindre impact des transport du lisier - la modélisation des émissions de l'épandage des digestats serait à améliorer
Potentiel de toxicité humaine	=	+ (bandes enherbées) - - (majorité des cultures)	- matières actives utilisées - crédit lié à la substitution d'engrais minéraux
Acidification de l'air	= (par rapport au Diesel) - - - (par rapport au GN)	- -	- forme de l'engrais utilisé - gestion des épandages, - notamment ceux du digestat
Potentiel d'Eutrophisation aquatique	- (bd. enherbé, prairies) - - - (autres cultures)	= (bd. enherbées) - - - (autres cultures)	- quantité d'azote apporté, - forme de ces apports, climat, sols (valeurs moyennes pour cette étude) - risques érosifs de la culture et de la zone géographique pour le Phosphate
Explications	"+" = le biométhane est moins impactant que les filières fossiles testées	"+" = l'augmentation de l'incorporation de cultures dédiées réduit les impacts du MJ produit	

¹ La définition des filières biométhane de référence dans le tableau 1 est donnée au tableau 2, § 4.8, p17

3. CONTEXTE, OBJECTIF ET ORGANISATION DE L'ETUDE

3.1. CONTEXTE

Les critères d'évaluation de la durabilité des cultures énergétiques s'apprécient aussi en tenant compte de la hiérarchie des utilisations de la biomasse, telle que définie dans la politique de mobilisation de la biomasse française, à savoir l'alimentation en premier lieu, puis les bioproduits et amendements organiques, ensuite les biocarburants, puis la chaleur et enfin l'électricité. L'utilisation en tant que substrat pour la méthanisation n'est donc pas désignée comme prioritaire.

La méthanisation est une technologie de production de biogaz basée sur la dégradation par des micro-organismes de la matière organique, en conditions contrôlées et en l'absence d'oxygène. Le biogaz est un mélange composé essentiellement de méthane (CH₄) et de gaz carbonique (CO₂) produit par fermentation anaérobie (en absence d'air) de matières organiques, ou par méthanisation (cf. bioSNG obtenu via le syngaz). Ce biogaz aux spécifications du gaz naturel est dénommé « biométhane ».

Une large gamme de substrats organiques permet de produire du biogaz : boues d'épuration, déchets agricoles et effluents d'élevage (lisiers, fumiers), déchets de l'industrie agro-alimentaire, cultures énergétiques, déchets ménagers, Une distinction doit être faite entre méthanisation à la ferme, valorisant certains substrats et de taille plutôt modeste, et les installations collectives de plus grande taille et valorisant principalement des déchets urbains ou industriels.

Une fois le biogaz produit, différentes filières de valorisation sont envisageables, principalement selon la demande en énergie à proximité des installations. On distingue les filières traditionnelles et les filières émergentes. Les filières de valorisation largement développées en Europe² sont la cogénération d'électricité et la production de chaleur. En complément, on voit émerger en Europe de nouvelles filières, visant une substitution élargie du gaz naturel par le biométhane. C'est le cas de la production de carburant véhicule (biométhane carburant) ou de l'injection du gaz épuré dans le réseau de gaz naturel, déjà réalisée en Allemagne, en Suède et dans d'autres pays européens.

L'Allemagne, où ces filières ont commencé à se développer il y a plus de 10 ans, dispose d'un parc de près de 5000 unités en 2010, largement représenté par les installations à la ferme. Ces dernières utilisent essentiellement des cultures énergétiques pour produire une part notable de leur biogaz.

La situation en France est différente, avec moins de méthaniseurs installés. Les installations actuelles favorisent la co-digestion de déchets à l'échelle du territoire : déchets agricoles, des industries, ou des collectivités (boues de station d'épuration, déchets verts, etc). La méthanisation agricole est encore peu développée, mais fortement encouragée par les pouvoirs publics. Dans un contexte de fort développement de la filière agricole qui entraînera une raréfaction des gisements disponibles de substrats méthanogènes, les exploitants d'installations pourraient être amenés à produire des cultures énergétiques dédiées à la méthanisation pour sécuriser les approvisionnements et les investissements.

Or si les bénéfices de traiter les déchets par méthanisation sont évidents, l'introduction de cultures dans le dispositif nécessite de s'assurer préalablement du bien-fondé environnemental de la démarche.

² D'après « Quelle place pour la méthanisation des déchets organiques en Ile-de-France ? », ORDIF et ARENE, 2003.

3.2. OBJECTIFS DE L'ETUDE

Conformément aux objectifs de l'ADEME et du MAAPRAT, cette étude a pour vocation d'évaluer l'effet de l'incorporation de cultures énergétiques sur le bilan énergétique et environnemental du biométhane. Car même si les recommandations des pouvoirs publics s'orientent plutôt vers la valorisation des gisements de déchets, l'utilisation de cultures énergétiques paraît souvent nécessaire pour pouvoir sécuriser des projets, comme cela a été exposé précédemment.

De plus, la montée en puissance de la production de biogaz rend nécessaire de s'interroger sur une utilisation en substitution large aux combustibles fossiles. C'est pourquoi cette étude se propose de se focaliser sur les bilans menés sur la solution d'injection du biométhane dans les réseaux de gaz naturel existant, permettant de plus dans cette situation une comparaison directe avec les biocarburants liquides.

Ainsi, cette étude a pour objectif de répondre aux questions suivantes :

- Quel est le positionnement environnemental du biométhane produit en partie ou en totalité par des cultures énergétiques, par rapport au gaz naturel dans le cadre d'une utilisation chaleur après injection, et par rapport aux carburants fossiles dans le cadre d'un usage véhicule ?
- Y a-t-il des cultures énergétiques à promouvoir ou à éviter ?

Il ne s'agit pas d'une étude visant à déterminer la « meilleure » valorisation pour le biogaz du point de vue environnemental, mais bien d'étudier les résultats de biométhane selon différents niveaux d'incorporation de cultures énergétiques. L'analyse du bien fondé environnemental à utiliser des cultures énergétiques a été réalisée avec deux types de comparaisons :

- En premier lieu, la comparaison de l'évolution du résultat du biométhane avec l'augmentation du taux d'incorporation (évolution en relatif du résultat);
- En second lieu, en comparant les résultats obtenus pour le biométhane produit aux filières fossiles auxquelles il viendra se substituer (évolution en valeur absolue). Cette comparaison sera menée par rapport au gaz naturel et aux carburants fossiles pour les valorisations retenues (chaleur et carburant). Une brève comparaison des résultats des filières biocarburants (usage véhicule) sera menée dans un second temps pour mettre en perspective ces résultats.

Il s'est agi d'étudier si les gains en émissions de gaz à effet de serre du biométhane ne se dégradent pas trop avec des niveaux d'incorporation forts. De même, les possibles transferts de pollutions ont été étudiés sur une sélection de problématiques représentatives du secteur agricole et des carburants fossiles. Enfin, l'impact de certains paramètres dans ces résultats a été analysé, afin d'en tester la fiabilité et le cadre de validité (taille du méthaniseur, type de véhicule utilisé, etc).

3.3. DEROULEMENT DE L'ETUDE

Ce travail s'est appuyé sur les travaux récents menés sur les biocarburants pour le compte de l'ADEME, du MEEDDM, du MAAP et de FranceAgrimer : « Elaboration du référentiel méthodologique pour la réalisation d'ACV de biocarburants » (BIO IS 2008) et « ACV des biocarburants de 1^{ère} génération consommés en France » (BIO IS 2009).

Ainsi, cette étude a consisté à :

- adapter le référentiel « ACV des biocarburants de 1^{ère} génération » à l'étude des impacts environnementaux du biométhane, tout en tenant compte des problématiques spécifiques au biogaz,

- utiliser ce référentiel pour réaliser l'analyse de cycle de vie du biométhane dans deux de ses différentes utilisations.

Pour cela, un comité technique a suivi le travail mené par le consortium BIO IS – EREP. Il a permis d'apporter un regard critique aux données proposées, de contribuer à la collecte des données nécessaires. Il a enfin été réuni pour discuter et valider les résultats finaux et les enseignements qui peuvent en être tirés.

4. PRINCIPAUX CHOIX METHODOLOGIQUES DE L'ACV

4.1. LE REFERENTIEL 2008

La présente étude s'appuie sur les recommandations du référentiel défini en 2008 pour réaliser les ACV des filières carburants. Toute personne désirant une présentation détaillée de l'étude « 2008 » peut utilement se reporter au référentiel, disponible en téléchargement sur le site Internet de l'ADEME : <http://www2.ademe.fr>. Toutefois, la présente étude a nécessité de prolonger les travaux de 2008 en intégrant les spécificités des filières biométhane et en adaptant au besoin la méthodologie développée dans le référentiel 2008. Ces travaux sont présentés de manière détaillée dans le rapport complet de l'étude ACV du biogaz issu de cultures énergétiques.

4.2. LES FILIERES ETUDIEES

Le champ de la présente étude couvre la production de biogaz à partir de différentes cultures énergétiques :

- Les cultures conventionnelles : Maïs ensilage, Triticale, Betterave à sucre / fourragère,
- Des couverts herbacés : Prairies, Bandes enherbées (surfaces définies par les BCAE³ de la PAC),
- Les cultures dédiées : Sorgho biomasse.

Le switchgrass (panic érigé), initialement prévu dans le projet, a été jugé peu pertinent par rapport aux objectifs de méthanisation par les membres du comité technique. Il a donc été supprimé de la liste des cultures à envisager. De même, le maïs biomasse a également été supprimé de la liste durant la collecte des données. En effet, il n'y avait pas de données d'itinéraire technique spécifiques au maïs biomasse, à l'heure actuelle tout au moins. De plus, les faibles différences entre maïs biomasse et maïs ensilage (en termes de rendement, caractéristiques) expliquent ce retrait.

Les cultures énergétiques ont été envisagées en tant qu'unique co-substrat, en addition à un substrat principal, le lisier porcin. **Il s'agit d'un choix à but prospectif, et non d'un choix politique**, visant à prévoir les impacts environnementaux d'un scénario privilégié du fait de sa simplicité (on ne joue pas sur des mélanges trop composites). Il est également intéressant parce qu'il imite le scénario qui se développe en Allemagne.

Ces filières ont été comparées :

- au diesel (spécifications 2009), essence (spécifications SP95, seulement pour les véhicules légers) et Gaz Naturel Véhicule pour un usage véhicule ;
- au gaz naturel lorsqu'utilisé en substitution dans le réseau ou sous forme de combustible chaleur.

4.3. LES INDICATEURS D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX SUIVIS

Afin d'évaluer les impacts environnementaux et sanitaires, il a été décidé d'étudier neuf indicateurs environnementaux conformément aux demandes de l'ADEME et du MAAPRAT. Ces indicateurs ont été retenus pour le large spectre de problématiques environnementales qu'ils couvrent et pour leur pertinence pour les filières étudiées.

³ Bonnes Conditions Agricoles et Environnementales

Les facteurs de caractérisation issus du modèle ReCiPe sont utilisés. Cette méthode, qui a vu le jour récemment à partir de la fusion et de la mise à jour de deux méthodes, dont CML⁴ (utilisée dans l'étude ACV biocarburants), offre plusieurs avantages. Bien que très récente, elle jouit d'une reconnaissance large au sein de la communauté ACV de par la notoriété des méthodes dont elle découle. Elle s'inscrit dans leur continuité, permettant de retrouver une approche et des indicateurs proches. Elle est reconnue pour proposer des valeurs plus robustes sur certaines molécules, en particulier pour les flux liés aux activités agricoles. Enfin, elle propose des indicateurs endpoint permettant d'agréger les résultats dans une unité unique si jugé nécessaire.

Tableau 2 - détail des 9 indicateurs d'impact étudiés

Potentiel de réchauffement climatique	Emissions de gaz à effet de serre (GES)	Caractérise l'augmentation de la concentration atmosphérique moyenne en substances d'origine anthropique telles que le dioxyde de carbone (CO ₂), le méthane (CH ₄), ou le protoxyde d'azote (N ₂ O)	kg éq. CO ₂	+++
Bilan énergétique	Consommation d'énergie primaire non renouvelable	Caractérise la consommation des sources d'énergie extraites des réserves naturelles non renouvelables (charbon, gaz naturel, pétrole, uranium) nécessaires à la production du biocarburant	MJ	+++
Consommation de ressources	Épuisement des ressources métalliques	Concernent l'extraction de ressources naturelles considérées comme non renouvelables, i.e. consommées à un rythme supérieur au temps nécessaire à leur reconstitution naturelle.	kg d'équivalent Fer	++
	Épuisement des ressources fossiles non renouvelables		kg d'équivalent pétrole	+++
	Consommation d'eau	Comptabilise toutes les consommations d'eau prélevées dans l'environnement. Elle n'exprime pas en revanche l'intensité des impacts.	m ³	+
Santé humaine	Oxydation photochimique	Caractérise les impacts dus aux substances organiques (composés organiques volatils et oxydes d'azote) émises et conduisant à la formation d'ozone de basse atmosphère	kg éq. COVNM	+
	Potentiel de Toxicité humaine	Evalue les effets toxicologiques chroniques sur la santé humaine des substances cancérigènes et non cancérigènes	Kg éq. 1-4-dichlorobenzène	? ⁵
Qualité des écosystèmes	Acidification de l'air	Evalue les émissions de molécules acidifiantes, principalement NH ₃ et SO ₂ .	kg éq. SO ₂	++
	Eutrophisation aquatique	Evalue la quantité de nutriments favorisant la prolifération de micro algues, plancton,....	Kg N et kg P	?

⁴ CML : Centrummanagement Leiden (Institut des sciences environnementales de Leiden), et par extension, nom de la méthode de caractérisation des impacts en ACV développée par ce centre.

⁵ La robustesse de ces indicateurs est parfois discutable selon le type de produit analysé. En effet, les seuils temporels et spatiaux ainsi que les effets « dose-réponse » ne sont pas pris en compte dans les modèles, et la toxicité de certaines substances n'est pas toujours bien connue (manque de bases de données fiables). Aussi, il est bon de conduire des analyses de sensibilité sur ces résultats en utilisant d'autres méthodes de caractérisation. Une telle analyse est proposée ci-après, comparant les résultats issus de ReCiPe et de Usetox pour la toxicité humaine.

4.4. LES FRONTIÈRES DU SYSTÈME (ÉTAPES DU CYCLE DE VIE CONSIDÉRÉES)

Les bilans ont été calculés sur les étapes successives de fabrication des combustibles (du puits au réservoir), puis lors de leur utilisation (du réservoir à la roue). Le diagramme ci-après (figure 1) présente de manière générique les étapes du cycle de vie considérées dans l'étude, ainsi que les principaux intrants et coproduits. Quelques précisions sont apportées ci-dessous sur les périmètres et intrants considérés à chaque étape.

Étape agricole : à ce stade, le système considéré est la parcelle agricole.

Les intrants suivants sont pris en compte :

- les semences,
- la consommation de Diesel pour la culture et pour le transport de la récolte,
- la production et l'utilisation des intrants de fertilisation, des produits phytosanitaires,
- l'énergie et l'eau pour l'irrigation le cas échéant,
- Les émissions de N₂O, de nitrate, d'ammoniac, de pesticide vers l'eau, l'air ou le sol, ainsi que les molécules liées à la combustion du Diesel lors des travaux agricoles sont aussi comptabilisées.
- l'énergie pour le séchage

Étape de transport des substrats : ceci correspond au poste important des transports des substrats (lisier et culture énergétique) vers le lieu de méthanisation. La modélisation de ce transport a été affinée en raison de son rôle potentiellement important dans le résultat.

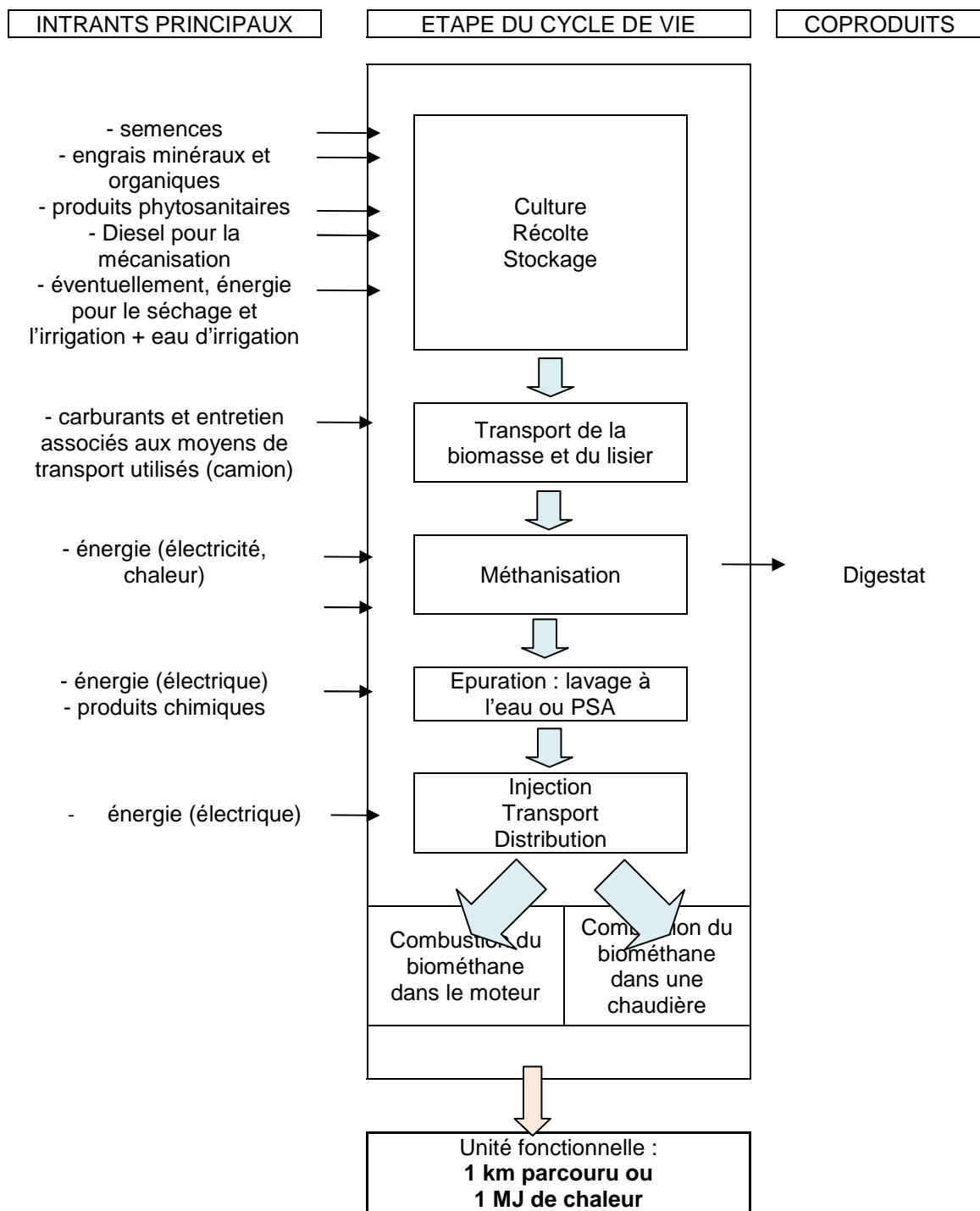
Étapes de méthanisation et d'épuration : tous les flux entrants et sortants du périmètre du site de fabrication sont comptabilisés, à l'exception de ceux liés au personnel (déplacement, éclairage des locaux...). Les intrants principaux sont l'énergie consommée pour la manipulation des substrats, la production du biométhane et son épuration. Deux types d'épuration ont été testés : l'épuration par lavage à l'eau, et l'épuration par système PSA. Il est à noter qu'avec ces systèmes d'épuration, le biométhane pris en compte ne répond pas au critère de 100 ppm maximum de dioxygène requis par GrDF pour l'injection sur le réseau. Il a été considéré qu'une dérogation, souvent accordée par GrDF lorsque le biométhane ne répond pas complètement à leurs critères, serait plus probable sur ce paramètre. Une épuration plus poussée a été simulée en analyse de sensibilité.

Étapes transports et distribution des combustibles : cette étape a été analysée avec l'aide de GrDF. L'odorisation, l'injection et le transport ont été pris en compte, tant en émissions qu'en consommation. Un taux de perte de 0,018% a été considéré dans le réseau. La compression en station essence service pour l'usage véhicule entre dans ce poste.

Étape utilisation (véhicule ou chaudière) : seuls les flux liés à la combustion ont été pris en compte (consommation de carburant et émissions vers l'air). Ce choix a été fait en raison de l'objectif comparatif dédié à l'étude. Les amortissements et réparation du véhicule ou des chaudières sont considérés identiques ou en tout cas de variation marginale, quel que soit le carburant.

Pour les **filières fossiles**, ces mêmes étapes sont prises en compte et intègrent la production du pétrole brut et du gaz naturel, son transport, son raffinage (pour le pétrole), sa mise à disposition et les émissions afférentes.

Figure 1 – Description du cycle de vie des filières biogaz étudiées



4.5. L'UNITE FONCTIONNELLE

Cette étude vise à comparer le positionnement des filières biométhane issues des cultures énergétiques à des filières fossiles équivalentes. Cette comparaison doit porter sur deux types de valorisation : en tant que carburant véhicule et à des fins de production de chaleur. L'unité fonctionnelle doit traduire le service rendu par les différents combustibles. Les unités fonctionnelles suivantes ont été choisies pour servir de base à la comparaison :

Permettre le déplacement d'un véhicule donné sur un 1 km

et

Produire 1 MJ de chaleur par une chaudière domestique

Toutefois pour des raisons pratiques de comparaison pour cet usage, les résultats ont été également exprimés en kWh

4.6. LA MODELISATION DU DIGESTAT

Sur les méthodes d'allocation :

Qu'est ce qu'une allocation ?

Les filières de production génèrent rarement un seul produit final. Il est fréquent que plusieurs coproduits soient générés en même temps à une étape (ex : farine, sons, et gluten lors de la meunerie). Lors de la réalisation de bilans environnementaux, il est nécessaire de s'interroger sur l'affectation à chaque coproduit ainsi obtenu de l'ensemble des charges environnementales ayant eu lieu en amont de leur obtention.

Il existe différentes méthodes d'allocation pour répartir les charges environnementales entre produits et coproduits, et le choix de la méthode influence fortement les résultats d'ACV. Comme les premiers choix d'allocation proposés par la norme ISO sont en général rarement applicables, le débat se porte alors sur la recherche d'un système de valeur pouvant servir de base à une répartition par prorata des impacts de l'amont. Le choix du paramètre sous-tendant le prorata est alors déterminant pour connaître la part relative attribuée à chaque coproduit (valeur marchande ? masse ? pouvoir calorifique ? autre paramètre physique déterminant la valeur du produit ? etc.).

Le tableau ci-dessous rappelle les recommandations émises lors de l'ACV des biocarburants de 1^{ère} génération.

Tableau 3 – Synthèse des recommandations issues de l'étude « Biocarburants 2009 » concernant les méthodes d'allocation

Les coproduits sont...	La méthode recommandée est	Précaution
...épanchés	Substitution	...
... utilisés en alimentation animale	Prorata énergétique entre coproduits d'une étape	Faire une analyse de la réalité physique du procédé en amont
...utilisés dans l'industrie		
...utilisés à des fins énergétiques	Substitution	Mix énergétique si export d'électricité

La présente étude a permis de confirmer la pertinence de cette approche pour les filières de méthanisation. En effet, un seul coproduit agricole existe, le digestat, qui est le résidu issu de la méthanisation. Il est riche en matière organique non dégradée, en matières minérales (azote, phosphore, potassium) et en eau. Il s'apparente à un engrais liquide, plus fluide que le fumier et inodore. Les qualités du digestat permettent bien souvent aux agriculteurs de l'utiliser en substitution à des engrais minéraux d'origine fossile. En cohérence avec la méthodologie de l'ACV des biocarburants, il a donc été proposé que **ce coproduit soit traité par substitution**. La substitution porte sur l'azote contenu dans le digestat. Les autres éléments nutritifs contenus dans le digestat ne servant pas ou secondairement dans l'élaboration des plans de fumures, ils n'ont pas été pris en compte pour la substitution.

Quel azote contribue à cette substitution ?

Pour des substrats qui étaient déjà valorisés en épandage avant la mise en place de la filière de méthanisation, comme le lisier, la question se pose de savoir s'il faut et comment les substituer. Cette étude propose de ne tenir compte que du différentiel d'azote efficace réellement valorisé par les plantes (ie de la différence de valeur fertilisante entre le lisier directement épandu et ce même lisier devenu digestat, le nouveau produit épandu). L'écart entre les deux étant très faible et assez peu documenté, il a été décidé de ne pas en tenir compte. Inversement, et pour les mêmes raisons, il a été décidé de ne pas prendre en compte les effets pressentis pour le digestat d'une plus faible participation au stockage de carbone dans le sol par rapport au lisier, la faible quantité de carbone du lisier ayant été méthanisée.

En revanche, l'azote contenu dans les cultures énergétiques est bien de l'azote qui n'était pas apporté avant la mise en place de la méthanisation. Cet azote supplémentaire apporté vient donc bien réduire les besoins d'apports en azote minéral.

4.7. LES SOURCES DE DONNEES

Le tableau ci-dessous récapitule les sources de données utilisées. Ils donnent de plus les grandes lignes de description de la représentativité de ces données et de leur précision estimée. Cette précision ne tient compte que des paramètres d'incertitude sur la donnée elle-même, et non de la variabilité possible qui peut exister en lien avec différentes technologies, localisations, etc, d'où des valeurs pouvant paraître faibles parfois.

Tableau 4 - Synthèse sur les sources de données et la qualité des données

Culture	Rendement	ARVALIS, ITB Etude Oreade-Breche ⁶	France, parfois régions françaises	Itinéraires techniques moyens, pouvant intégrer une part de non labour lorsque représentatif (triticale), sans irrigation, sauf pour la betterave à sucre	5%
	Apport d'engrais	ARVALIS, ITB Etude Oreade-Breche	Sauf données NOx (INRA), issues d'études plus ciblées sur quelques parcelles		10% pour les engrais minéraux, 20% pour l'azote organique
	Emissions N ₂ O Autres polluants (NH ₃ , NO ₃ , etc)	Facteurs d'émissions du GIEC Facteurs d'émissions du CORPEN, données issues de l'INRA			50%, cette donnée est très variable selon les sols et le climat.
Transport	Distance de transport	Hypothèse BIO IS	France/Suisse	Transport modélisé par des camions de 12 T de charge utile, avec un taux de chargement de 80%	20%, il s'agit d'une estimation à partir des volumes nécessaires et des productions moyennes en France
Méthanisation	Rendement	EREP	Suisse/Allemagne	Digesteur à flux continuellement mélangé, température mésophile	5%
	Consommations	EREP			10%
Epuraton	Rendement	EREP	Suisse/Allemagne	Epuraton par lavage à l'eau	5%
	Consommations	EREP			10%
Transport et Distribution	Consommation	GrDF + hypothèse BIO IS	France	Réseau sous pression GrDF, système de compression classique	30%, il s'agit de données moyennes, et celle de distribution en station service est reconstruite à partir de plusieurs études bibliographiques.
Combustion chaudière	Rendement	GrDF	France	Mix entre chaudières standard et à condensation	5%

⁶ « Méthanisation agricole et utilisation de cultures énergétiques en co-digestion : avantages/inconvénients et optimisation », Oreade-Breche, 2009

	Emissions	Ecoinvent	Suisse, extrapolé à l'Europe	Données pour chaudières standard et à condensation, sans prise en compte des amortissements	10%
--	-----------	-----------	------------------------------	---	-----

4.8. FILIERE DE REFERENCE ET TESTS REALISES

Le schéma suivant synthétise l'ensemble des configurations analysées. Les différents tests réalisés en faisant varier ces paramètres sont aussi rappelés, ainsi que les situations non couvertes dans ce projet.

Figure 2 - Filière principale et tests réalisés



Note : les ratios et pourcentages présentés (1/3, 2/3 et 90%) font référence à la part de biogaz produite à partir des cultures énergétiques

5. LIMITES DE L'ETUDE

Ces résultats ont été obtenus dans un cadre spécifique plusieurs fois rappelé dans le rapport complet. Rappelons en les idées fortes :

- **La modélisation effectuée, même si elle couvre une large gamme de cultures et de tests, se place dans une situation particulière.** C'est notamment le cas avec un substrat principal unique, le lisier, aux propriétés particulières (notamment faible pouvoir méthanogène). Le mélange lisier et cultures énergétiques est peu réaliste du point de vue technique (quantités de lisier à mobiliser) pour obtenir des fortes puissances comme dans le cas de méthaniseurs de 300 m³/h et 700 m³/h. De même, la valorisation du biométhane par injection dans le réseau donne un bilan par MJ produit différent d'une valorisation locale par cogénération, pour laquelle la chaleur peut être valorisée sur place ainsi que l'électricité. Il ne faut donc pas généraliser ces résultats à d'autres situations.
- **Une modélisation prudente dans ses choix :** la situation particulière décrite au point précédent place les résultats de cette étude à un niveau prudent d'estimation des impacts du MJ de biométhane. De manière plus générale, certains choix méthodologiques réalisés ont plutôt été conservateurs : il s'agit notamment du fait de considérer que le coefficient d'équivalent azote du digestat était identique à celui du lisier, neutralisant ainsi l'effet de substitution d'engrais minéraux pour la part de digestat provenant du lisier. Il n'a pas été considéré de substitution sur les engrais minéraux phosphatés grâce au digestat, la prise en compte de ce paramètre n'étant pas rapporté comme appliquée dans la pratique. En contrepartie, l'effet d'apport carboné dans le sol n'a pas été jugé différent. Les émissions lors de la phase de stockage du lisier n'ayant pas été prises en compte dans le scénario de base, les émissions lors du stockage du digestat ne l'ont pas été non plus. Enfin, les données de consommation de chaleur de la méthanisation sont relativement prudentes au regard du cas France où la température extérieure plus élevée que dans les pays ayant servi de base aux modèles d'estimation et le caractère récent des méthaniseurs devraient plaider pour des consommations réduites d'énergie.
- **Le niveau de modélisation ne permet pas une comparaison entre cultures énergétiques, pour tous les indicateurs.** La comparaison entre cultures pour le potentiel de toxicité nécessiterait la prise en compte exacte et précise des matières actives utilisées pour chaque itinéraire technique moyen. De même pour l'eutrophisation ou l'épuisement des ressources métalliques, les données limitées pour certaines cultures (sorgho, prairies, betterave fourragères par exemple) rendent l'utilisation des résultats par filière limitée.
- **Une non prise en compte des changements d'affectation des sols indirects :** conformément au référentiel biocarburant 2008, il a été considéré qu'il n'y avait pas de déstockage de carbone à prévoir pour cause de passage de terres anciennement en forêt ou en prairie en culture arable à cause de la méthanisation, les prairies permanentes étant sanctuarisées par la PAC et la déforestation peu fréquente et très encadrée. De plus, il a été fait le choix de ne pas proposer d'analyse de sensibilité sur d'éventuels changements d'affectation indirect d'usage des sols, le lien de cause à effet étant plus tenu que dans le cas des surfaces en biocarburant, du fait des quantités en jeu, des zones concernées, et de la diversité des matières pouvant entrer dans la composition d'un méthaniseur. En revanche, ce choix et la possible évolution des résultats si des changements indirects devaient être pris en compte, sont soulignés et rappelés dans le rapport pour alerter l'attention du lecteur.
- **Les amortissements du matériel :** les amortissements des installations de méthanisation ou de raffinage des carburants pétroliers n'ont pas été pris en compte, conformément au référentiel biocarburant 2008. Un test a été ajouté pour quantifier les impacts de ce choix indicateur par indicateur.

6. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS ET ENSEIGNEMENTS

Les résultats obtenus et les tests réalisés ont permis d'examiner l'ensemble des questions visées par cette étude. Ces réflexions tiennent compte des analyses de sensibilité réalisées sur les hypothèses majeures. Cette analyse est regroupée sous forme d'enseignements, présentés ci-dessous.

Les principaux résultats appuyant ces enseignements sont intégrés à cette présentation.

Quelques principes pour la bonne compréhension de la présentation des graphiques de résultats

- Les résultats sont donnés par défaut pour la filière de référence, à savoir une proportion du biométhane produit par la culture énergétique à hauteur de 33%.
- Lorsqu'il est fait mention, sans autre précision, de résultats donnés pour "l'utilisation véhicule", il s'agit de la filière de référence choisie, à savoir un bus. Les résultats sont alors présentés par km parcouru par un bus.
- De même, lorsque les résultats sont donnés pour l'« utilisation chaleur », il s'agit de la filière de référence 2010, avec la structure suivante du parc de chaudières (90% de standard et 10% à condensation). Les résultats sont alors présentés pour 1 MJ de chaleur produit.
- Le taux d'incorporation de cultures énergétiques est donné par rapport au biométhane produit. Il est mentionné par les termes suivants : "1/3 incorporation" (lire : mélange lisier de porc – culture énergétique pour lequel 33% du biométhane est produit à partir de la culture énergétique), "lisier – culture 66%-33%" (même signification).

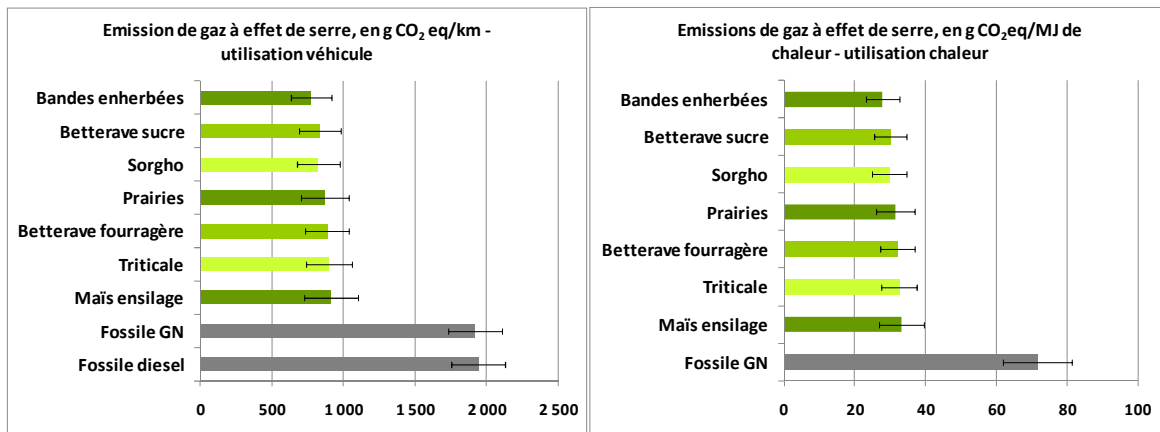
6.1. QUEL EST L'IMPACT DE L'INTRODUCTION DE CULTURES ÉNERGETIQUES DANS LE BILAN ENVIRONNEMENTAL D'UNE UNITÉ DE MÉTHANISATION ?

1. Enseignement n°1 : les résultats sont en cohérence avec les précédentes études comparatives entre produits bio-sourcés et produits équivalents issus des filières fossiles, mais montrent des transferts de pollution moins marqués.

Comme c'est le cas dans les comparaisons de produits bio-sourcés par rapport à leur équivalent fossile, on observe des bilans différenciés selon les catégories d'impact. Les filières bio-sourcées présentent en général des réductions en termes d'émission de GES, ou de consommation d'énergie non renouvelable. En revanche, ces réductions entraînent des transferts de pollution avec des impacts plus pénalisants pour des catégories comme le potentiel d'eutrophisation, d'acidification, la consommation d'eau ou le potentiel de toxicité. La présente étude confirme cette tendance, avec un positionnement général des filières de méthanisation étudiées en ligne avec ce constat général.

Les réductions d'émissions de GES s'avèrent intéressantes et bien au-delà de la plage liée aux incertitudes et imprécisions des données. Ils s'échelonnent entre 50% et 70% selon les cultures et le taux d'incorporation. Cela est d'autant plus vrai que le système étudié, une méthanisation de lisier avec consommation d'électricité et de gaz provenant du réseau, n'est pas le système le plus favorable en matière de bilan.

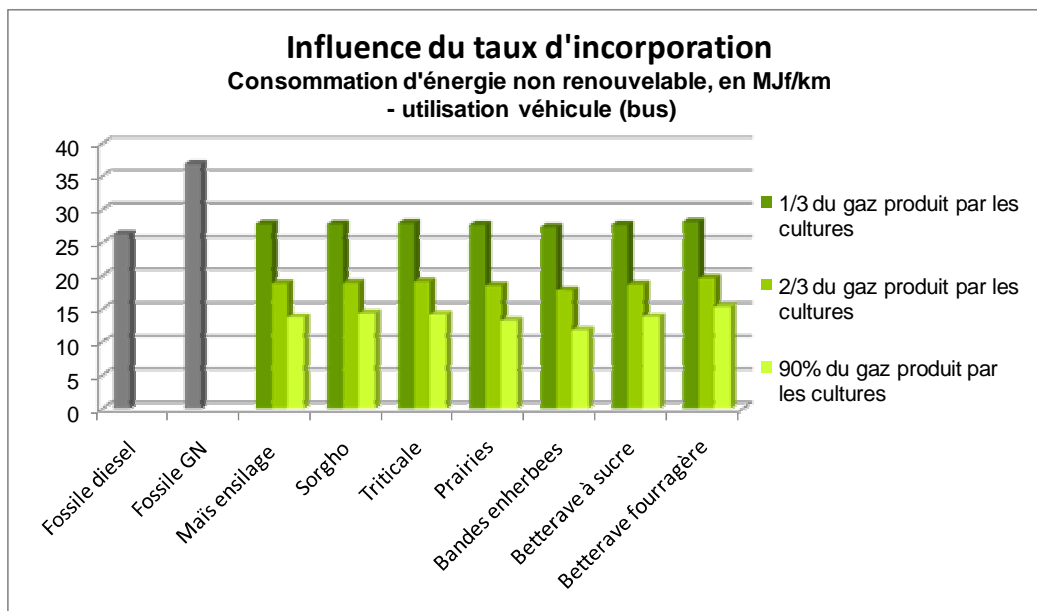
Figure 3 – Résultats sur les émissions de GES pour la filière de référence



Le test consistant à remplacer le lisier par du fumier permet de confirmer que le biométhane produit à partir d'une co-digestion avec un substrat plus méthanogène que le lisier présente des réductions d'émissions de GES encore plus intéressantes que celles présentées dans cette étude pour les faibles taux d'incorporation de cultures énergétiques. La réduction des émissions de GES du biométhane issu du mélange fumier-maïs à 33% est de l'ordre de 80% par rapport aux références fossiles dans le test fumier réalisé, malgré l'effet de déstockage du carbone du sol pris en compte pour cette simulation.

Les réductions sur la consommation d'énergie non renouvelable sont moins marquées, voire quasi nulles à faible taux d'incorporation des cultures énergétiques. Cela résulte d'une consommation d'électricité notable lors de la méthanisation qui présente un rendement faible lorsque le lisier est en grande quantité. Là aussi, l'utilisation du lisier comme substrat et une consommation d'électricité du réseau jouent en défaveur de cet indicateur.

Figure 4 – Résultats sur la consommation d'énergie non renouvelable et Influence du taux d'incorporation sur ce résultat.



Les réductions d'émissions de GES sont contrebalancées par des désavantages concernant d'autres catégories d'impact. La consommation d'eau, l'acidification et l'eutrophisation sont en défaveur des filières de méthanisation. Cependant, ce second volet doit être ici partiellement nuancé. Certaines catégories d'impact en général défavorables aux filières bio-sourcées présentent ici des bilans très proches de la filière Diesel (usage véhicule). C'est notamment le cas pour les catégories d'impact

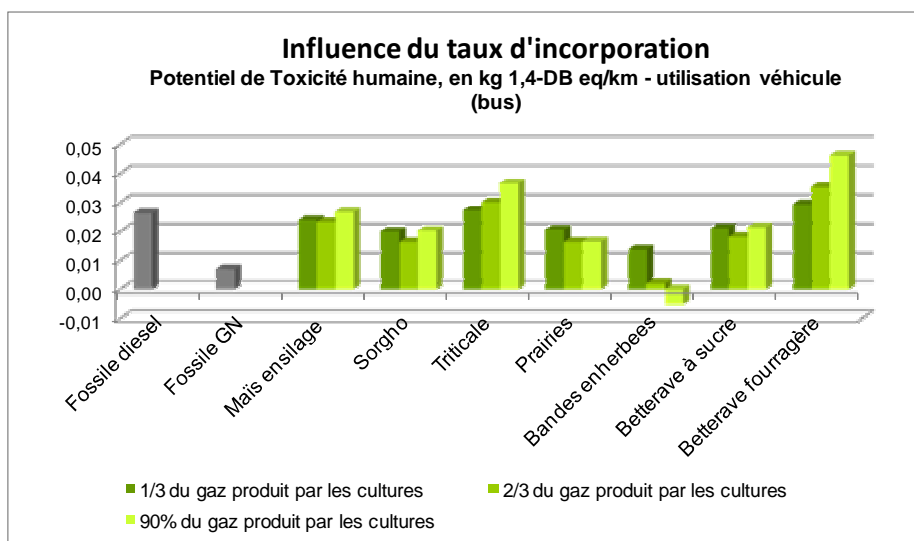
comme l'oxydation photochimique ou l'acidification de l'air. A taux modéré d'incorporation des cultures énergétiques (33% du biométhane produit), le biométhane ici modélisé ne présente de transfert de pollution que pour l'eutrophisation. Les indicateurs sont à minima identiques (dans la limite de la précision des indicateurs) ou meilleurs sur l'ensemble des autres critères étudiés.

- **Enseignement n°2 : dans les conditions testées, l'incorporation de cultures énergétiques renforce les écarts globaux entre biométhane et ressources fossiles. Notamment, l'augmentation du taux d'incorporation des cultures énergétiques réduit les émissions GES du biométhane obtenu à partir d'un mélange lisier + culture énergétique.**

Contrairement à l'idée préconçue que la méthanisation de cultures énergétiques devait présenter des bilans GES plus défavorables que celle des déchets, ce travail permet de dresser un bilan différent pour la situation étudiée. On voit en effet que les cultures énergétiques peuvent contribuer, **dans le contexte de cette modélisation** (co-substrat peu méthanogène), à réduire le niveau des émissions de GES du MJ moyen de biométhane produit.

Plus globalement, l'incorporation de cultures dédiées fait ressortir de manière plus marquée les avantages et inconvénients des produits bio-sourcés. Cela résulte principalement des écarts d'impact entre la culture énergétique étudiée et le co-substrat auquel elle se substitue. Ce substrat est ici un lisier, qui est un produit à la capacité méthanogène faible et qui a été modélisé en tant que déchet de la filière d'élevage, donc sans impact pour sa production.

Figure 5 – Influence du taux d'incorporation de culture énergétique sur l'impact de potentiel de toxicité humaine



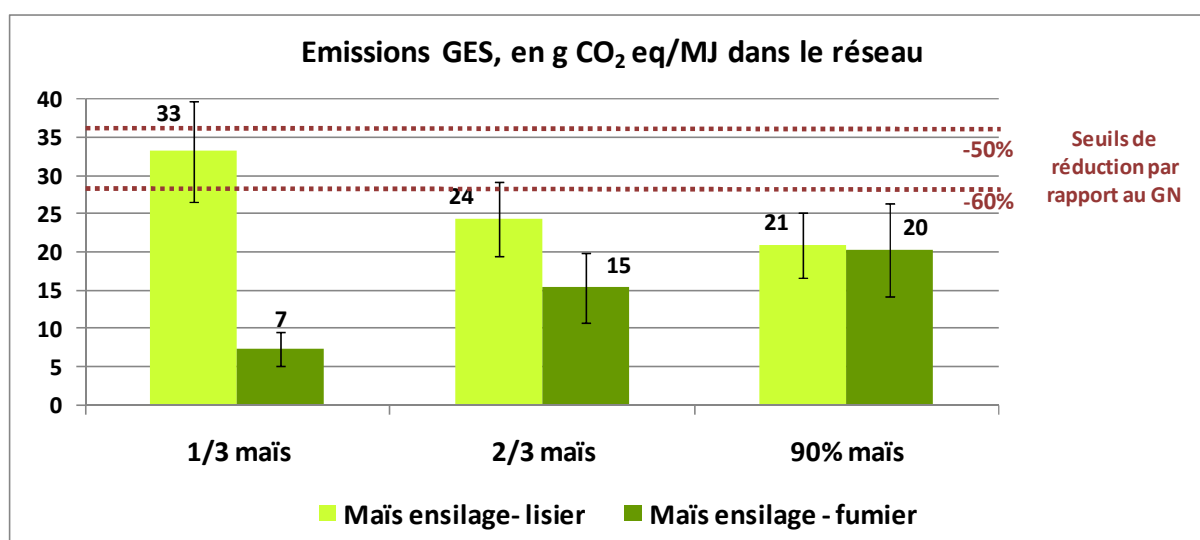
Ce constat est susceptible d'exception, notamment avec les bandes enherbées qui, du fait de leur très faible niveau d'intrants, présentent des désavantages moins marqués voire nuls (ex : potentiel d'eutrophisation). De même, comme le montre le test réalisé pour un mélange fumier-culture énergétique, cet effet peut s'inverser si le substrat remplacé par des cultures énergétiques supplémentaires est un déchet qui possède un potentiel méthanogène intéressant (voir enseignement suivant). Les cultures énergétiques viennent alors augmenter le bilan d'émission de GES du biométhane.

- **Enseignement n°3 : On peut déduire de ce travail, et du test réalisé avec du fumier, que l'introduction de cultures énergétiques n'est pas de nature à annuler les gains GES d'une filière de méthanisation par rapport à des équivalents fossiles.**

L'enseignement précédent montre qu'en France, l'incorporation de cultures énergétiques présente un avantage en matière d'émissions de GES lorsqu'elle est préférée à celle de l'incorporation de substrats moins méthanogènes et/ou devant voyager sur de longues distances.

Pour les faibles taux d'incorporation, le test réalisé sur le fumier montre que l'effet des cultures énergétiques sur les émissions GES reste secondaire devant celui du choix et de l'utilisation du co-substrat principal plus ou moins méthanogène. En effet, le bilan GES du mélange fumier – culture énergétique à faible taux d'incorporation (moins de 66% de biométhane issu de culture énergétique) présente tout d'abord un niveau d'émission de GES très bas, bien plus bas que son équivalent à base de lisier. L'incorporation de cultures énergétiques en quantité plus importante augmente ces émissions, mais sans toutefois passer en dessous du seuil de réduction de 60% par rapport aux filières fossiles équivalentes mentionné dans la Directive Energie Renouvelable pour les usines entrant en service à partir de 2018. Ce seuil minimal est ramené à 50% pour les usines entrées en service avant 2018.

Figure 6 – Evolution des bilans GES en fonction du taux d'incorporation de cultures énergétiques pour deux types de substrats



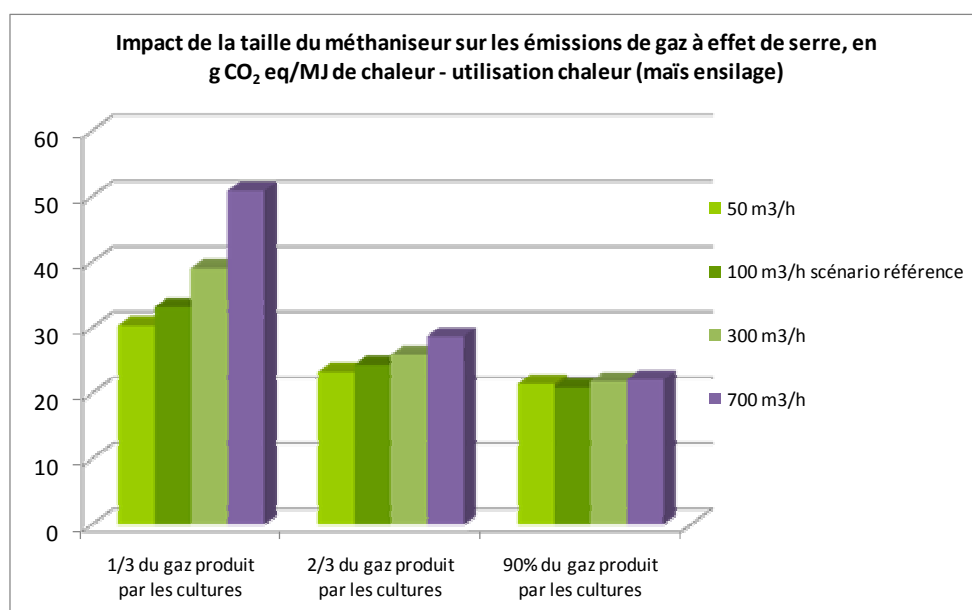
Fort de ces deux éléments, **la présente étude montre que la présence de cultures énergétiques n'est pas en mesure d'entraîner à elle seule une augmentation des émissions de GES de nature à faire perdre au biométhane son caractère renouvelable (au sens de la Directive EnR) sur le critère des émissions GES au sens de la Directive ENR** (selon les horizons de temps, réductions minimales de 35%, 50%, ou 60% des émissions de GES des biocarburants par rapport aux carburants fossiles).

- **Enseignement n°4 : les nombreux tests réalisés confirment que ce constat est robuste, sauf à imaginer des enjeux du type changements d'affectation des sols indirects.**

La présente étude, même si elle s'est placée dans une situation particulière et plutôt défavorable pour le bilan du biométhane produit, a fait l'objet de nombreux tests et analyses de sensibilité. Ces derniers visaient à s'assurer que des paramètres techniques importants ou des choix de modélisation ne venaient pas réduire ou inverser les constats.

On observe ainsi un rôle secondaire du type de valorisation du biométhane en lui-même, de la méthode d'allocation, du procédé d'épuration du gaz (lavage à l'eau ou PSA), de l'amortissement du matériel pour la plupart des indicateurs). Dans cette modélisation, la taille du méthaniseur, bien qu'ayant également un rôle secondaire, intervient principalement sur les distances de transport du lisier nécessaires à approvisionner les différentes tailles de méthaniseur. Les distances estimées nécessaires à collecter le lisier nécessaire pour les grandes tailles deviennent vraiment pénalisantes sur les résultats, notamment GES, du biométhane produit. Son rôle est plus secondaire à fort taux d'incorporation de cultures plus fortement méthanogènes. Le faible poids des amortissements du matériel pour la plupart des indicateurs fait que même en intégrant ces flux, les écarts resteraient peu marqués selon les tailles. L'effet sur les résultats environnementaux de la taille du digesteur sera plus probablement secondaire par rapport aux questions d'ordre technique de réalisation, de stockage et de gestion du digestat, pour ces projets.

Figure 7 – Exemple de l'impact de la taille : le cas des émissions de GES pour 4 tailles simulées



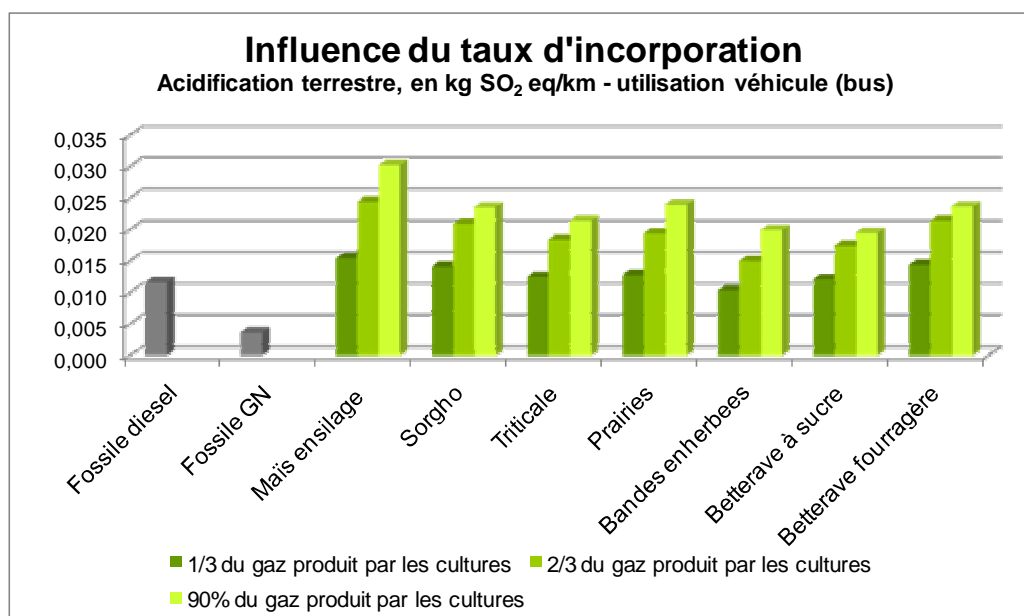
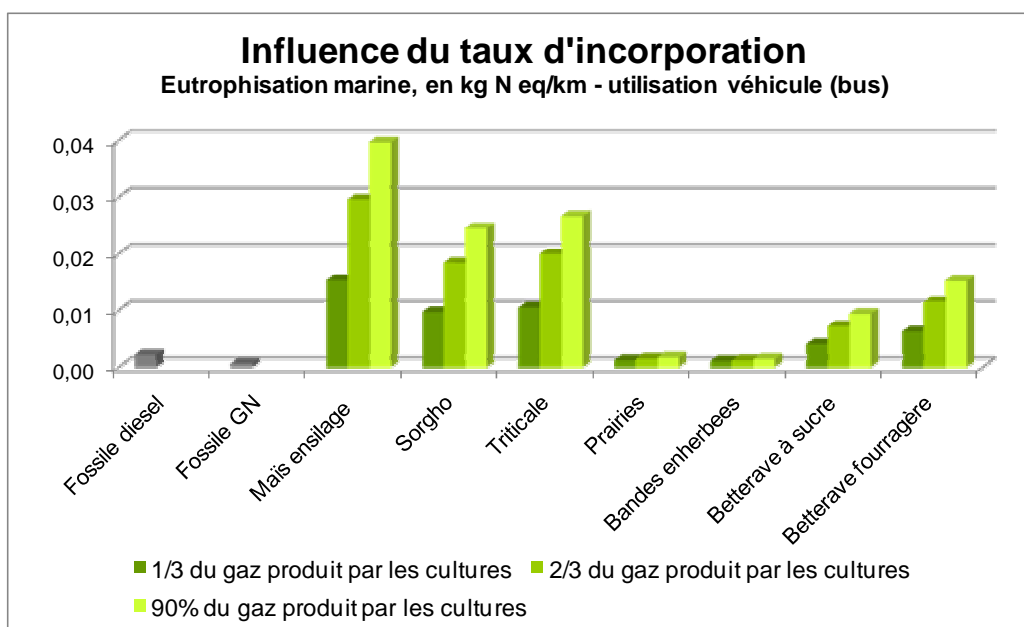
Le test remplaçant le lisier par du fumier présenté en Figure 6 confirme que le bilan du biométhane produit dépend fortement du substrat principal utilisé. A fort niveau d'incorporation, les résultats convergent vers les mêmes valeurs d'impacts qui sont celles de la culture énergétique étudiée. Le type de véhicules, la taille du méthaniseur, ou la règle d'allocation des impacts du digestat, ont des impacts plutôt secondaires sur le bilan d'émission GES et sur la majorité des autres indicateurs.

Les simulations conduites pour le biométhane issu d'un mélange lisier-maïs en faisant varier arbitrairement le rendement agricole du maïs montrent qu'il faut des baisses de rendements très importantes pour que les gains du biométhane par rapport à la filière fossile de référence tombent en dessous de 50%. Le rôle secondaire des cultures énergétiques dans le bilan GES du biométhane semble donc valable dans une gamme élargie de situations pédoclimatiques.

Seule la prise en compte d'une situation particulièrement défavorable (très grandes quantités de lisier à méthaniser, sans autoconsommation de l'énergie), à la limite du réalisme technique et économique, ou des questions de changements d'affectation des sols (dans les changements directs ou s'il est montré une implication notable de la méthanisation dans les changements indirects)

- **Enseignement n°5 : Cependant, avec le taux d'incorporation des cultures énergétiques les autres indicateurs évoluent globalement de manière défavorable aux cultures énergétiques, avec des exceptions ou limites.**

Dans la situation testée, l'introduction de cultures énergétiques vient détériorer le bilan du MJ de biométhane sur quatre catégories d'impact principalement : eutrophisation, acidification, potentiel de toxicité humaine, consommation d'eau (notamment pour les cultures irriguées). Les écarts sur l'oxydation photochimique sont trop peu marqués pour être considérés comme vraiment pénalisants.



Soulignons quelques limites à ce constat : tout d'abord, ces transferts restent peu marqués à des taux d'incorporation de 33% (du biométhane produit) des cultures énergétiques. De plus, ce transfert n'est pas valable pour l'ensemble des cultures énergétiques, ou a minima moindre pour certaines. Ainsi, les bandes enherbées et prairies sont moins impactantes de manière générale, de même pour les cultures non irriguées vis-à-vis de la consommation d'eau. Pour le potentiel de toxicité humaine, même s'il y a augmentation des impacts par l'introduction plus importante de cultures énergétiques, le niveau total ne reste pas si éloigné des carburants fossiles. Il est en tout cas trop proche pour être jugé de manière fiable comme défavorable.

Pour les situations où il y a un transfert de pollution marqué, **l'enjeu majeur devient alors de pouvoir mettre en balance ces transferts de pollution vis-à-vis des gains d'émissions de GES et de consommation d'énergies non renouvelables**. C'est un exercice délicat qui relève d'une gestion globale des priorités environnementales.

Il existe différentes manières d'aborder ce problème à ce stade, qui n'ont pu être traitées en détail par cette étude. Elles passent en général par la recherche d'une unité de comparaison entre des catégories d'impacts différentes. On peut imaginer des approches économiques : combien rapporte l'abattement moyen de GES par km parcouru ou MJ produit, versus le coût de réduire les émissions supplémentaires de nitrate pour ce même km ou MJ ? Si l'on reste au niveau des quantifications des problématiques environnementales en tant que telle, il peut s'agir de la normalisation des résultats, largement pratiquée pour les résultats d'ACV, ou de l'utilisation d'indicateurs de dommage (indicateurs « endpoint ») comme le permet ReCiPe. Chaque émission ou consommation est traduite en dommage sur l'homme ou sur les écosystèmes, et donc dans une même unité autorisant leur sommation et la comparaison relative. Toutes ces approches sont cependant entachées d'une part d'imprécision élevée compte tenu du degré de complexité supérieur à modéliser ces correspondances ou les émissions totales.

Le test a été mené à partir des indicateurs de dommage de ReCiPe et apporte des premiers éléments de réponse⁷. Ces premiers résultats sembleraient indiquer que les effets défavorables du biométhane sur deux indicateurs (eutrophisation et acidification dans ce cas précis) sont contrebalancés par les avantages estimés en termes de réduction d'émissions de gaz à effet de serre.

Cette étude fournit la matière pour réfléchir à la manière d'estimer la balance relative entre gains environnementaux et transferts de pollution. La première indication donnée par le travail à partir des indicateurs de dommage de ReCiPe doit être prolongée par un travail complémentaire à la croisée entre science, société et choix politiques.

- **Enseignement n°6 : Des critères de sélection des cultures énergétiques les plus durables⁸ à baser sur les indicateurs les plus pénalisés par le transfert de pollution, et non sur les émissions de GES.**

Le second grand objectif de cette étude était de réfléchir à l'existence possible de cultures à recommander pour des effets très favorables en tant que cultures énergétiques, ou au contraire, à éviter. Une culture serait à éviter si ses effets étaient trop pénalisants sur le bilan du biométhane produit.

Par rapport à cette question, l'étude réalisée permet d'apporter l'éclairage suivant:

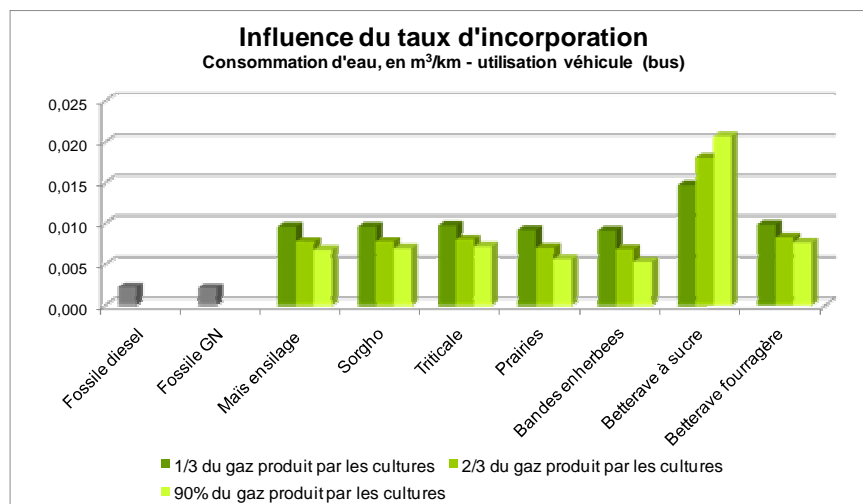
- **Parmi les cultures étudiées, aucune n'apparaît pénalisée par ses résultats d'émission de GES ou de consommation d'énergie non renouvelable. Sur les émissions de GES, les écarts moyens avec les filières fossiles sont suffisamment importants pour que les émissions liées à ces cultures soient plutôt secondaires. Dans certains cas (biométhane produit majoritairement à partir de lisier), la présence des cultures énergétiques va même réduire les émissions du mélange. Sur la consommation d'énergie non renouvelable, la proximité des résultats entre cultures énergétiques ne justifie pas d'en faire un critère discriminant.**
- **Sur les catégories d'impact pour lesquelles une comparaison entre cultures énergétiques est possible dans le cadre de la modélisation retenue (photo-oxydation, acidification, consommation d'eau), seule la consommation d'eau présente des écarts**

⁷ Voir le rapport détaillé pour plus d'informations.

⁸ Selon cette hiérarchie exprimées dans le cadre des comités opérationnels du Grenelle de l'environnement, la biomasse agricole doit être principalement orientée vers les usages alimentaires, puis vers les usages des bio-matériaux et de la chimie bio-sourcée et, enfin, vers les usages énergétiques. Cette hiérarchie peut s'appliquer à des choix d'affectation des sols, et même se décliner, pour une même matière première, qui, dans le cadre d'une gestion optimisée de son cycle, sera d'abord utilisée pour les usages les plus nobles pour être en fin de vie orientée vers des usages énergétiques

significatifs entre cultures lorsqu'il y a irrigation. Les écarts pour les autres indicateurs sont secondaires et ne semblent pas justifier un critère d'éviction pour une culture.

Figure 8 – Variations entre cultures sur la consommation d'eau



- **Enfin, sur les indicateurs pour lesquels une comparaison directe n'est pas suffisamment fiable dans le cadre de cette étude (potentiel de toxicité humaine, eutrophisation⁹), des écarts importants existent très probablement et pourraient justifier des réflexions.** Les résultats obtenus pour l'eutrophisation montrent que des écarts vont exister entre les cultures. Pour le potentiel de toxicité humaine, la nature des matières actives utilisées sera clé pour positionner les cultures les unes par rapport aux autres, avec des écarts pouvant être notables.

➤ **Enseignement n°7 : Des pratiques agricoles qui peuvent améliorer ces résultats et notamment limiter les effets négatifs**

Comme évoqué dans des enseignements précédents, il est nécessaire de voir ces bilans comme évolutifs. En raison de la variabilité des pratiques, des marges de progrès existent pour porter cet itinéraire moyen vers des pratiques les plus durables.

Parmi ces pratiques, celle concernant la gestion de l'azote sera essentielle. Elle est le maillon central des émissions de GES, de l'eutrophisation, et de l'acidification. Elle joue un rôle non négligeable dans les impacts de potentiel de toxicité humaine et de consommation d'énergie non renouvelable. Des pratiques agricoles qui réduisent ces émissions existent, mais il est important de maintenir un effort important de recherche et de transfert vers les agriculteurs.

Un autre point est en lien avec cette idée d'évolution des résultats. Les bilans d'émissions de GES et de consommation d'énergie non renouvelable sont de nature fondamentalement différente de ceux des filières fossiles. Les filières bio-sourcées pourraient voir leurs impacts encore réduits par l'utilisation de sources d'énergie renouvelables pour leur production et celle des intrants nécessaires (production des engrais, de l'électricité, biocarburant pour le tracteur, etc.), contrairement aux combustibles fossiles dont l'utilisation conduira toujours à émettre du CO₂ d'origine fossile (sauf technologie n'existant pas à date).

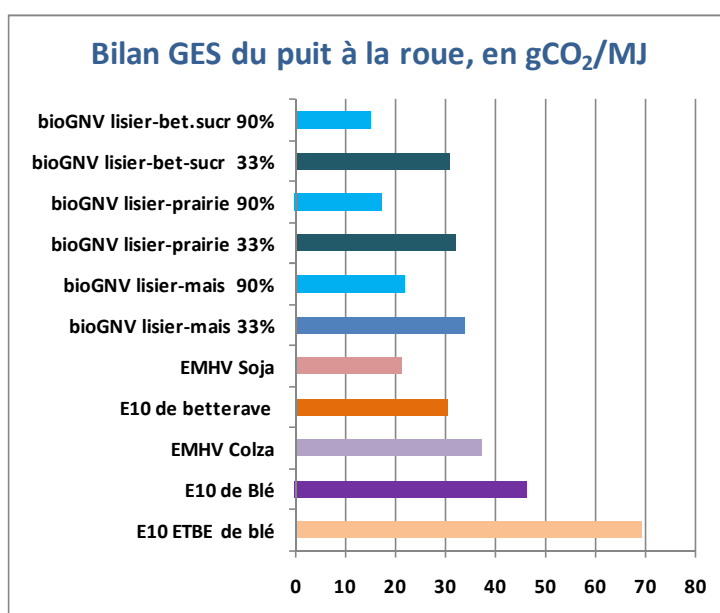
⁹ Pour le premier, il aurait été nécessaire de disposer des facteurs de caractérisation de chaque matière active et de connaître en détail l'utilisation de ces matières actives pour chaque culture, même lorsqu'utilisée en petite quantité ou fréquence. Pour le second, cela résulte de la faible connaissance des bilans azotés pour certaines cultures comme le sorgho ou la betterave fourragère, ainsi que du besoin pour avoir un haut niveau de comparabilité, que ces données soient homogènes, les aspects locaux pouvant venir modifier grandement les quantités lessivées.

- **Enseignement n°8 : une comparaison intéressante par rapport à d'autres études, mais qui ne peut conclure au positionnement global du bioGNV par rapport aux biocarburants de première génération.**

Une comparaison des résultats avec une étude récente sur les biocarburants a été conduite. L'étude retenue a été celle menée par BIO IS pour le compte de l'ADEME, du MAAP, et du MEEDDM, sur les filières des biocarburants de première génération. Aussi, une comparaison des résultats aux valeurs agrégées retenues dans la Directive Energie Renouvelable (2009/28/CE) a été menée.

Du premier travail, on peut retenir une grande proximité des niveaux d'impacts pour le biométhane étudié dans cette étude par rapport aux biocarburants de première génération. Les émissions GES positionnent le bioGNV obtenu au niveau des meilleurs biocarburants végétaux de première génération. Même le bilan avec une forte quantité de lisier reste bien positionné sur cette problématique. Sur les autres indicateurs, on observe de petites sources d'écart possibles positionnant parfois légèrement plus favorablement, parfois légèrement moins, le bioGNV modélisé dans cette étude. Cependant, la différence de contexte et d'objectifs entre ces deux études, impliquant des différences dans les données utilisées, font que cette comparaison ne peut être utilisée pour tirer des conclusions plus larges que la simple mise en perspective ici réalisée. De plus, les résultats du bioGNV varient selon le substrat principal pris en compte, les distances de transport, etc, empêchant toute généralisation non approfondie. Un travail spécifique dépassant le cadre de cette étude serait nécessaire pour analyser plus en détail et fiabiliser les possibles sources d'écart qui se dessinent.

Figure 9 – Comparaison des résultats GES du bioGNV modélisé dans cette étude et de quelques résultats issus de l'ACV des biocarburants de première génération, 2009



Concernant la comparaison avec les valeurs d'émission de GES par défaut de la Directive Energie renouvelable, on peut retenir que la méthodologie mise en œuvre pour cette étude et celle de la Directive sont proches. Elles couvrent cependant deux situations différentes (autoconsommation des énergies de chauffage-brassage et production moyenne européenne dans le cadre de la Directive, versus apports extérieurs d'énergie et situation française) qui font que l'usage de l'une ou de l'autre devra être privilégié, voire adapté, selon le contexte d'utilisation.

6.2. SYNTHÈSE DES PARAMÈTRES CLÉS

Le tableau ci-dessous rassemble les éléments de synthèse concernant les principaux paramètres influençant les bilans du biométhane produit par co-digestion d'un mélange de cultures énergétiques et déchets organiques (lisier dans le cas présent)

Paramètres	Facteurs influençant ce paramètre	Commentaires
Impacts à la tonne de matière fraîche	Type de culture, pratique agricole, zone géographique	Même si l'impact est fortement variable selon les agriculteurs, les années, l'utilisation d'une valeur moyenne à un échelon régional ou national permet de proposer une image pertinente.
Apports d'azote, forme de l'azote apporté et pratiques agricoles	Connaissances de l'agriculteur, types de sols, localisation, etc.	Les pratiques sont liées à des paramètres complexes et nombreux qu'il n'est pas possible de tous citer ici. Notons cependant que des aspects techniques, économiques et sociaux (main d'œuvre disponible, formation, etc.) jouent.
Capacités méthanogènes des substrats	Type de culture, variété, maturité de la culture	L'étude OREADE-BRECHE illustre la variabilité qui peut exister pour une même culture (en moyenne, +/- 10%), vraisemblablement liée à la variété et à la maturité.
Mix électrique	Pays, (éventuellement région), profil du besoin électrique (+ Modélisation)	Un besoin électrique ayant plutôt lieu en hiver pourrait justifier l'utilisation d'un mix électrique hivernal. Le choix de modélisation d'une consommation électrique supplémentaire peut varier (mix moyen ou marginal?).
Transport des substrats, surtout lorsque peu méthanogènes, et modélisation de leurs émissions	Physique (+ Modélisation)	Un transport moyen de lisier de 40 km conduit le gain d'émissions de GES de la filière (par rapport au Diesel) à la limite des 35% fixés par la Directive ENR (cas du lisier 66%– cultures 33%)
Modélisation des sources d'énergie pour la méthanisation	Modélisation	Le fait de considérer l'électricité ou la chaleur comme importées ou fournies par le système (cas de la cogénération) peut modifier les bilans.
Modélisation du digestat	Connaissances scientifiques + Modélisation	Le digestat joue un rôle clé dans les bilans. L'estimation du remplacement d'engrais minéral qu'il permet peut influencer grandement le bilan. De même, un bilan avec digestat composté serait différent.

6.3. PERSPECTIVES D'AMÉLIORATION

Plusieurs sujets pourraient être approfondis pour gagner en fiabilité ou en finesse dans l'analyse :

1. A court terme :

- **Prendre en compte de manière spécifique les matières actives employées pour chaque culture** : On sait qu'il peut exister des écarts très importants sur le potentiel de toxicité ou d'écotoxicité des produits phytosanitaires employés. Ajouter cette connaissance permettrait notamment de réaliser des comparaisons entre filières de biométhane, ce qui n'a pas été possible dans le cas de cette étude.
- **Améliorer la prise en compte du changement d'affectation sols** : les travaux commandités par la Commission Européenne sur ce sujet permettront d'y voir plus clair sur les liens de causalité entre cultures à des fins énergétiques, cultures alimentaires, demande alimentaire mondiale, besoins forestiers et usages des sols. Le positionnement des cultures énergétiques dédiées au biométhane pourra alors s'inscrire dans une perspective plus argumentée.

- **Approfondir la quantification des pertes de méthane lors de l'épuration** : l'existence de pertes à cette étape peut pénaliser le bilan GES global du biométhane, comme cela a été illustré. Des pertes de 2% dégradent les bilans, sans pour autant faire perdre aux filières de biométhane étudiées leur caractère durable (la réduction des émissions GES reste supérieure à 50%). Toutes les sources ne sont pas homogènes sur ce point, c'est pourquoi il est nécessaire de lever cette imprécision sur le résultat. Un tel travail doit être mené en mettant en regard la précision des données équivalentes pour les filières gaz naturel, afin de ne pas créer de biais.
- **Améliorer les connaissances sur les transports** : ce poste peut ne pas être négligeable dans les résultats en fonction du co-substrat utilisé. S'assurer de leur modélisation la plus exacte pourra réduire l'imprécision des résultats.
- **Conduire une analyse sur les transferts de pollution** : comme souligné précédemment, vouloir analyser si les gains environnementaux des cultures énergétiques compensent ou non les pollutions créées nécessiteraient une étude plus approfondie. Elle pourrait notamment prendre en compte des approches de coût d'abattement, ou analyser la priorisation des actions à mener.
- **Tester plus largement les évolutions possibles des émissions véhicules** : l'étape d'utilisation du carburant dans un véhicule est une étape complexe à modéliser. Les évolutions des émissions lors de l'utilisation de biocarburant en mélange sont des tendances discutées et validées avec l'ADEME à partir d'un nombre relativement important d'études conduites dans des situations variées. Les tendances semblent donc relativement robustes. Il est cependant nécessaire de les affiner (sur les émissions de HAP par exemple), ainsi que d'en comprendre la variabilité possible.

2. A moyen terme :

- **Améliorer les données concernant les cultures pour aller vers des données statistiquement représentatives**: il s'agit encore pour certaines d'entre elles (sorgho biomasse, betterave fourragère) de cultures peu répandues et/ou peu suivies, pour lesquelles on ne dispose pas de suivi aussi précis que pour des cultures comme le maïs grains ou le blé. Notamment, les données de lessivage, d'émissions au champ, de consommation de carburant, d'ensilage, etc, restent à améliorer dans leur ensemble.
- **Améliorer les connaissances sur le digestat et ainsi, sa modélisation** : mieux comprendre le rôle du digestat à l'épandage sur la croissance des plantes et affiner ses émissions spécifiques, notamment en comparaison à d'autres produits actuellement épandus (fumiers, lisiers) fiabiliserait la quantification des impacts de cette filière.
- **Améliorer la robustesse de l'indicateur de potentiel de toxicité humaine** : la fiabilisation des impacts relatifs entre des polluants aussi différents que les NOx ou les produits phytosanitaires viendrait affiner les potentiels de dommage respectifs des deux types de filières (bio-sourcées et fossiles). Aussi, un travail spécifique sur les dommages des éléments traces serait bien utile pour venir enrichir les facteurs de caractérisation proposés par les méthodes ACV.
- **Trancher sur la modélisation des impacts amont des effluents d'élevage et autres déchets servant de substrat à la méthanisation** : beaucoup de produits entrant dans la composition du substrat à méthaniser sont aujourd'hui considérés comme des déchets des filières agricoles, industrielles, ou des collectivités. En tant que déchets, il est légitime de considérer qu'ils n'ont pas entraîné d'émissions devant leur être attribuées lors de leur production. Cependant, cette situation pourrait évoluer pour différentes raisons. L'existence de filières leur redonnant une valeur peut justifier qu'ils ne soient plus regardés comme de simples déchets mais plutôt comme des sous-produits à valoriser au mieux. Certains d'entre eux sont d'ailleurs dès à présent considérés dans d'autres contextes comme des produits à part entière (exemple : pulpes de betterave, drèches de brasserie, qui peuvent entrer dans des projets de méthanisation). Les travaux en cours sur l'affichage environnemental sont en train de poser un cadre méthodologique de réalisation d'ACV à des fins d'information du

consommateur et des industriels sur les impacts des produits. Ces travaux vont aborder la question des répartitions des impacts entre l'élevage et les cultures. Ils donneront ainsi une réponse à cette problématique d'ici un an, réponse qui pourra par la suite évoluer avec les mises à jour de ces règles méthodologiques.

- **Affiner la prise en compte de l'indicateur d'épuisement des métaux** : un tel travail demande un exercice très poussé de collecte d'information sur les immobilisations et les outils mis en œuvre. Les quantités mises en œuvre, leur taux de remplacement et d'entretien, sont autant de paramètres à prendre en compte dans l'élaboration d'une information fiable sur cet enjeu. Des choix de modélisation restent à faire pour savoir comment prendre en compte certains éléments, comme par exemple la présence et l'usure d'un pot catalytique sur les véhicules.