

ANALYSE DU CYCLE DE VIE DE LA BIOMASSE ÉNERGIE : ÉTAT DE L'ART, ENJEUX MÉTHODOLOGIQUES ET RECOMMANDATIONS

Synthèse
OCTOBRE 2022

Responsable scientifique – *Pr Réjean Samson, ing., Ph.D.*



CIRAIG^{MC}

Centre international de référence sur le
cycle de vie des produits, procédés et services



**POLYTECHNIQUE
MONTRÉAL**

L'association SCORE LCA est une structure d'étude et de recherche dédiée aux travaux relatifs à l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) et à la quantification environnementale. Elle vise à promouvoir et à organiser la collaboration entre entreprises, institutionnels et scientifiques afin de favoriser une évolution partagée et reconnue, aux niveaux européen et international, de la méthode d'Analyse du Cycle de Vie et de sa mise en pratique.

- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)

www.ademe.fr

- ✓ Les points de vue et recommandations exprimés dans ce document n'engagent que les auteurs et ne traduisent pas nécessairement, sauf mention contraire, l'opinion de l'ensemble des membres de SCORE LCA.
- ✓ Les informations et les conclusions présentées dans le présent document ont été établies au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

1 Objectifs de l'étude

Les objectifs généraux de cette étude sont **d'analyser les pratiques actuelles pour réaliser des ACV de la biomasse énergie**, et de **fournir des recommandations sur les meilleures pratiques actuelles et futures**.

Les objectifs spécifiques sont les suivants :

1. Identifier les filières actuelles de la biomasse énergie (ou bioénergie) ;
2. Recenser les argumentaires de différents acteurs sur les performances environnementales des bioénergies justifiant ou non l'utilisation de la biomasse énergie ;
3. Définir le cadre d'analyse théorique des ACV des bioénergies ;
4. Recenser les principales lignes directrices à caractère normatives spécifiques à la réalisation des ACV des bioénergies ;
5. Réaliser une revue de la littérature récente sur les ACV des bioénergies pour identifier les principaux choix méthodologiques qui influencent les résultats ;
6. Faire une analyse critique des principaux enjeux méthodologiques liés à l'ACV des bioénergies ;
7. Faire une analyse critique de certaines données de référence liées aux ACV des bioénergies ;
8. Tester l'influence de plusieurs enjeux méthodologiques sur un cas d'étude ;
9. Fournir des recommandations à court terme et à long terme sur les meilleures pratiques pour réaliser des ACV des bioénergies.

Le présent document est une synthèse du rapport complet disponible sur le site internet de SCORELCA : <https://www.scorelca.org/>.

2 Identification des filières biomasse énergie

La biomasse énergie, ou bioénergie, est une **énergie produite à partir de biomasse renouvelable**. L'objectif de cette section est d'identifier et de classer les principales filières biomasse énergie en fonction de plusieurs caractéristiques techniques. 120 filières de bioénergies ont été identifiées, incluant 66 filières pour les biocarburants liquides (Tableau 2.3), 29 filières pour la bioénergie gazeuse (Tableau 2.1), 24 filières pour les combustibles de biomasse solide (Tableau 2.2) et 1 filière de bioélectricité. Un portrait du marché actuel des bioénergies est également disponible à la fin de cette section.

Tableau 2.1 Classification des filières de bioénergie gazeuse (biogaz, biométhane et hydrogène)

Produit bioénergétique	Type de biomasse	Procédé de conversion	Utilisation potentielle
Biogaz	Résidus agricoles	Digestion anaérobique (gaz d'enfouissement)	Chaleur + Électricité
	Biomasse déchets		
Biométhane	Résidus agricoles	Digestion anaérobique + Purification	Chaleur + Électricité + Transport routier / Véhicule au gaz naturel
	Biomasse déchets		
Gaz naturel synthétique (SNG)	Résidus agricoles	Digestion anaérobique + Méthanation	Chaleur + Électricité + Transport routier / Véhicule au gaz naturel
	Biomasse déchets		
	Cultures énergétiques dédiées		
	Résidus de bois		
Biohydrogène	Résidus agricoles	Fermentation sombre	Transport routier / Véhicule avec pile à combustible
	Biomasse déchets		
	Cultures énergétiques dédiées	Gazéification	
	Résidus de bois		
	Résidus agricoles		
	Algues		
Algues	Production photobiologique d'hydrogène		

Tableau 2.2 Classification des filières de bioénergie solide (Combustibles de biomasse solide)

Produit bioénergétique	Type de biomasse	Procédé de conversion	Utilisation potentielle
Buches de bois	Bois brut	Préparation des combustibles solides	Chaleur
Briquettes	Bois brut	Préparation des combustibles solides	Chaleur + Électricité
	Cultures énergétiques dédiées		
	Résidus de bois		
Granulés	Biomasse déchets	Préparation des combustibles solides	Chaleur + Électricité
	Bois brut		
	Cultures énergétiques dédiées		
	Résidus de bois		
Plaquettes	Biomasse déchets	Préparation des combustibles solides	Chaleur + Électricité
	Bois brut		
	Cultures énergétiques dédiées		

Tableau 2.3 Classification des filières de bioénergie liquide (biocarburants et bioliquides) (*peut contenir de la matière organique d'origine fossile)

Produit bioénergétique	Génération de biomasse	Type de biomasse	Procédé de conversion	Utilisation potentielle
Bioéthanol	G1	Cultures conventionnelles	Fermentation alcoolique	Transport routier / Véhicule conventionnel + Transport routier / Véhicule Flex-fuel
	G2	Cultures énergétiques dédiées	Hydrolyse enzymatique	
		Résidus agricoles Residus de bois		
	G3	Algues		
Avancée	Biomasse déchets			
Biodiesel (FAME)	G1	Cultures conventionnelles	Extraction des lipides + Transestérification	Transport routier / Véhicule conventionnel + Transport maritime
	G1bis	Cultures énergétiques dédiées		
	G2	Résidus agricoles		
	G3	Algues		
Avancée	Biomasse déchets			
HVO (Diesel renouvelable)	G1	Cultures conventionnelles	Extraction des lipides + Hydrotraitement	Transport routier / Véhicule conventionnel + Transport aérien
		Cultures énergétiques dédiées	Extraction des lipides + Co-traitement*	
	G1bis	Cultures énergétiques dédiées	Extraction des lipides + Hydrotraitement	
		Cultures énergétiques dédiées	Extraction des lipides + Co-traitement*	
	G2	Résidus agricoles	Extraction des lipides + Hydrotraitement	
		Residus de bois	Extraction des lipides + Co-traitement*	
			Pyrolyse + Hydrotraitement	
	G3	Algues	Extraction des lipides + Hydrotraitement	
			Extraction des lipides + Co-traitement*	
	Avancée	Biomasse déchets	Pyrolyse + Hydrotraitement	
Extraction des lipides + Hydrotraitement				
Liquides FT	G2	Cultures énergétiques dédiées	Gazéification + Fischer-Tropsch	Transport routier / Véhicule conventionnel + Transport aérien
		Résidus agricoles		
	G3	Residus de bois		
		Algues		
Avancée	Biomasse déchets			
Autres biocarburants synthétiques	G2	Cultures énergétiques dédiées	Gazéification + Fischer-Tropsch	
		Résidus agricoles		
	Residus de bois			
G3	Algues			
Avancée	Biomasse déchets			
Huile végétale brute	G1	Cultures conventionnelles	Extraction des lipides	Transport routier / Autre
	G1bis	Cultures énergétiques dédiées		
	G2	Résidus agricoles		
	G3	Algues		
Avancée	Biomasse déchets			
Bio-huile	G2	Cultures énergétiques dédiées	Pyrolyse	Chaleur + Électricité
		Résidus agricoles		
	G3	Residus de bois		
		Algues		
Avancée	Biomasse déchets			

3 Analyse critique des argumentaires liés à la durabilité de la biomasse énergie

L'objectif de cette section est d'identifier et de catégoriser les argumentaires liés aux performances environnementales de la biomasse énergie et plus largement à sa durabilité. L'analyse porte sur les argumentaires favorables ou défavorables à l'utilisation des bioénergies selon des sources variées (associations européennes de producteurs de bioénergies, réglementations, organismes paragouvernementaux ou non gouvernementaux, publications scientifiques). Les arguments les plus courants ont été reformulés entre guillemets et explicités dans le rapport en essayant de limiter au mieux une interprétation ou un jugement de la part des auteurs de la présente étude. Les arguments ont été catégorisés en 10 groupes : Énergie renouvelable, Compétition avec l'alimentation, Changement climatique, Carboneutralité et émissions négatives, Utilisation et transformation des terres, Qualité des sols et stockage de carbone, Biodiversité, Qualité de l'air, Utilisation et qualité des eaux, Économie circulaire et sécurité énergétique.

4 Analyse critique de l'état de l'art des ACV de la biomasse énergie

L'objectif de cette section est d'identifier les lignes directrices et les pratiques actuelles pour réaliser des ACV de la biomasse énergie.

4.1 Notions théoriques sur l'ACV des filières biomasse énergie

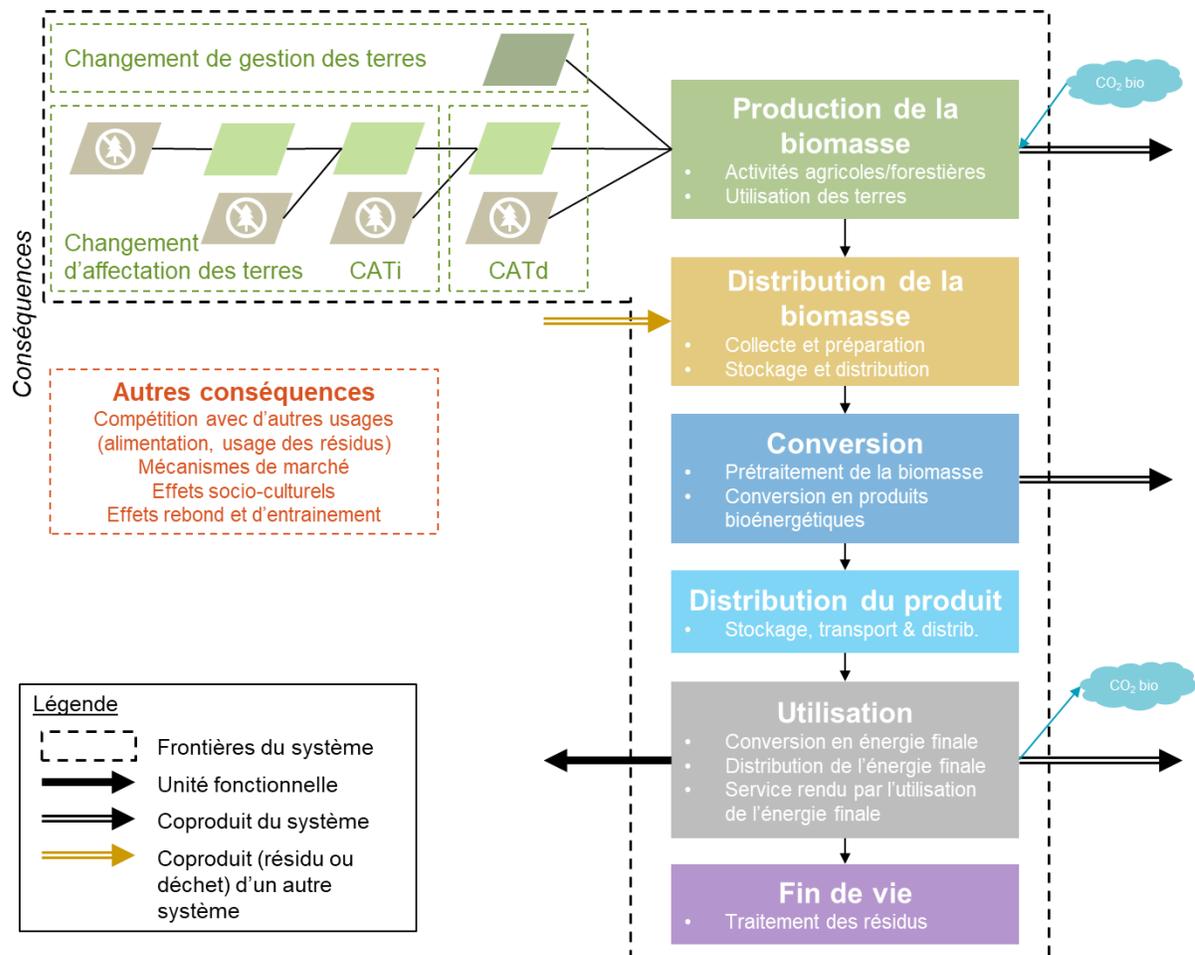


Figure 4.1 Arbre des processus du cycle de vie typique d'une filière biomasse énergie

Comme toute activité humaine, les filières biomasse énergie génèrent de façon directe et indirecte des dommages environnementaux potentiels sur 3 différentes aires de protection (AoP) : Santé humaine (SH), qualité des écosystèmes (QE), ressources et services écosystémiques (RSE).

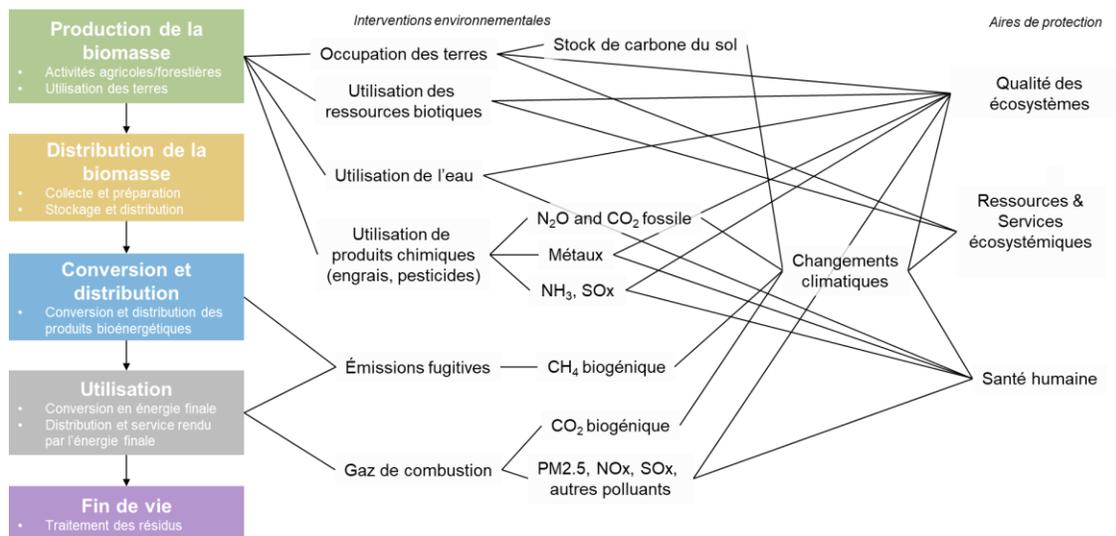


Figure 4.2 Liens entre les dommages sur les AoP et les principales interventions environnementales directement générées par le cycle de vie des filières bioénergies

4.2 Revue des lignes directrices pour réaliser des ACV de la biomasse énergie

L'objectif de cette section est d'identifier les principales lignes directrices à caractère normatif pour réaliser des ACV de la biomasse énergie. Les lignes directrices sont extraites de différents textes normatifs en lien avec les performances environnementales de la biomasse énergie (réglementation, normes ou systèmes de certification). Seuls les textes normatifs incluant un critère de durabilité basé sur l'ACV ont été analysés plus en détail, en concentrant la revue sur les lignes directrices pour les principaux enjeux méthodologiques pour réaliser les ACV des bioénergies. La revue se concentre sur les lignes directrices actuellement en vigueur dans l'Union européenne, et propose une comparaison avec les lignes directrices existantes en Amérique du Nord en ce qui concerne les réglementations. Les textes normatifs analysés plus en détail dans le rapport sont :

- Réglementations : RED II (réglementation européenne sur les énergies renouvelables), LCFS, RFS (deux réglementations américaines sur les biocarburants) et CORSIA (réglementation internationale sur les carburants pour l'aviation).
- Normes : GHG Protocol – Norme sur les produits, ISO 14067:2018 – Empreinte carbone des produits et EN 16760 – Produits biosourcés – Analyse du cycle de vie.
- Systèmes de certification : Roundtable of Sustainable Biomaterials (RSB)

4.3 Analyse critique de la littérature sur les ACV de la biomasse énergie

Le but de cette analyse est d'identifier les pratiques courantes reliées aux choix méthodologiques les plus influents dans les ACV publiées sur les filières biomasse énergie. Dans un premier temps, les principales conclusions de 22 publications de type « revue » sur le sujet sont répertoriées, puis 27 études ACV (du type ACV « cas d'étude ») publiées, mais non couvertes par la littérature des revues sont analysées.

Les principaux enjeux méthodologiques révélés par cette analyse de la littérature sont :

1. Choix d'une approche de modélisation attributionnelle ou conséquentielle
2. Choix de l'unité fonctionnelle
3. Choix des frontières du système
4. Traitement des enjeux liés à la multifonctionnalité
5. Prise en compte du carbone biogénique
6. Utilisation des terres et Changement d'utilisation des terres
7. Choix des données d'inventaire pour modéliser le cycle de vie des bioénergies
8. Évaluation des impacts environnementaux
9. Interprétation et scénario de référence

5 Analyse critique des enjeux méthodologiques liés aux ACV de la biomasse énergie et principales recommandations

La section suivante reprend les principaux enjeux méthodologiques liés aux ACV de la biomasse énergie identifiées dans la littérature ou par les auteurs du présent rapport. Pour chaque enjeu, la nature et l'influence de chaque enjeu sont discutées, les approches existantes pour traiter cet enjeu sont identifiées, ainsi que les meilleures pratiques et les limites actuelles. Cette analyse sert de base pour formuler des recommandations à court et à long terme pour chaque enjeu. Cette section a une vocation pédagogique en explicitant les enjeux méthodologiques et souhaite aussi faire le pont entre les praticiens ACV et les développements en recherche.

Tableau 5.1 Principales recommandations par enjeu méthodologique à court et long terme

Enjeu méthodologique	Recommandations court terme (= meilleures pratiques actuelles)	Recommandations long terme (= besoin de développement dans le futur)
ACV attributionnelle ou conséquentielle	<ul style="list-style-type: none"> • Choisir l'approche de modélisation de façon cohérente avec les objectifs de l'étude et le cadre décisionnel (ILCD) • Le support aux décideurs publics pour l'élaboration de politiques devrait toujours se baser sur l'ACV conséquentielle • Inclure un maximum de liens de causalité et niveaux de conséquence en ACV conséquentielle • Utiliser les recommandations du ILCD Handbook pour identifier les processus à inclure en ACV conséquentielle 	<ul style="list-style-type: none"> • Mieux modéliser la phase d'usage des bioénergies et les interactions avec les utilisateurs (effets rebond) • Faciliter l'accès et la transparence des modèles économiques utilisés en ACV conséquentielle
Unité fonctionnelle	<ul style="list-style-type: none"> • Choisir l'UF de façon cohérente avec les objectifs de l'étude et la perception du public visé • Formuler précisément l'UF (qualitatif et quantitatif) pour refléter le contexte de représentativité de l'étude • L'UF doit idéalement représenter une fonctionnalité commune des systèmes comparés. • Redéfinir l'UF peut être une façon d'éviter l'allocation • Faire des analyses de sensibilité sur le choix de l'UF pour capturer différents enjeux 	<ul style="list-style-type: none"> • Proposer un cadre clair pour définir l'UF des filières bioénergies

Enjeu méthodologique	Recommandations court terme (= meilleures pratiques actuelles)	Recommandations long terme (= besoin de développement dans le futur)
Frontière du système	<ul style="list-style-type: none"> • À définir de façon cohérente avec les objectifs de l'étude et l'UF • Les frontières devraient toujours être du berceau au tombeau pour l'itération initiale de la définition des frontières du système. • Les exclusions doivent être clairement justifiées : soit les processus d'avant-plan exclus sont qualitativement et quantitativement identiques entre les systèmes comparés, soit selon un critère de coupure basé sur la contribution aux impacts totaux pour les processus d'arrière-plan. • Toujours inclure les infrastructures pour la conversion finale en énergie (ex. chaudière, auto) quand les systèmes comparés n'utilisent pas la même infrastructure. • Inclure les infrastructures de production si possible, en particulier pour les filières biogaz 	
Multifonctionnalité	<ul style="list-style-type: none"> • Identifier toutes les co-fonctions et la nature des co-produits (sous-produits? Déchets?) • Choisir une approche pour traiter la multifonctionnalité cohérente avec les objectifs de l'étude et justifier ce choix (notamment lorsque la hiérarchie ISO n'a pas été suivie) • Redéfinir les frontières du système si nécessaire (expansion des frontières du système) • Faire des analyses de sensibilité sur le choix de l'approche pour traiter la multifonctionnalité <ul style="list-style-type: none"> • Justifier le choix de la filière de substitution d'un coproduit, idéalement en considérant son potentiel de substitution 	<ul style="list-style-type: none"> • Faciliter l'accès à des données de prix pour les allocations économiques
Carbone biogénique	<ul style="list-style-type: none"> • Il est préférable d'éviter d'appliquer l'hypothèse de neutralité carbone. Cela implique d'ajuster le bilan de carbone biogénique manuellement. • La neutralité carbone ne devrait pas être appliquée pour des bioénergies issues de biomasses forestières. Elle peut cependant être appliquée pour des biomasses ayant des cycles de vie courts. • Adjuster les GWP/GTP pour les flux de carbone biogénique quand la neutralité carbone est appliquée • Appliquer la neutralité carbone peut se justifier quand la production ou la fin de vie de la biomasse est exclue des frontières du système (ex. WTT ou valorisation de déchet). • Une modélisation EICV dynamique est nécessaire pour des bioénergies issues de biomasses forestières (ACV dynamique or GWPbio) • Le choix de l'allocation temporelle de la séquestration de carbone à des activités de récolte de bois doit être cohérent avec les objectifs de l'étude et le type de gestion de la forêt. <ul style="list-style-type: none"> • Les effets de l'altitude sur les GWP/GTP doivent être considérés pour le secteur de l'aviation 	<ul style="list-style-type: none"> • Améliorer la modélisation de la conservation de la masse dans les BD • Faciliter l'usage de l'ACV dynamique pour les praticiens ACV • Faciliter l'accès aux modèles de cycle du carbone des forêts

Enjeu méthodologique	Recommandations court terme (= meilleures pratiques actuelles)	Recommandations long terme (= besoin de développement dans le futur)
LULUC	<ul style="list-style-type: none"> • Toujours inclure les impacts de l'occupation et la transformation des terres sur le changement climatique. • Inclure d'autres impacts des LULUC quand les FC sont disponibles (qualité du sol, biodiversité) • Choisir l'outil le plus pertinent pour identifier les LUC en fonction des ressources allouées à l'étude • Inclure les changements de gestion des terres lors de l'évaluation des impacts des LUC • Inclure les iLUC si possible. Utiliser a minima la valeur par défaut fournie par la réglementation. • Préférer un amortissement linéaire dégressif pour l'allocation temporelle de l'impact des LUC (recommandation ILCD) • Utiliser la méthode de Müller-Wenk & Brandão 2010 pour caractériser l'impact sur les changements climatiques de l'occupation des terres. • Utiliser les méthodes Tier 1 IPCC 2006 ou Müller-Wenk & Brandão 2010 pour caractériser l'impact sur les changements climatiques de la transformation des terres. <ul style="list-style-type: none"> • La contribution des LULUC aux impacts sur le changement climatique doit être reportée séparément. 	<ul style="list-style-type: none"> • Faciliter l'identification des iLUC pour les praticiens ACV • Continuer le développement des indicateurs d'impact reliés aux LULUC, en particulier pour les impacts et bénéfices sur les services écosystémiques.
Données d'inventaire	<ul style="list-style-type: none"> • La modélisation de l'inventaire des fuites de méthane doit être la plus précise possible et faire l'objet d'une analyse de sensibilité sur les taux de fuites considérés • Utiliser si disponible des données primaires pour modéliser l'avant-plan • Soyez attentive à la représentativité des données secondaires. Les adapter au contexte de l'étude au besoin. • Régionaliser l'inventaire pour les étapes de production de la biomasse <ul style="list-style-type: none"> • Mentionner les limites des données utilisées 	<ul style="list-style-type: none"> • Mettre à disposition dans les bases de données d'inventaire des données de qualité sur les filières bioénergie
Évaluation des impacts (EICV)	<ul style="list-style-type: none"> • Prioriser les catégories d'impact à inclure en fonction de leur contribution au dommage • Si les objectifs de l'étude le permettent, préférer une méthodologie d'impact midpoint-damage (ex. IMPACT World+, ReCiPe) • Ajuster les FC (GWP ou GTP) pour les flux élémentaires de carbone biogénique lorsqu'on applique l'hypothèse de neutralité carbone • Les effets de l'altitude sur les GWP/GTP doivent être considérés pour le secteur de l'aviation • Prendre en compte la dynamique des émissions de GES pour les bioénergies avec des cycles de vie de longue durée (ex. biomasse forestière) <ul style="list-style-type: none"> • Toujours inclure un indicateur de consommation d'énergie primaire pour vérifier l'efficacité énergétique de la filière 	<ul style="list-style-type: none"> • Développer une méthode EICV pour évaluer les impacts de l'utilisation des ressources biotiques non naturelles • Développer un cadre opérationnel et des indicateurs EICV pour les impacts sur les services écosystémiques en ACV

Enjeu méthodologique	Recommandations court terme (= meilleures pratiques actuelles)	Recommandations long terme (= besoin de développement dans le futur)
Interprétation	<ul style="list-style-type: none">• Prendre en compte le potentiel de substituabilité lors de la comparaison de filières énergétiques. Au moins commenter qualitativement à quel point la comparaison est ou non pertinente.<ul style="list-style-type: none">• Toujours réaliser des analyses de sensibilité	<ul style="list-style-type: none">• Fournir des recommandations concrètes sur la comparabilité des filières bioénergies entre elles et avec leur référence fossile en considérant leur potentiel de substitution.• Rendre accessibles aux praticiens ACV les analyses de sensibilité basées sur l'analyse d'un grand nombre de scénarios.

6 Analyse critique de certaines données de référence liées aux ACV de la biomasse énergie

Les approches utilisées pour chaque enjeu méthodologique identifié précédemment sont décrites et les principales limites sont mises en avant. Les sources de données analysées sont Boulamanti et al (2013), Études JEC WTT WTW v5, Modèles GREET, et Ecoinvent v3.8.

7 Cas d'étude

Un **cas d'étude** a été réalisé afin d'illustrer de façon pratique l'application de certains choix méthodologiques et de montrer leur influence sur les résultats. La fonction principale étudiée dans le cas d'étude est la production de biométhane à partir de biogaz dans le contexte actuel français. Les 6 filières choisies pour le cas d'étude sont toutes dérivées d'une filière de production de biométhane obtenu par purification du biogaz généré par digestion anaérobie. Les enjeux méthodologiques testés en analyse de sensibilité sont le choix de l'unité fonctionnelle, le choix des frontières du système, le traitement de la multifonctionnalité, la prise en compte du carbone biogénique, le choix de la méthode d'évaluation des impacts environnementaux.