Etude N°2023-04

Recommandations méthodologiques pour les ACV des e-fuels et premiers calculs

Synthèse
Décembre 2024

Version 1.0	**17/12/24**	
Rédacteurs	**Vérificateurs**	Approbateur
LORTILLOIS Domitille	NUNES Mike	
MAURIN Adrien	GERAND Yves	
GAILLARD Marine	LEPETIT Cyrille	

Association ScoreLCA - Bât. C.E.I. 1- 66 boulevard Niels Bohr – F-69603 Villeurbanne cedex
Tél. 33(0)4 72 43 81 50 – Fax 33(0)4 72 44 07 32 – contact@scorelca.org – site : www.scorelca.org

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.

Association ScoreLCA - Bât. C.E.I. 1- 66 boulevard Niels Bohr – F-69603 Villeurbanne cedex
Tél. 33(0)4 72 43 81 50 – Fax 33(0)4 72 44 07 32 – contact@scorelca.org – site : www.scorelca.org

SOMMAIRE

SOMMAIRE **3**

1 Contexte et problématique **4**

2 Objectifs de l'étude **5**

3 Etat de l'art technologique des e-fuels **6**

3.1 Production d'hydrogène *6*

3.2 Capture du CO_2 *6*

3.3 Synthèse de carburants spécifiques *6*

3.4 Consommation électrique et surplus de chaleur *7*

3.5 Maturité et enjeux de développement *7*

3.6 Perspectives et projets *7*

3.7 Comparaison technologique de différents e-fuels *8*

4 Enjeux méthodologiques de l'ACV des e-fuels **9**

4.1 Etat de l'art des données disponibles permettant de réaliser des ICV *9*

4.2 Enjeux méthodologiques d'un e-fuel *10*

4.2.1 Objectif 10

4.2.2 Champ de l'étude 10

4.3 Choix des indicateurs d'impacts *18*

4.4 Autres enjeux *18*

4.4.1 Carbone biogénique 18

4.4.2 ACV prospective 19

4.4.3 ACV conséquentielle 19

4.4.4 ACV dynamique 19

5 Conclusions issues du cas d'étude **20**

5.1 Influence de la gestion de la multifonctionnalité *20*

5.2 Influence de la gestion de la multifonctionnalité : focus sur la CFF *21*

5.3 Principaux contributeurs par étape avec la méthode extension-substitution *22*

5.4 Influence de l'électricité *22*

5.5 Contribution des infrastructures *23*

Association ScoreLCA - Bât. C.E.I. 1- 66 boulevard Niels Bohr – F-69603 Villeurbanne cedex
Tél. 33(0)4 72 43 81 50 – Fax 33(0)4 72 44 07 32 – contact@scorelca.org – site : www.scorelca.org

1 Contexte et problématique

Les e-fuels ou e-carburants (pour électro-carburants) sont des carburants de synthèse fabriqués à partir d'hydrogène (H_2 , via une électricité décarbonée) et de CO_2 ou N_2, pour un produit final à l'état liquide (power-to-liquid, PTL) ou gazeux (power-to-gas, PTG).

Les e-fuels permettent de ne pas utiliser les combustibles fossiles de façon directe. Ils représentent donc une opportunité intéressante dans le cadre à la fois de la décarbonation du secteur des transports et du renforcement de la souveraineté énergétique de l'Europe.

Cette technologie combine donc hydrogène et CO_2 (ou N_2), et permet de valoriser ce gaz à effet de serre émis par de nombreuses industries, via des technologies de capture et de valorisation.

Il existe de nombreuses Analyses de Cycles de Vie (ACV) sur les e-fuels :

- Sur google scholar, la recherche « LCA e-fuel » mène à **près de 1000 résultats**, et la recherche « LCA Power-to-X » à **plus de 23000 résultats**.
- Certains articles font la synthèse de plusieurs ACV réalisées, comme par exemple (Koj, Wulf, et Zapp 2019) et (Ince et al. 2021).

Faute de méthodologies communes, **les conclusions de ces ACV d'e-fuels varient énormément**. Par exemple, pour du e-méthanol, les ACV issues de la bibliographie reportent des empreintes carbones en cradle to gate allant de **-1,7 à +9,7 kg**CO_2eq par kg de méthanol (Müller et al. 2020).

En outre, dans l'article de (Koj, Wulf, et Zapp 2019), les auteurs ont analysé 32 ACV de Power-to-X et notent que **les ACV étudiées manquent souvent de transparence**, et ce autant sur la **technologie** utilisée que sur les **méthodologies d'ACV** mises en œuvre.

Association ScoreLCA - Bât. C.E.I. 1- 66 boulevard Niels Bohr – F-69603 Villeurbanne cedex
Tél. 33(0)4 72 43 81 50 – Fax 33(0)4 72 44 07 32 – contact@scorelca.org – site : www.scorelca.org

2 Objectifs de l'étude

Dans ce contexte, ScoreLCA a mandaté le partenariat EVEA (expert ACV) x S3D (expert carburant alternatif) pour :

- Etablir l'état des lieux technologique de 8 e-fuels (rapport d'étude partie 2)
- Identifier les enjeux technologiques des e-fuels et les enjeux méthodologiques ACV associés, (rapport d'étude partie 3 et 4)
- Sur la base d'un cas d'étude et de la revue bibliographique, aboutir à des recommandations méthodologiques pertinentes pour des ACV de e-fuels (rapport d'étude, partie 5)

Association ScoreLCA - Bât. C.E.I. 1- 66 boulevard Niels Bohr – F-69603 Villeurbanne cedex
Tél. 33(0)4 72 43 81 50 – Fax 33(0)4 72 44 07 32 – contact@scorelca.org – site : www.scorelca.org

3 Etat de l'art technologique des e-fuels

Le rapport présente une revue des connaissances actuelles sur les carburants de synthèse (e-fuels), en se concentrant sur les technologies de production, leur maturité technologique, leur rendement et leur consommation énergétique, ainsi que les obstacles techniques et économiques à leur adoption.

3.1 Production d'hydrogène

La production d'hydrogène, une étape initiale cruciale dans la synthèse des e-fuels, s'appuie principalement sur l'électrolyse de l'eau, une technologie dont la maturité peut être qualifiée de commerciale. L'électrolyse alcaline et l'électrolyse PEM (Proton Exchange Membrane) sont largement utilisées pour leurs performances et leur adaptabilité aux contraintes industrielles. Toutefois, ces procédés sont par essence électro-intensifs, avec un rendement électrique d'environ 60-75 %, en fonction de la taille de l'installation. Un refroidissement est nécessaire pour dissiper la chaleur excédentaire produite. De plus, en général, une compression de l'hydrogène est également requise, jusqu'à plusieurs dizaines de bar selon les applications, voir centaines de bar pour le transport.

3.2 Capture du CO_2

Les sources de CO_2 peuvent être de concentrations diverses : sources concentrées (45%vol. CO_2), comme pour les effluents gazeux de Steam Methane Reforming, sources moyennement concentrées (8.5%vol. CO_2) comme les fumées de combustion ou sources diluées (0,04%vol. CO_2) comme dans l'air atmosphérique.

Les technologies de capture incluent :

- **Absorption chimique** : Utilisant des solvants tels que la MEA (monoéthanolamine), cette technologie est la plus mature pour les flux riches en CO_2. Elle comprend une étape de régénération thermique du solvant, qui nécessite un apport de chaleur.
- **Adsorption et cryogénie** : Appropriées pour des flux à faible concentration en CO_2, la cryogénie permet d'atteindre une haute pureté du produit, mais restent coûteuses en termes de consommation énergétique.
- **Direct Air Capture (DAC)** : Cette technologie permet de capter le CO_2 de l'atmosphère, mais son coût et sa consommation énergétique restent un frein à une utilisation industrielle à grande échelle.

3.3 Synthèse de carburants spécifiques

Chaque type de carburant de synthèse – e-méthanol, e-kérosène (e-SAF), e-diesel, e-DME et e-essence – nécessite des procédés spécifiques qui influencent les rendements et les coûts.

- **E-Méthanol** : Le méthanol synthétique est produit par réduction catalytique du CO_2 avec l'H_2 avec un rendement net de 82 %. Ce carburant est particulièrement utilisé dans les secteurs industriels et comme base pour d'autres synthèses chimiques.

- **E-Kérosène (e-SAF)** : produit par synthèse Fischer-Tropsch ou via la conversion du méthanol en distillats, le e-kérosène est destiné au secteur de l'aviation. Il doit répondre à des normes de sécurité strictes comme l'ASTM D7566, autorisant son mélange avec du kérosène classique jusqu'à 50 %. La voie Fischer-Tropsch présente un rendement de 76 %, mais la réaction exige une importante consommation d'énergie pour la compression et le chauffage des réactifs (CO_2 et H2).

Association ScoreLCA - Bât. C.E.I. 1- 66 boulevard Niels Bohr – F-69603 Villeurbanne cedex
Tél. 33(0)4 72 43 81 50 – Fax 33(0)4 72 44 07 32 – contact@scorelca.org – site : www.scorelca.org

- **E-Diesel** : également produit par Fischer-Tropsch, il peut être mélangé au diesel fossile. Il est conforme à la norme EN 15940, ce qui le rend compatible avec les moteurs diesel sans nécessiter de modifications. Le rendement net atteint 88 %.

- **E-Essence** : cette voie de production est équivalente à la production du e-kérosène avec ajout d'un traitement supplémentaire pour générer des hydrocarbures plus légers. L'essence de synthèse est conforme aux normes européennes EN 228, et peut être utilisée dans les moteurs classiques. Sa production est énergivore, notamment en électricité pour la compression des réactifs, et son rendement net avoisine les 85 %.

- **E-DME (diméthyléther)** : produit principalement par déshydratation de méthanol, le DME est considéré comme une alternative viable au GPL et au diesel, grâce à ses propriétés de combustion propres et son absence de particules fines à l'échappement. Pour un usage de carburant, le DME est utilisé en mélange au GPL dans les mêmes moteurs que les moteurs essence ou en mélange au diesel. Le rendement de production est d'environ 90 %.

3.4 Consommation électrique et surplus de chaleur

Chaque type de carburant synthétique implique une consommation élevée d'électricité, notamment pour la compression en amont des réactions thermochimiques. Par exemple, la production d'e-kérosène par Fischer-Tropsch nécessite environ 0,528 kWh/kg, et celle d'e-diesel atteint des niveaux similaires. En ce qui concerne l'intégration thermique de ces procédés de production, certaines réactions étant exothermiques, la chaleur excédentaire est généralement récupérée, contribuant à l'efficacité énergétique des installations.

3.5 Maturité et enjeux de développement

Les technologies de production d'e-fuels se situent à différents niveaux de maturité (TRL). La production de méthanol et d'hydrogène par électrolyse est proche d'une adoption industrielle à grande échelle. Cependant, certaines voies, comme la DAC pour la capture du CO_2 atmosphérique ou la conversion du CO_2 en oléfines, requièrent des avancées pour une déploiement commercial. Les coûts de production élevés sont le principal obstacle au déploiement de ces alternatives.

3.6 Perspectives et projets

Des projets pilotes en Europe (par exemple en Allemagne avec l'usine Sunfire) et aux États-Unis montrent un intérêt croissant pour les e-fuels. La réglementation favorise cette adoption dans les secteurs de l'aviation et du transport maritime, où les alternatives vertes sont limitées. L'IRENA projette que la demande mondiale en méthanol atteindra 500 Mt d'ici 2050, et que les carburants de synthèse représenteront une part croissante du mix énergétique pour le transport.

Association ScoreLCA - Bât. C.E.I. 1- 66 boulevard Niels Bohr – F-69603 Villeurbanne cedex
Tél. 33(0)4 72 43 81 50 – Fax 33(0)4 72 44 07 32 – contact@scorelca.org – site : www.scorelca.org

3.7 Comparaison technologique de différents e-fuels

	Méthane		Méthanol	Ammoniac	Essence		Diesel	DME		SAF	
	Catalytique	Biologique	Catalytique	Haber Bosch	FT	Voie méthanol	FT	Syngas to DME	Methanol to DME	FT	Voie méthanol
Maturité	TRL 9 : Mature et industrialisé	TRL 7 : Démonstrateur industriel	TRL 7-8 : Prod. en fin de démonstration / début commercialisation	TRL9 : Technologie développé sur la production conventionnelle	FT : TRL 9 RWGS : TRL 7	MTO : TRL 9 Commercialisé aujourd'hui par Haldor Topsoe et ExxonMobil	FT : TRL 9 RWGS : TRL 7	TRL 5 – 6 Moins mature que l'autre synthèse	TRL 6- 7 A horizon 2030	FT : TRL 9 RWGS: TRL 7	MTK : TRL 9 Commercialisé aujourd'hui par Haldor Topsoe et ExxonMobil
Stockage/ distribution	Compression ou liquéfaction		Station-service en Chine (M100)	Stocké à -33°C- Transport par Navire-camion	Structures existantes		Structures existantes	Structures existantes		Structures existantes	
Marché	Véhicules et marché développés		Voiture thermique. + chimiquiers	Pas encore développé	Véhicules et marchés existants	Véhicules et marchés existants	Véhicules et marchés existants	Pas encore développé		Véhicules et marchés existants	
Besoin catalyseur	Ni, Ru, Rh	N A	Cu,Zn, Alumine	Fe_2O_4-Fe/AL_2O_3-KOH	RWGS FT	Méthanol to Olefins	RWGS FT	Catalyseur bi fonctionnel	ɣ Alumine – alumine de silice	RWGS FT	Méthanol to Olefins
Prod./besoin chaleur	Réaction exothermique	Réaction exothermique	Réaction exothermique	Chaleur produite utilisée => Autotherme	Réaction exothermique	Réaction exothermique	Réaction exothermique	Non connu	Endothermique 1.68 kWh/kg	Réaction exothermique	Réaction exothermique
Conditions P, T	10 à 15 bar 250 à 400°C	< 10 bar 20 à 60°C	50 à 100 bar 250 à 300°C	100 à 300 bar 300 à 550°C	10 à 60 bar LT : 190-250°C HT : 320–350°C	15 à 20 bar 300 à 400°C	10 à 60 bar LT : 190-250°C HT : 320–350°C	Non connu	10 à 12 bar 290 à 400°C	10 à 60 bar LT : 190-250°C HT: 320–350°C	15 à 20 bar 300 à 400°C
Electricité	Synthèse CH4 0.320 kWh/kg	Synthèse CH4 0.320 kWh/kg	Synthèse MeOH 0.276 kWh/kg	Synthèse NH3 0.585 kWh/kg	Synthèse essence 0.526 kWh/kg	Synthèse essence 0.827 kWh/kg	Synthèse diesel 0.528 kWh/kg	Non connu	MeOH to DME 0.0022 kWh/kg	Synthèse SAF 0.528 kWh/kg	Synthèse SAF 0.832 kWh/kg
Co-produits	N A	N A	Eau	N A	Diesel (28%) / kérosène (32%) / GPL (3%)	GPL (19%) / gaz (1%)	Essence (37%) / Kérosène (32%) / GPL (3%)	Eau	Eau	Essence (37%) / Diesel (28%) / GPL (3%)	Diesel (65%) / GPL (8%) / gaz (2%)
Besoin de CO_2	Synthèse du méthane		Synthèse du méthanol	N A	Production CO (RWGS)	Synthèse du méthanol	Production CO (RWGS)	Réactif de DME	Synthèse du méthanol	Production CO (RWGS)	Synthèse du méthanol

4 Enjeux méthodologiques de l'ACV des e-fuels

D'après la bibliographie, les enjeux majeurs des ACV d'e-fuels sont :

- L'évaluation **des sources d'électricité** utilisées pour la fabrication de l'hydrogène,
- La **méthodologie utilisée pour la prise en compte pertinente du** CO_2 comme matière première,
- Et, dans une moindre mesure, la bonne prise en compte du **type et de l'efficacité de l'électrolyseur.**

Dans cette synthèse, nous détaillerons donc principalement ces 3 points.

Dans le rapport d'étude, l'état de l'art méthodologique est décomposé en 2 principales parties :

- L'état de l'art des données disponibles permettant de réaliser des ICV (partie 3 du rapport d'étude)
- Les enjeux méthodologiques des e-fuels avec illustration sur un cas d'étude et recommandations (partie 4 du rapport d'étude)

4.1 Etat de l'art des données disponibles permettant de réaliser des ICV

L'état de l'art des données disponibles détaille les ICV disponibles pour la modélisation des:

- procédé de captage du CO_2 avec ou sans pré-traitement des fumées de CO_2 et avec ou sans purification aval du CO_2
- transport du CO_2 sous forme de gaz comprimé (en pipeline) ou sous forme de gaz liquéfié (en camion/train/bateau réfrigéré).
- infrastructures d'électrolyseur
- phase de remplissage des cuves
- combustion du e-fuel.
- modélisation des sources d'électricité.
  Ce point présente un enjeu particulier pour l'ACV des e-fuels : la consommation d'électricité de l'électrolyseur pour produire le dihydrogène est l'une des principales sources d'impact. Ainsi, il est particulièrement important de s'assurer de la robustesse des données suivantes :
  - Quantité d'électricité consommé par l'électrolyseur
  - Mix électrique utilisé
  - Inventaires des moyens de production électrique et de transport d'électricité.

Les recommandations sur le choix de ces données sont les suivantes :

Donnée	Recommandation
Quantité d'électricité consommée par l'électrolyseur	1. Utiliser une **donnée spécifique** lorsque c'est possible, 2. A défaut, utiliser une **donnée bibliographique**, avec une attention particulière sur la **représentativité technologique** de la donnée utilisée.
Mix électrique utilisé	1. Utiliser une **donnée spécifique** lorsque c'est possible (production d'électricité dédiée, contrat avec un fournisseur qui garantit un certain mix) 2. En cas d'utilisation d'électricité du réseau, utiliser **la donnée la plus à jour possible**. En France, RTE donne le mix électrique de production le plus à jour (auquel il convient d'ajouter imports et exports pour aboutir au mix électrique de consommation souhaité).

	3. **Eviter d'utiliser des données secondaires issues de bases de données**, qui peuvent être moins à jour que des données d'autres sources.
Inventaire des moyens de production et de transport d'électricité	1. Si possible, utiliser des **données spécifiques** (production dédiée) 2. Le cas échéant, **la base de données d'ACV ecoinvent** fournit des données secondaires avec une excellente représentativité géographique, une bonne représentativité technologique, mais une représentation temporelle limitée.

La prise en compte des certificats d'électricité verte en ACV est détaillée dans l'étude SCORE LCA « *Mix électriques géographiques vs mix électriques marché : quelles recommandations en ACV ? ».*

4.2 Enjeux méthodologiques d'un e-fuel

Une ACV de e-fuels doit suivre les 4 phases principales d'une ACV définie par les normes ISO 14040 et ISO 14044, c'est-à-dire : objectifs et champ de l'étude, Inventaire du cycle de vie, Evaluation des impacts et Interprétation des résultats.

4.2.1 OBJECTIF

L'objectif de l'étude doit détailler l'application envisagée, les raisons conduisant à réaliser l'étude, le public concerné et la communication envisagée.

Tableau 1 : Recommandations concernant les finalités de l'ACV

Finalités de l'ACV	Exemple de raison conduisant à réaliser l'ACV
Ecoconcevoir un e-fuel	Comparer les impacts environnementaux de différents systèmes e-fuels Comparer des variantes d'un système e-fuel
S'assurer de l'intérêt environnemental d'un e-fuel Communiquer sur l'intérêt environnemental d'un e-fuel	Comparer les impacts environnementaux d'un e-fuel avec une solution de référence (carburant fossile, émission de CO_2 à l'air ou autre système de stockage d'énergie)
Communiquer sur les impacts environnementaux d'un e-fuel	Calculer l'empreinte environnementale d'un e-fuel pour communiquer auprès de partenaires externes

4.2.2 CHAMP DE L'ETUDE

Le champ de l'étude doit détailler entre autres :

- Le système de produit à étudier : fonction, unité fonctionnelle et flux de référence
- Les frontières du système : périmètre, description du système et règle de coupure
- La gestion de la multifonctionnalité du système

Association ScoreLCA - Bât. C.E.I. 1- 66 boulevard Niels Bohr – F-69603 Villeurbanne cedex
Tél. 33(0)4 72 43 81 50 – Fax 33(0)4 72 44 07 32 – contact@scorelca.org – site : www.scorelca.org

4.2.2.1 Système de produit à étudier

L'unité fonctionnelle, selon l'ISO 14044, quantifie la ou les fonctions du système, c'est « la performance quantifiée d'un système destinée à être utilisée comme unité de référence ».

Le choix de **l'unité fonctionnelle** varie en fonction des objectifs de l'ACV. Dans le cas des e-fuels, les unités fonctionnelles suivantes peuvent être pertinentes :

Tableau 2 : Recommandations d'unité fonctionnelle en fonction des différents objectifs de l'ACV

Finalité de l'ACV	Objectif de l'ACV	Type d'unité fonctionnelle	Exemples d'unité fonctionnelle
S'assurer de l'intérêt environnemental d'un e-fuel Communiquer sur l'intérêt environnemental d'un e-fuel	Comparer des carburants aux mêmes compositions et propriétés physico-chimiques	Contenu énergétique	Produire 1 MJ PCI de carburant Produire et utiliser 1 MJ PCI de carburant
	Comparer des carburants aux compositions ou propriétés physico-chimiques différentes (rendement, etc.)	Service énergétique	Parcourir 100km avec un véhicule moyen, en France, en 2024 Transporter 1 tonne de marchandise, sur 1km, en France, en 2024 Parcourir 1000km avec un avion de catégorie X
	Comparer des procédés de traitement du CO_2	Unités multifonctionnelles	Traiter 1kg de CO_2 issue d'une industrie ET fournir X MJ de carburant
	Comparer des procédés de stockage énergétique	Unités multifonctionnelles	Soutirer 1 MW au réseau électrique pendant 1h ET fournir X MJ de carburant
Ecoconcevoir un e-fuel	Comparer les impacts environnementaux de différents systèmes e-fuels Comparer des variantes d'un système e-fuel	Contenu énergétique	Produire 1 MJ PCI de carburant Produire et utiliser 1 PJ PCI de carburant
Communiquer sur les impacts environnementaux d'un e-fuel	Calculer l'empreinte environnementale d'un e-fuel	Contenu énergétique	Produire 1 MJ PCI de carburant Produire et utiliser 1 PJ PCI de carburant

4.2.2.2 Frontières d'un système

Les frontières du système incluent le périmètre du système, une description du système avec un diagramme de flux et une description des règles de coupures.
Le périmètre se décompose en 3 composantes : le périmètre « étapes de cycle de vie », le périmètre temporel, et le périmètre géographique.

Association ScoreLCA - Bât. C.E.I. 1- 66 boulevard Niels Bohr – F-69603 Villeurbanne cedex
Tél. 33(0)4 72 43 81 50 – Fax 33(0)4 72 44 07 32 – contact@scorelca.org – site : www.scorelca.org

4.2.2.3 Périmètre « étapes du cycle de vie »

Les producteurs de carburant utilisent une terminologie spécifique pour exprimer les étapes du cycle de vie prises en compte dans leurs ACV :

- Well-to-Wheel (du puits à la roue) pour toute ACV prenant en compte l'ensemble du cycle de vie. Cette expression est équivalente à l'expression Cradle to grave (du berceau à la tombe), étant donné que les phases usages et fin de vie sont confondues dans le cas d'un carburant.
- Well-to-tank (du puits au réservoir) lorsque la phase usage/fin du vie du carburant est écartée. Elle correspond à l'expression Cradle to custumer gate dans les ACV classiques (du berceau à la porte du consommateur). Well-to-Pump est parfois aussi utilisé pour désigner les mêmes étapes.

Le tableau suivant illustre ces terminologies :

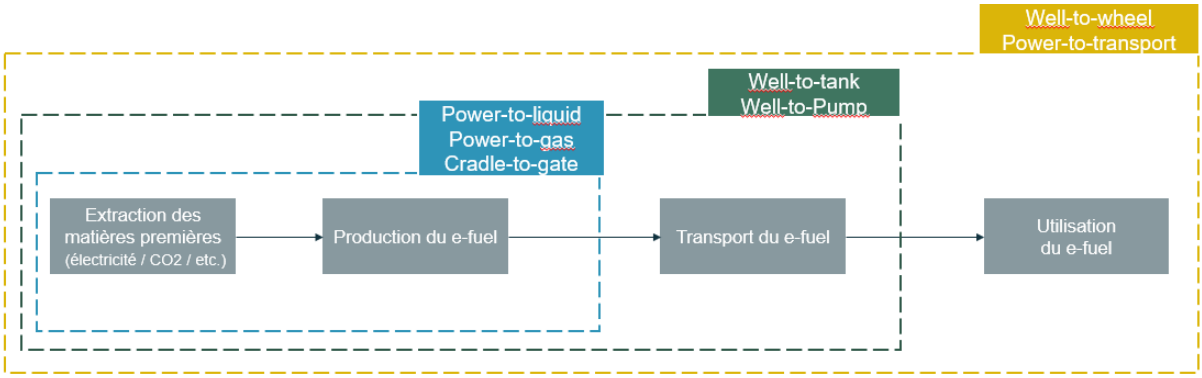


Figure 1: Terminologies usuelles pour exprimer les étapes de cycle de vis prises en compte dans une ACV d'e-fuel

En outre, lors de la conversion d'électricité en un autre produit, les terminologies suivantes sont aussi utilisées :

- **Power-to-gas :** carburant gazeux fabriqué à partir d'électricité, considéré sur un cycle de vie Well-to-Tank,
- **Power-to-liquid :** carburant liquide fabriqué à partir d'électricité, considéré sur un cycle de vie Well-to-Tank,
- **Power-to-transport :** carburant liquide ou gazeux considéré en cycle de vie Well-to-Wheel,
- **Power-to-chemicals :** produit chimique fabriqué à partir d'électricité, considéré sur un cycle de vie Cradle-to-gate ou cradle-to-custumer gate. Hors scope dans le cadre des e-fuels.
-

Power-to-X : Expression souvent utilisée pour résumer l'ensemble des possibilités précédentes

Un e-fuel et son équivalent fossile ont généralement des compositions chimiques différentes, il est donc nécessaire de considérer la phase usage afin de comptabiliser les différences d'émissions de combustion.

Tableau 3 : Recommandation sur le choix des étapes du cycle de vie à prendre en compte

Etape du cycle de vie	Recommandation
Matière première	Toujours prendre en compte
Fabrication	Toujours prendre en compte
Distribution	A prendre en compte : - Si l'objectif est un calcul d'empreinte sur cycle de vie complet - Pour toute comparaison où les circuits de distribution sont différents entre les solutions Dans tous les autres cas, ne pas prendre en compte
Usage/Combustion	A prendre en compte : - Si l'objectif est un calcul d'empreinte sur cycle de vie complet

Association ScoreLCA - Bât. C.E.I. 1- 66 boulevard Niels Bohr – F-69603 Villeurbanne cedex
Tél. 33(0)4 72 43 81 50 – Fax 33(0)4 72 44 07 32 – contact@scorelca.org – site : www.scorelca.org

	- Pour toute comparaison où les compositions ou propriétés physico-chimiques sont différentes entre les solutions Dans tous les autres cas, ne pas prendre en compte
Infrastructures	Il est recommandé, notamment les systèmes d'électrolyse de l'eau pour produire l'H_2, etc., de considérer les infrastructures dans l'inventaire pour évaluer l'impact des métaux utilisés dans de telles infrastructures.

4.2.2.4 Périmètre temporel

Une ACV peut être présente ou prospective (2030, 2040, 2050…). Ce dernier point est traité spécifiquement dans l'étude de Score LCA « Recommandations pratiques pour l'ACV prospective/ références et exemples dans le domaine de l'énergie ».

4.2.2.5 Périmètre géographique

Une bonne pratique est de définir un périmètre géographique au niveau de l'unité fonctionnelle (exemple : en France).

4.2.2.6 Description du système

Il est conseillé de décrire les frontières du système sous la forme d'un schéma.

Dans une ACV d'e-fuel, la description du système doit préciser, entre autres, les éléments suivants :

- Concernant le CO_2 ou le N_2 utilisé en matière première :
  - **L'origine du** CO_2 / N_2 (DAC, CCU centrale électrique, CCU cimenterie, CCU usine d'ammoniac, CCU avec du carbone d'origine biogénique, etc.).
  - La **technologie de capture et de purification** utilisée
  - Si une étape de pré-traitement des fumées est nécessaire avec la capture du CO_2.
  - Le type de transport du CO_2
- Concernant l'électrolyseur :
  - Le **type d'électrolyseur** (PEM, AEL, SOEC, ou autre),
  - Si l'**oxygène** co-produit est **valorisé** ou non, et si oui comment
  - L'origine de l'électricité : Mix électrique, avec ou sans garantie d'origine sur tout ou une partie de l'électricité issue de sources renouvelables
- La description de la fabrication du e-fuel
- Selon le périmètre d'ACV, la description du système de distribution du carburant
- Selon le périmètre d'ACV, la description de l'**usage** :
  - Les catégories de véhicules et de moteurs qui pourront utiliser l'e-fuel,
  - Les conditions d'utilisation (par exemple, si un mélange est nécessaire avec du carburant classique avant utilisation).

4.2.2.7 Règles de coupure

Les règles classiques d'ACV s'appliquent. En particulier, le PEF recommande une règle de coupure à 3% sur les aspects masse, énergie ou impacts environnementaux.

4.2.2.8 Gestion de la multifonctionnalité

Les e-fuels (hors DACC) utilisent très majoritairement du CO_2 capturé d'une usine produisant d'abord un autre produit (électricité, ciment, ammoniac, etc.). Dans la situation actuelle, les fumées de CO_2 sont émises à l'air et s'apparentent donc à un déchet (valeur économique nulle). Cependant, après capture du CO_2 de ces fumées, le CO_2 capturé est utilisable en tant que matière première. Dans une situation de croissance de la production des e-fuels, ce CO_2 devient une ressource, une matière première valorisable. En ce sens, l'usine dont est issu ce

Association ScoreLCA - Bât. C.E.I. 1- 66 boulevard Niels Bohr – F-69603 Villeurbanne cedex
Tél. 33(0)4 72 43 81 50 – Fax 33(0)4 72 44 07 32 – contact@scorelca.org – site : www.scorelca.org

CO_2 peut être vue comme une usine qui produit à la fois un produit principal (électricité, ciment, ammoniac, etc.) ET, de façon secondaire, le CO_2 utilisé par les e-fuels ensuite. L'usine est alors un système **multifonctionnel (traiter la fin de vie du CO_2 puis son utilisation pour fabriquer un nouveau produit)**.

La question qui se pose est donc la suivante : **comment gérer la multifonctionnalité de l'usine productrice du CO_2 ?** Autrement dit, comment répartir les impacts environnementaux entre l'usine amont et le fabriquant d'e-fuel ?

Pour le producteur d'électricité et pour le producteur du e-fuel, le e-fuel est un **CCU** (**C**arbon **C**apture and **U**tilisation), le CO_2 **purifié** a une **valeur**. Ce n'est pas un déchet qui nécessite d'être traité mais une matière première, valorisable. Le CO_2 pur (ou à concentration suffisamment élevée) est donc un co-produit.

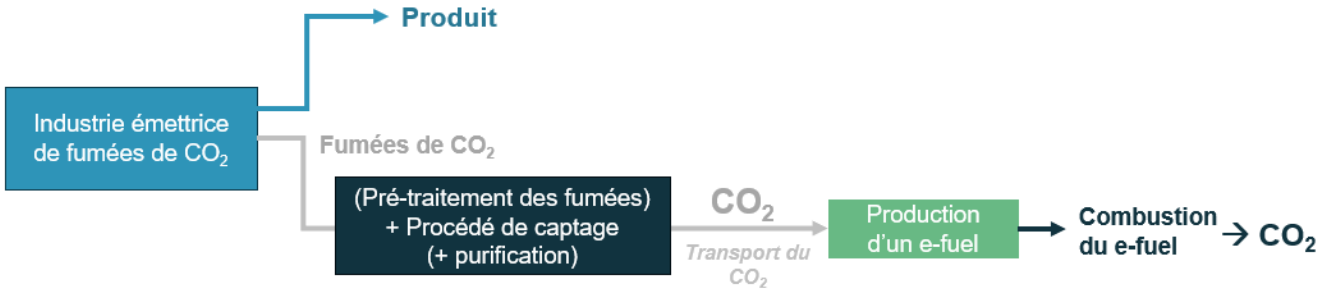


Figure 2 : Schéma illustrant la multifonctionnalité entre les deux industries et cycles de vie

Pour gérer les systèmes multifonctionnels, la norme ISO14044 recommande plusieurs méthodologies applicables dans le cas des ACV d'e-fuel. Ce sont, par ordre de priorité :

1. L'extension des frontières du système,
2. La subdivision,
3. Les affectations (allocations en anglais).

D'autres référentiels évoquent d'autres méthodologies, qui combinent les précédentes et qui peuvent s'avérer pertinentes dans le cas des ACV d'e-fuel :

- L'extension / substitution (amendement A2 de la norme ISO 14044)
- La substitution / affectation (méthode de Circular Footprint Formula du PEF).

A l'heure actuelle, il n'y a pas de consensus sur la méthodologie la plus pertinente à appliquer dans le cadre d'ACV d'e-fuel ; il s'agit pourtant d'un enjeu **clé dans l'ACV des e-fuels** : c'est un des 2 paramètres les plus influant dans les résultats d'une ACV d'e-fuel.

Dans le paragraphe ci-dessous, chaque méthodologie est expliquée succinctement.

- **L'extension des frontières** consiste à élargir les frontières du système pour prendre en compte le e-fuel ET le produit principal de l'usine émettrice de fumées de CO_2.

Association ScoreLCA - Bât. C.E.I. 1- 66 boulevard Niels Bohr – F-69603 Villeurbanne cedex
Tél. 33(0)4 72 43 81 50 – Fax 33(0)4 72 44 07 32 – contact@scorelca.org – site : www.scorelca.org

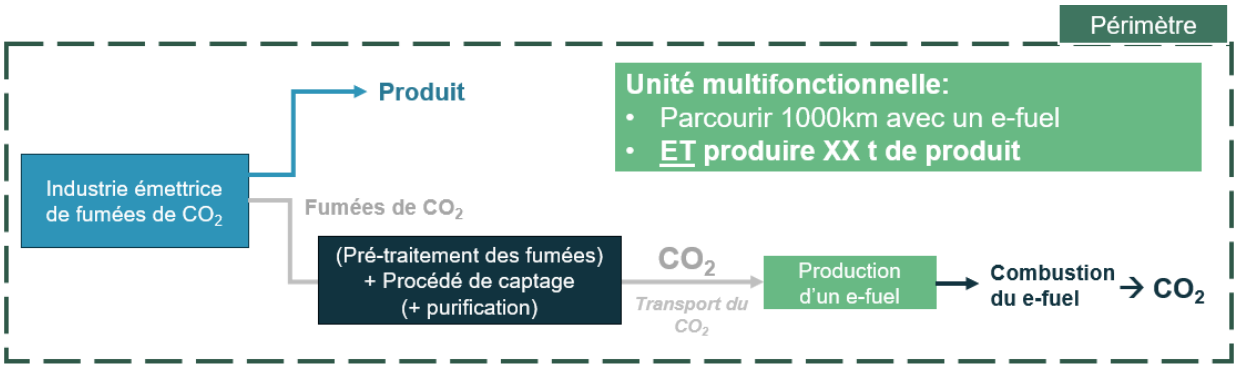


Figure 3 : Schéma simplifié illustrant l'extension des frontières

- **La subdivision** est inapplicable dans le cadre de la production de CO_2. Elle consiste à subdiviser le périmètre étendu entre le Produit et les fumées contenant le CO_2 et à spécifier les flux d'inventaire associés à chaque partie.

- **L'affectation** consiste à répartir les impacts du système multifonctionnel entre les deux cycles de vie en fonction de relations physiques sous-jacentes existant entre eux.

Les affectations s'appliquent difficilement pour les CCU car trouver une relation physique pertinente entre le Produit et le CO_2 s'avère compliqué à cause de la nature du CO_2 (stable donc de PCI nulle [allocation énergétique], contenu dans des fumées donc sans valeur économique [allocation économique]).

- La **méthode des stocks** (ou cut-off en anglais) est un type d'affectation : 100% des impacts de la capture du CO_2 sont attribués au e-fuel, et 0% à l'usine émettrice des fumées de CO_2.

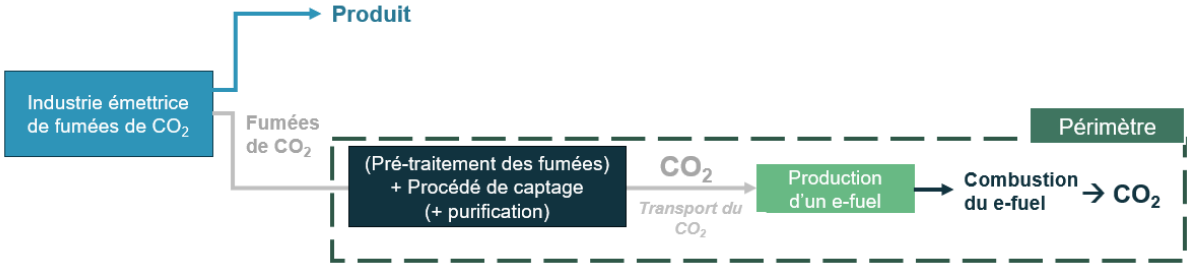


Figure 4 : Schéma simplifié illustrant la méthode des stocks

- La **méthode d'extension – substitution** consiste en :
  1. Extension : Le système « e-fuel » est étendu pour obtenir un système « Industrie émettrice de fumées de CO_2 **avec système CCU et production de e-fuel** »
  2. Substitution : On substitue à ce système étendu le système **initial «** Industrie émettrice de fumées de CO_2 **sans CCU »**

On obtient alors le système « e-fuel » isolé.

L'étude de ScoreLCA sur les CCU et CCS explique en détails cette méthodologie (SCORE LCA 2021).

Association ScoreLCA - Bât. C.E.I. 1- 66 boulevard Niels Bohr – F-69603 Villeurbanne cedex
Tél. 33(0)4 72 43 81 50 – Fax 33(0)4 72 44 07 32 – contact@scorelca.org – site : www.scorelca.org

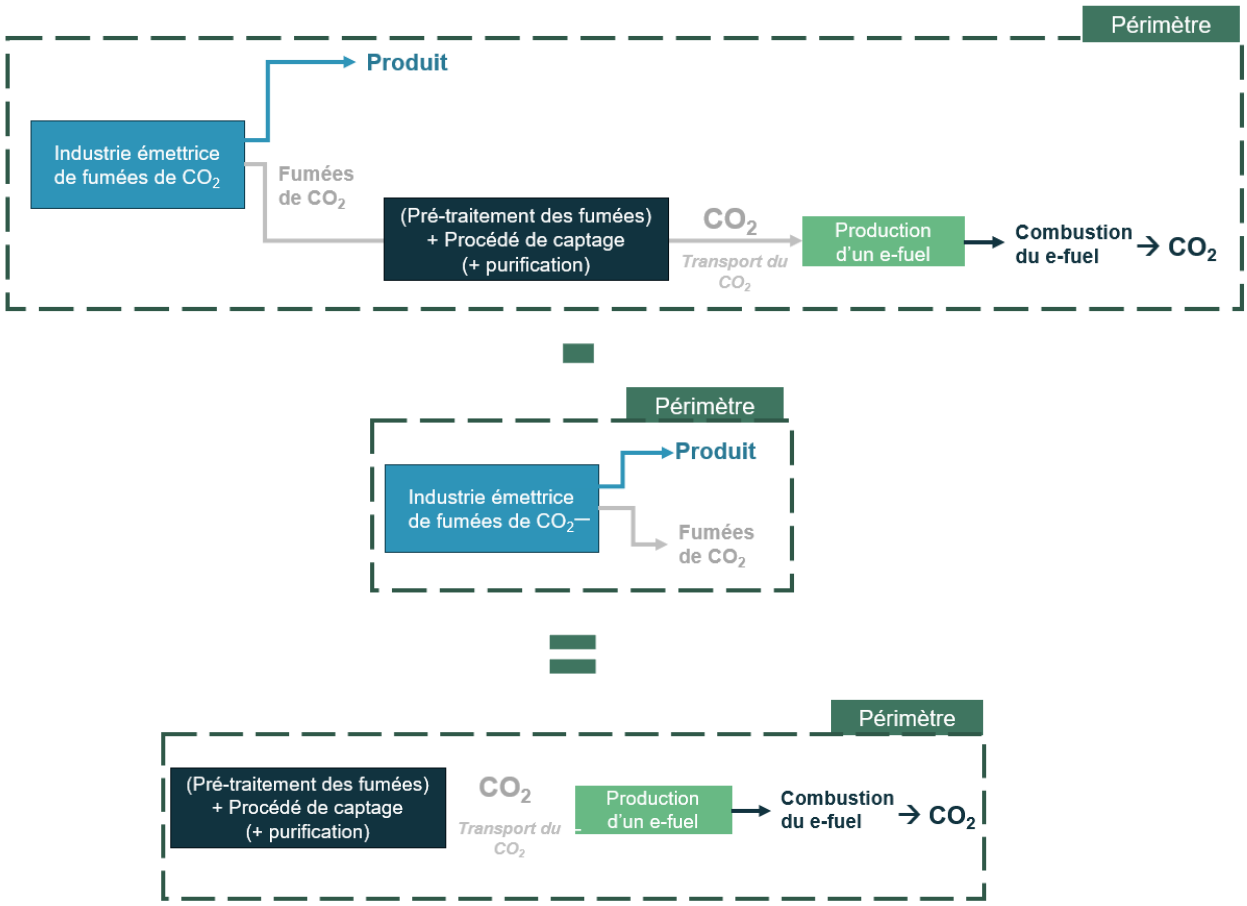


Figure 5 : Schéma illustrant l'extension - substitution

Remarque : Dans le cas des CCU où capter le CO_2 **ne modifie pas le procédé du système multifonctionnel,** la méthode extension – substitution se simplifie.
Il reste uniquement les inventaires suivants :

- L'inventaire de production (et d'utilisation) du e-fuel en tant que tel
- L'inventaire du procédé de captage
- Un flux négatif d'émissions de fumées de CO_2, correspondant aux émissions de ces fumées captées pour en extraire le CO_2

NB : il convient de prendre en compte les évolutions de l'industrie émettrice de fumées de CO_2 du fait de l'ajout d'un système CCU, dans la mesure du possible (disponibilité des données d'inventaire associées).

- La **Circular Footprint Formula (CFF)** définie et recommandée dans le Product Environmental Footprint (PEF) de la Commission Européenne est une méthodologie combinant affectation et substitution des impacts.

La position de la Commission Européenne quant à la méthodologie de la prise en compte des CCU est claire : **pour tout CCU, il convient d'utiliser la CFF** car le CCU est un type de recyclage : le recyclage du CO_2 en un produit. Les fumées de CO_2 émises par l'usine n'ont pas de valeur économique, mais le CO_2 capturé en a une : les fumées de CO_2 sont donc un **déchet** ; la capture du CO_2 et sa transformation correspond au **procédé de recyclage**.
Le produit utile à base de CO_2 est appelé « le point de substitution » de la CFF. Il correspond au 1er intrant remplaçant un produit équivalent dans un procédé conventionnel, c'est-à-dire, en général, le e-fuel qui remplace un carburant classique. Le procédé de recyclage correspond donc le plus souvent au recyclage des fumées de CO_2 en e-fuel.

Association ScoreLCA - Bât. C.E.I. 1- 66 boulevard Niels Bohr – F-69603 Villeurbanne cedex
Tél. 33(0)4 72 43 81 50 – Fax 33(0)4 72 44 07 32 – contact@scorelca.org – site : www.scorelca.org

Dans le cas des sources de fumées de CO_2 concentrées (par exemple une usine d'ammoniac), les fumées de CO_2 étant pures, celles-ci sont considérées comme un co-produit, et non comme un déchet à recycler.

Aucune bibliographie n'a appliqué la CFF à des CCU, seul un document de recherche du Joint Research Center explique la théorie.

Dans le rapport et pour le cas d'étude, nous avons appliqué la CFF aux e-fuels.

Ci-dessous, un tableau résumant les différentes méthodes de gestion de la multifonctionnalité, ainsi qu'un arbre de décision.

	Normes et référentiels ACV	Collecte des données ?	ACV additionnables?	Prise en compte de l'origine du CO_2 ?	Résultats e-fuel/ produit dissociables	Robustesse	Renvoi au rapport
EXTENSION	ISO14044, n°1	Importante (usine + CCU)	NA	OUI	NON	Forte	P83
EXTENSION-SUBSTITUTION	ISO14044, amendement A2	Importante (usine + CCU)	NON	OUI	OUI	Forte	P85
EXTENSION-SUBSTITUTION SIMPLIFIÉE	Extrapolation de la méthode d'extension-substitution	Satisfaisante (CCU)	NON	NON *(sauf biogénique vs fossile)*	OUI	Moyenne *(car on considère que le captage de CO_2 n'influe pas sur le procédé de l'usine)*	P85
SUBDIVISION	ISO14044, n°2	Non applicable aux CCUs					P89
ALLOCATION	ISO14044, n°3	Importante (usine + CCU)	OUI	OUI	OUI	Faible	P89
ALLOCATION : Méthode des stocks	ISO14044, n°3 (allocation à 100:0)	Satisfaisante (CCU)	OUI	NON	OUI	Faible	P89
CFF	PEF	Satisfaisante (CCU)	OUI	OUI	OUI	Faible	P92

Figure 6 : Tableau récapitulatif des différentes méthodes de gestion de la multifonctionnalité

Association ScoreLCA - Bât. C.E.I. 1- 66 boulevard Niels Bohr – F-69603 Villeurbanne cedex
Tél. 33(0)4 72 43 81 50 – Fax 33(0)4 72 44 07 32 – contact@scorelca.org – site : www.scorelca.org

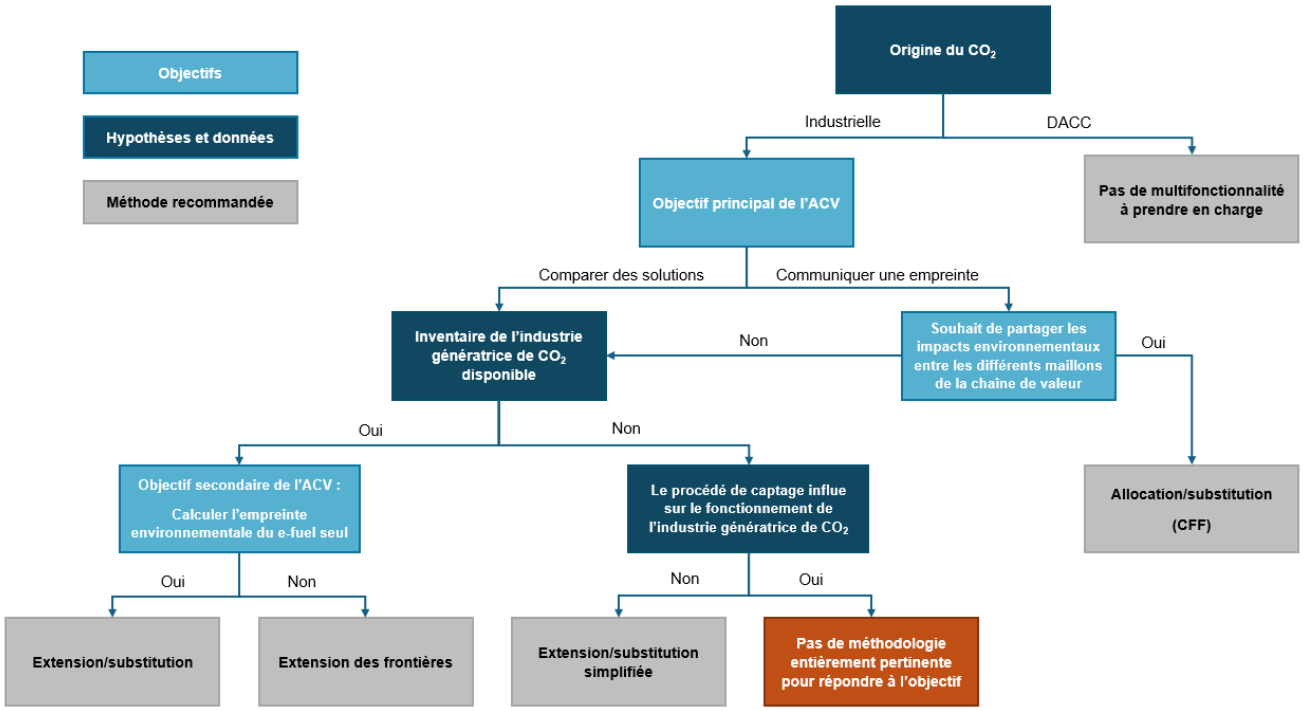


Figure 7: Recommandations pour le choix de la méthodologie de gestion de la multifonctionnalité du système

4.3 Choix des indicateurs d'impacts

Il est recommandé de suivre la méthode du PEF pour choisir les indicateurs d'impacts et d'ajouter les indicateurs suivants, car ils correspondent à des enjeux environnementaux identifiés pour les e-fuels :

- Changement climatique
- Epuisement des ressources fossiles
- Epuisement des ressources minérales et métalliques

Enfin, il est recommandé d'utiliser au moins un **indicateur de flux complémentaire**, caractérisant l'efficacité énergétique de la production du e-fuel. Un exemple d'indicateur complémentaire de cette catégorie est le suivant :

$$Efficacité\ énergétique = \frac{Contenu\ énergétique\ PCI\ du\ e-fuel}{Quantité\ d'énergie\ consommée\ à\ toutes\ les\ étapes\ du\ cycle\ de\ vie\ du\ e-fuel}$$

4.4 Autres enjeux

4.4.1 CARBONE BIOGENIQUE

La prise en compte du carbone biogénique permet de différencier une origine biosourcée de CO_2 (exemple, d'une bioraffinerie) vs. une origine pétrosourcée du CO_2 (exemple, d'une cimenterie ou d'une centrale à charbon). Que ce soit une origine biosourcée ou pétrosourcée, le e-fuel permet uniquement de « retarder » l'émission de CO_2 de l'usine amont -celui-ci sera réémis lors de la combustion du e-fuel- mais ne permet pas de stocker l'émission de l'usine amont (il y a stockage à partir d'une durée de vie du produit de 100ans). Le rapport détaille la procédure pour différencier une origine biosourcée d'une origine pétrosourcée de CO_2.

Association ScoreLCA - Bât. C.E.I. 1- 66 boulevard Niels Bohr – F-69603 Villeurbanne cedex
Tél. 33(0)4 72 43 81 50 – Fax 33(0)4 72 44 07 32 – contact@scorelca.org – site : www.scorelca.org

4.4.2 ACV PROSPECTIVE

L'un des intérêts des e-fuels est de valoriser la production d'électricité via des sources renouvelables. Or, ces sources d'énergie sont progressivement développées pour atteindre les objectifs de la transition énergétique. Pour cette raison, une approche prospective est intéressante dans le secteur des e-fuels. L'étude SCORE LCA numéro 2015-07 précise les bonnes pratiques à mettre en œuvre.

4.4.3 ACV CONSEQUENTIELLE

Les impacts des e-fuels varient en fonction du mix électrique et des technologies utilisés. Or le mix électrique futur dépend de la politique énergétique du pays. L'ACV conséquentielle permet d'inclure les changements possibles liés à une décision politique par exemple dont bénéficiera les systèmes Power-to-X ou qui seront initiés par les systèmes Power-to-X.

4.4.4 ACV DYNAMIQUE

Une ACV peut être dynamique de 2 façons :

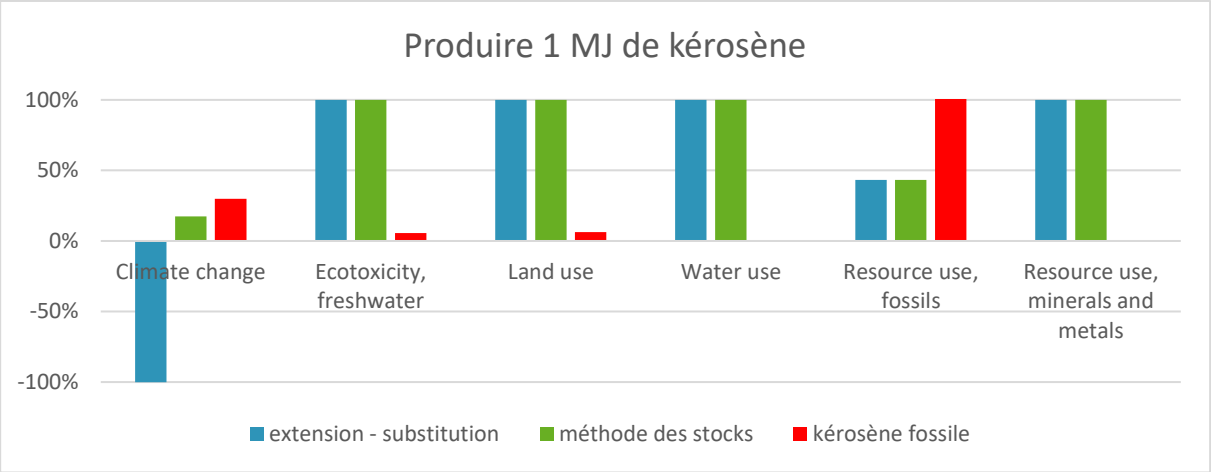
- Soit elle est dynamique par la modélisation de son inventaire : modélisation au pas à pas, par exemple, prendre un mix de consommation électrique heure par heure, ou année après année sur toute la durée de vie des installations. Ce type d'ACV dynamique prend en compte la temporalité de la production du e-fuel.
- Soit elle est dynamique par la caractérisation des impacts résultants de l'inventaire (dynamique ou non) : par exemple, du CO_2 émit immédiatement et du CO_2 stocké puis émit 20 ans plus tard n'auront pas le même impact sur le changement climatique. Ce type d'ACV dynamique prend en compte la temporalité des émissions.

Association ScoreLCA - Bât. C.E.I. 1- 66 boulevard Niels Bohr – F-69603 Villeurbanne cedex
Tél. 33(0)4 72 43 81 50 – Fax 33(0)4 72 44 07 32 – contact@scorelca.org – site : www.scorelca.org

5 Conclusions issues du cas d'étude

Les enjeux méthodologiques cités ci-dessus sont illustrés par un cas d'étude : un e-kérosène en périmètre well-to-tank, avec de l'électricité éolienne. Ce cas d'étude fait suite au cas d'étude présenté dans l'étude SCORE LCA *« LCA benefits and limitations for the assessement of CCS and CCU ».*

5.1 Influence de la gestion de la multifonctionnalité



Toutes les méthodologies : En fonction de la méthodologie utilisée, les résultats du e-kérosène sont très différents, notamment sur le changement climatique.

Extension-substitution :
Les résultats sont négatifs sur le changement climatique car les impacts liés à l'usine émettrice de fumées de CO_2 avec CCU en e-fuels sont inférieurs aux impacts de l'usine émettrices de fumées de CO_2 sans CCU.
Les pré-traitements des fumées de CO_2 avant capture du CO_2 permettent d'éliminer les polluants contenus dans ces fumées pour en isoler le CO_2. On observe ainsi une diminution des impacts sur le changement climatique, et les indicateurs associés à ces polluants par rapport à la méthode des stocks. En effet, contrairement à la méthode d'extension-substitution, la méthode des stocks ne prend pas en compte les avantages des CCU i.e. la capture de gaz avant émission à l'air.

Méthode des stocks : la méthode des stocks aboutit à des résultats d'impacts supérieurs à la méthode d'extension-substitution dans notre exemple car elle attribue l'intégralité du processus de capture de CO_2 à la production de e-fuel, sans compensation.
En effet, l'extension/substitution attribue l'intégralité du processus de capture de CO_2 mais a une compensation (substitution des émissions).

Comparaison au fossile : Le kérosène fossile est plus impactant que le e-fuel sur le changement climatique et sur l'utilisation de ressources fossiles pour toutes les méthodes.

Extension des frontières : Avec l'extension des frontières, l'unité fonctionnelle est modifiée pour « Produire 1MJ de e-kérosène et 0.10 kWh d'électricité », cette méthodologie n'est donc pas comparable avec les autres méthodologies dont l'unité fonctionnelle est « Produire 1MJ d'e-kérosène ».
Cependant, grâce à cette unité fonctionnelle « étendue », il s'agit de la seule méthodologie (avec ses variantes comme l'extension substitution) qui reflète le fait qu'on réduit également les impacts de l'électricité de la centrale à charbon en utilisant le CO_2 émis.

Association ScoreLCA - Bât. C.E.I. 1- 66 boulevard Niels Bohr – F-69603 Villeurbanne cedex
Tél. 33(0)4 72 43 81 50 – Fax 33(0)4 72 44 07 32 – contact@scorelca.org – site : www.scorelca.org

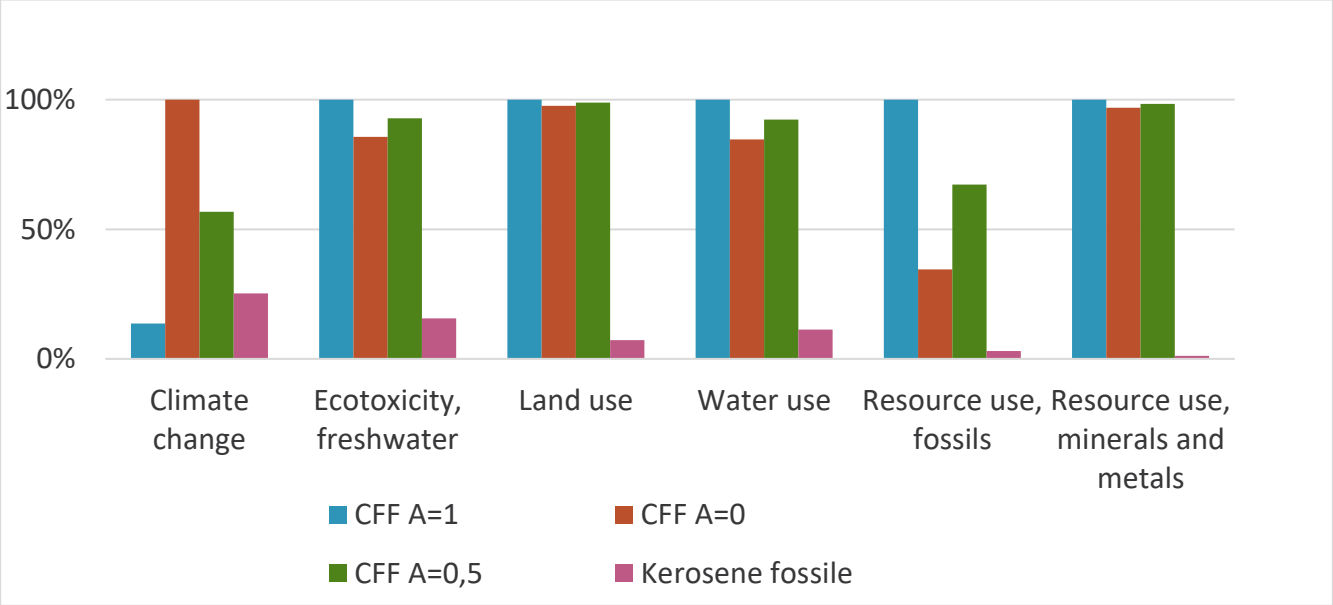
5.2 Influence de la gestion de la multifonctionnalité : focus sur la CFF

Dans le cas d'étude, le point de substitution choisi est le CO_2 concentré : le procédé de recyclage s'étend des fumées de CO_2 au CO_2 concentré, les fumées de CO_2 étant le déchet à recycler. Le matériau vierge est donc une émission de CO_2.

Quand A=1, la CFF équivaut à la méthode des stocks, et quand A=0, elle équivaut à prendre en compte 100% d'émission de CO_2 vers l'air à la place du processus de capture.

Une émission à l'air de 1kg de CO_2 est 20X plus impactante qu'1 kg de CO_2 capté et concentré. Avec la CFF avec A=0,5, le e-fuel s'attribue 50% des impacts de la capture du CO_2 et 50% d'émission à l'air de CO_2, c'est pourquoi la CFF avec A=1 (= la méthode des stocks) est moins impactante que la CFF avec A=0,5.

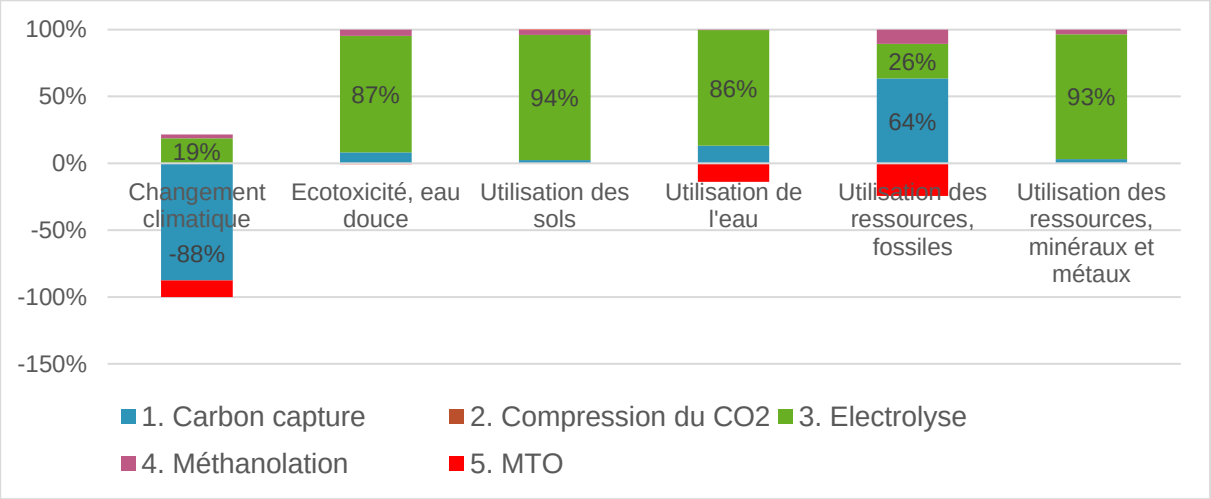
Le producteur de CO_2 s'attribue 50% des impacts de la capture du CO_2 et évite 50% d'émission à l'air de CO_2. Nous pourrions également, en variante, modéliser une CFF avec A=0,2 et A=0,8, mais qui donnerait une évolution linéaire des résultats d'impacts sur les graphiques sans grande surprise.



Les résultats varient significativement en fonction des paramètres choisis pour l'application de la méthode CFF.

Association ScoreLCA - Bât. C.E.I. 1- 66 boulevard Niels Bohr – F-69603 Villeurbanne cedex
Tél. 33(0)4 72 43 81 50 – Fax 33(0)4 72 44 07 32 – contact@scorelca.org – site : www.scorelca.org

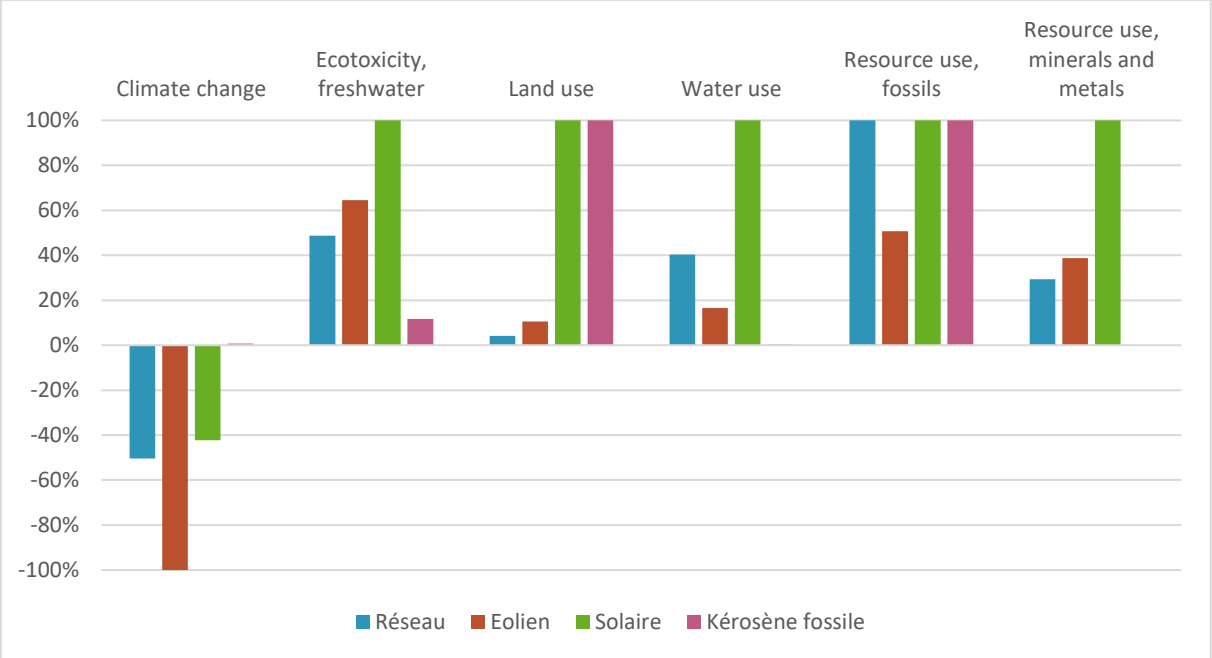
5.3 Principaux contributeurs par étape avec la méthode extension-substitution



Le principal contributeur aux impacts est l'électrolyse et plus particulièrement l'électricité éolienne sur presque tous les indicateurs.

Sur le changement climatique et les ressources fossiles, le principal contributeur est l'étape de carbon capture (lié aux émissions de CO2 substituées et l'électricité du réseau respectivement). Influence de la source d'électricité

5.4 Influence de l'électricité

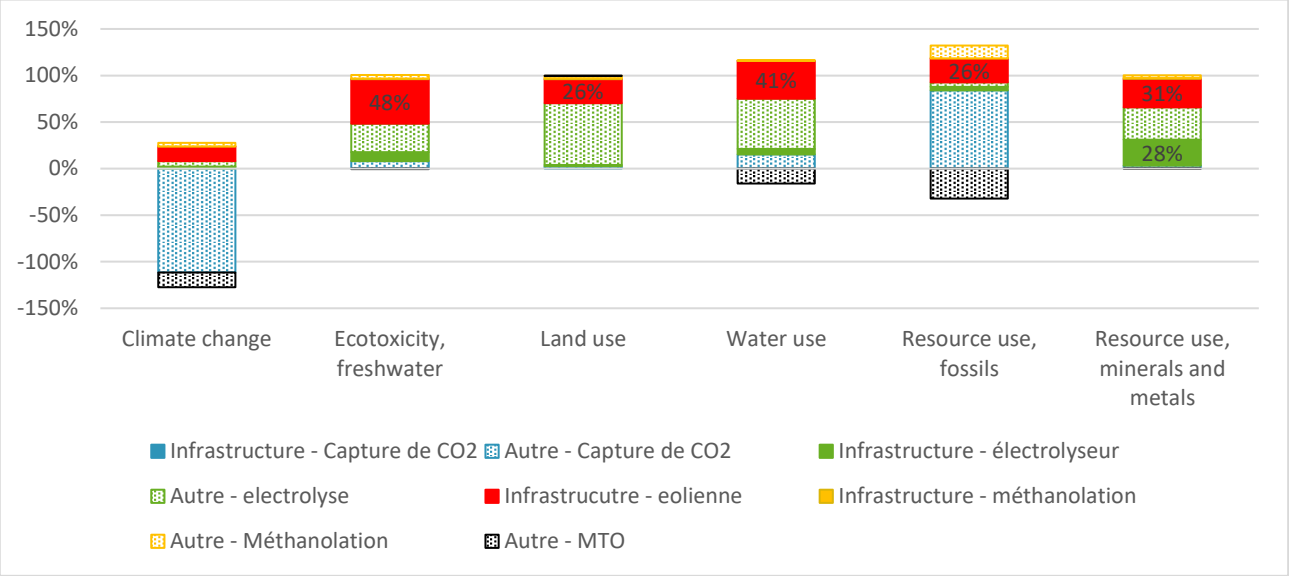


La source d'électricité pour l'électrolyse a un enjeu majeur sur les résultats. 3 sources sont étudiées : électricité du réseau, électricité solaire et électricité éolienne à terre.

Association ScoreLCA - Bât. C.E.I. 1- 66 boulevard Niels Bohr – F-69603 Villeurbanne cedex
Tél. 33(0)4 72 43 81 50 – Fax 33(0)4 72 44 07 32 – contact@scorelca.org – site : www.scorelca.org

La majorité des impacts de l'éolien et du solaire est liée à l'infrastructure (en particulier au cuivre et à l'aluminium utilisé). Les panneaux solaires sont plus impactants que les éoliennes globalement.

5.5 Contribution des infrastructures



Ci-dessous nous analysons, par rapport au graphique, la contribution relative des infrastructures au total du cycle de vie des e-fuels :

- Les infrastructures de la méthanolation et de la capture de CO_2 sont négligeables ;
- Les éoliennes sont les infrastructures qui génèrent le plus d'impacts (entre 26 et 48% hors « climate change ») ;
- L'infrastructure de l'électrolyseur génère aussi des impacts significatifs, en particulier sur l'utilisation de ressources minérales (à 28%) à cause du cuivre utilisé.

Association ScoreLCA - Bât. C.E.I. 1- 66 boulevard Niels Bohr – F-69603 Villeurbanne cedex
Tél. 33(0)4 72 43 81 50 – Fax 33(0)4 72 44 07 32 – contact@scorelca.org – site : www.scorelca.org