

Réalisation d'une analyse du cycle de vie d'un système pile à hydrogène

Aya BOUHLILA¹, Hugo HELBLING¹, Walter LHOMME², Elodie PAHON³, Ali SARI¹

¹Université Claude Bernard Lyon 1, Ampère, UMR5005, INSA Lyon, Ecole Centrale de Lyon, CNRS, Villeurbanne, F-69100, France

²Univ. Lille, Arts et Metiers Institute of Technology, Centrale Lille, Junia, ULR 2697 – L2EP, F-59000, Lille, France

³ Université Marie et Louis Pasteur, UTBM, CNRS, institut FEMTO-ST, F-9000 Belfort, France

RESUME - Cette étude présente et analyse les impacts environnementaux associés à la fabrication et à l'utilisation d'un système à pile à hydrogène de 48 kW, en s'appuyant sur les principes de la méthode normée d'Analyse du Cycle de Vie (ACV). L'objectif est d'identifier et d'évaluer ces impacts en fonction des composants et des matériaux, tout en discutant des enjeux méthodologiques associés. Les résultats montrent que la pile à combustible (stack) est le principal contributeur au changement climatique, avec un impact représentant 65 %, contre respectivement 21 % pour la batterie et 14 % pour les auxiliaires.

La comparaison de l'inventaire du stack avec une base de données issue de la littérature révèle des différences méthodologiques pouvant entraîner des écarts allant jusqu'à 41 % en termes d'émissions de dioxyde de carbone équivalent (CO₂ eq). Ces résultats soulignent la nécessité d'une harmonisation des pratiques en ACV. L'étude intègre également une première approche de la phase d'utilisation, fournissant une base pour de futures évaluations couvrant l'ensemble du cycle de vie.

Mots-clés – « Analyse du cycle de vie (ACV) », « inventaire du cycle de vie (ICV) », « système pile à hydrogène ».

1. INTRODUCTION

Dans l'optique de préserver notre environnement, il est essentiel de réduire significativement nos impacts environnementaux. En France, la mobilité a contribué à 32 % de la consommation énergétique en 2022, selon le rapport du Haut Conseil pour le Climat [1]. De plus, d'après l'INSEE, le secteur du transport routier est le principal contributeur aux émissions de gaz à effet de serre [2]. Face à ces constats, une question essentielle se pose : comment rendre le secteur de la mobilité plus durable et respectueux des limites planétaires ? Une des solutions envisagées est le développement de la mobilité dite décarbonée.

Parmi les alternatives envisagées, l'adoption de véhicules à pile à combustible alimentés par de l'hydrogène représente une solution prometteuse. Selon les normes européennes du dioxyde de carbone (CO₂) pour les voitures particulières et les camionnettes neuves de 2024 [3], les véhicules à pile à combustible utilisant de l'hydrogène gris permettent une réduction de 26 % des émissions de gaz à effet de serre par rapport aux véhicules à essence. Cette réduction peut atteindre 76 % avec de l'hydrogène vert, démontrant ainsi le potentiel des véhicules à pile à combustible pour contribuer significativement à la diminution des émissions.

C'est pourquoi la communauté scientifique accorde une attention croissante aux piles à combustible et à leurs impacts

environnementaux, afin d'évaluer et d'optimiser leur rôle dans la transition énergétique par l'évolution du nombre de

Plusieurs études récentes ont mis en évidence des résultats significatifs dans ce domaine.

En 2015, A. Simons et C. Bauer [4] ont montré qu'une réduction de 30 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) pourrait être atteinte d'ici 2020 grâce à l'utilisation de plaques bipolaires légères et à la réduction de la quantité de platine dans les piles à combustible. En 2019, Stropnik et al. [5] a souligné la contribution importante des matériaux critiques, tels que le platine et le Nafion, dans l'impact environnemental de ces technologies.

Plus récemment, en 2022, Alessandro Arrigoni [6] a exploré l'utilisation de polymères alternatifs pour améliorer la durabilité des piles à combustible, démontrant que cette approche pourrait contribuer à réduire les émissions de GES des véhicules à pile à combustible. Enfin, en 2023, Mitja Mori et al. [7] ont révélé que 63,5 % de l'impact climatique des piles à combustible est lié à l'utilisation de platine, mais qu'une réduction de 54 % de cet impact pourrait être obtenue en utilisant 95 % de platine recyclé.

Notons toutefois que Les résultats de ces études peuvent varier en fonction des logiciels utilisés, des bases de données, des sources d'information et des méthodologies employées.

Ce travail vise à améliorer la compréhension des impacts environnementaux associés à un système à pile à hydrogène, en s'appuyant sur la méthode normalisée d'Analyse du Cycle de Vie (ACV). Par ailleurs, ce papier propose une comparaison entre l'inventaire du stack de pile que nous avons établi et celui présenté dans l'étude [7], dans le but de mettre en évidence les écarts constatés et d'identifier les principaux facteurs susceptibles d'influencer ces résultats. Cette analyse comparative permettra également de discuter les limites de la méthode ACV. Contrairement à certaines études de référence qui se concentrent uniquement sur la phase de fabrication, notre travail intègre également la phase d'utilisation de la pile, ce qui permet d'élargir l'analyse aux impacts générés pendant son fonctionnement.

2. METHODOLOGIE DE REALISATION DE L'INVENTAIRE

2.1 CHOIX DES OUTILS POUR LA REALISATION DE L'INVENTAIRE

Pour étudier l'impact environnemental des piles à combustible, l'ACV constitue la méthodologie de référence. Il s'agit d'une approche normalisée, dont les principes et les lignes directrices sont définis par la norme ISO 14040:2006 (Figure 1) [8]. L'ACV permet d'évaluer de manière systématique et multicritère les impacts environnementaux d'un produit ou d'un service tout au long de son cycle de vie, dans le but d'identifier les leviers d'amélioration potentiels.

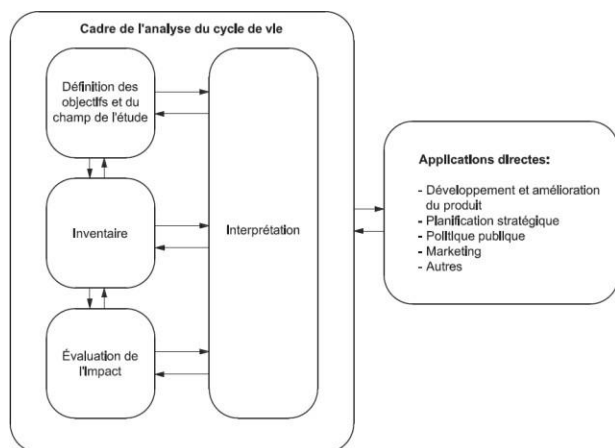


Figure 1 : Les phases d'une analyse de cycle de vie (ISO 14044, 2006)

La première étape de la démarche consiste à formuler clairement les objectifs de l'étude, à délimiter les frontières du système, et à définir l'unité fonctionnelle. Un inventaire des flux de matière et d'énergie (entrants et sortants) associés au système étudié est ensuite réalisé. La méthode recommande de prendre en compte l'ensemble des phases du cycle de vie, de l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie du produit, afin d'assurer une évaluation globale et cohérente des impacts environnementaux. Pour réaliser une ACV, plusieurs logiciels, bases de données ainsi que plusieurs méthodes de calcul sont disponibles, chacun pouvant utiliser différents indicateurs. Ainsi, pour un même système étudié, les résultats peuvent varier en fonction des outils et des méthodologies utilisés.

Dans le cadre de cette étude, 19 publications scientifiques portant sur l'analyse du cycle de vie (ACV) des piles à hydrogène ont été examinées (voir Figure 1), dans le but d'identifier les outils logiciels et les bases de données les plus fréquemment utilisés. Ces articles ont été sélectionnés sur la période 2012–2024.

Le premier graphique montre la répartition des outils d'ACV employés (figure 2). On observe une nette prédominance de SimaPro, utilisé dans 38 % des études. Les logiciels GaBi et OpenLCA sont également présents, représentant respectivement 25 % et 19 % des cas. Enfin, 19 % des publications n'ont pas précisé l'outil utilisé (N/A). Certains

logiciels, comme OpenLCA et Brightway2, sont disponibles en accès libre.

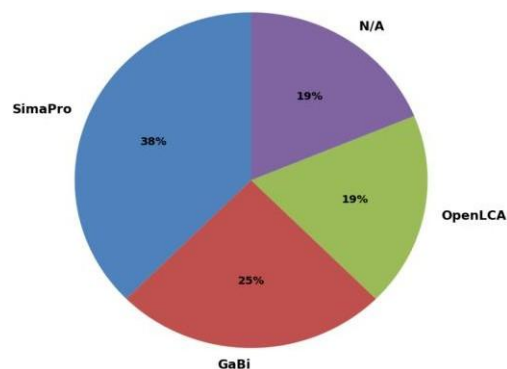


Figure 2 : Logiciels d'ACV utilisés dans la littérature

Bien que Brightway2 ne soit pas mentionné dans l'échantillon étudié, c'est l'outil qui a été utilisé dans notre étude car l'environnement Python qui lui est associé élargi grandement les possibilités de modélisation mais aussi la mise en commun de modèles par et pour la communauté.

Le deuxième graphique présente les bases de données associées à ces études (Figure 3). Ecoinvent est la base la plus utilisée (32 %), à égalité avec les publications qui ne précisent pas cette information. Sphera apparaît dans 21 % des articles, tandis que Greet est mentionnée dans 16 % des cas.

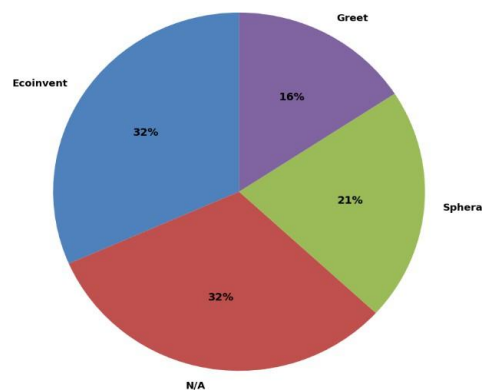


Figure 3 : Bases de données utilisées dans la littérature

Pour cette étude, la base de données Ecoinvent a été sélectionnée en raison de sa couverture sectorielle étendue, de la robustesse de sa méthodologie et de sa compatibilité directe avec Brightway2.

2.2 DEFINITION DU CHAMP DE L'ETUDE

❖ Unité fonctionnelle « UF »

L'unité fonctionnelle adoptée dans cette étude est un système hydrogène intégrant une pile à combustible PEMFC d'une

puissance de 48 kW. Ce choix se justifie par la disponibilité des données nécessaires à l'établissement de l'inventaire dans la littérature scientifique.

❖ Limites du système

Dans notre étude, nous nous concentrons sur l'ensemble du système de pile à hydrogène en considérant la phase de fabrication incluant l'extraction des matières premières ainsi que la phase d'utilisation, comme indiqué dans la Figure 4. Cette approche permet d'évaluer les impacts environnementaux liés à la production et au fonctionnement du système.

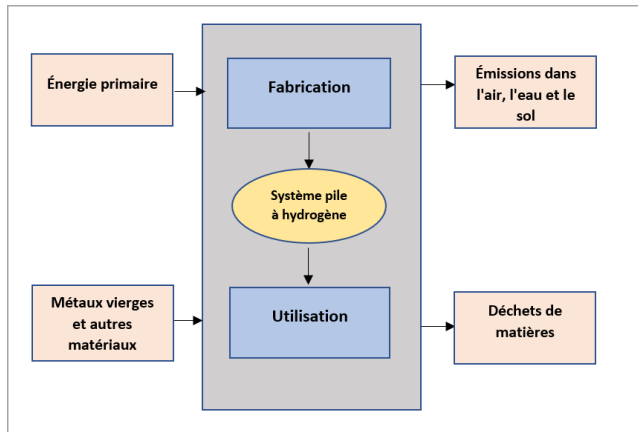


Figure 4 : Limites du notre système

3. REALISATION DE L'INVENTAIRE

❖ La phase de fabrication

La phase de fabrication comprend l'acquisition des matières premières, la production des composants, ainsi que l'énergie nécessaire à l'ensemble de ces processus.

Le système de pile à hydrogène se compose principalement du stack PEMFC (le cœur du système, constitué de cellules électrochimiques empilées), des auxiliaires nécessaires à son bon fonctionnement (tels que les pompes, compresseurs, humidificateurs, échangeurs thermiques et capteurs), ainsi que d'une batterie permettant de stocker l'énergie excédentaire ou de fournir un appoint en cas de forte demande énergétique.

Le stack PEMFC est lui-même constitué de plusieurs éléments clés : des plaques d'extrémité et raccords assurant l'étanchéité et la connexion des flux, des plaques bipolaires pour la distribution des gaz et la collecte du courant, et des joints d'étanchéité pour éviter les fuites et des assemblages membrane électrodes (AME).

La Figure 5 présente les principaux composants et sous-composants du système de pile à hydrogène.

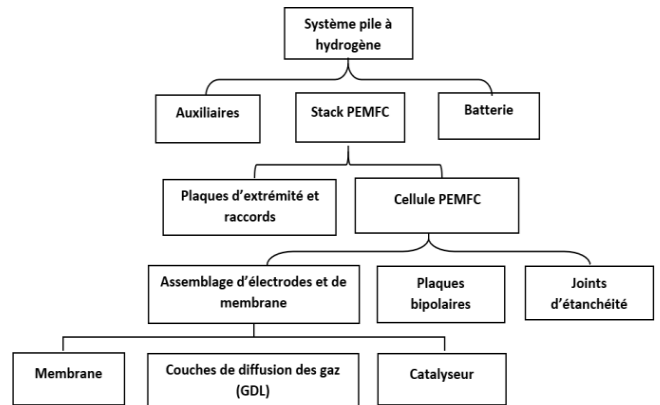


Figure 5: Les principaux composants et sous-composants inclus dans un système de pile à hydrogène

Pour réaliser l'inventaire, nous avons intégré l'ensemble des flux liés à la phase de fabrication du système pile, en incluant les types et quantités de matériaux ainsi que l'énergie consommée. Les données utilisées pour le système pile à hydrogène, hors stack, proviennent de l'article [9]. Grâce à une approche d'auto-engineering, les quantités ont été ajustées afin de correspondre aux spécificités de notre pile à combustible.

En ce qui concerne le stack, les flux considérés sont ceux d'un inventaire de référence [7], en conservant la même unité fonctionnelle une pile à combustible PEMFC de 48 kW pour assurer une comparaison pertinente.

Dans un premier temps, la base de données Ecoinvent 3.8 a été utilisée pour intégrer les flux entrants, notamment les matériaux. Ce choix s'explique par la large couverture de données environnementales qu'offre cette base, ce qui facilite l'évaluation des impacts. Néanmoins, certaines données spécifiques requises pour notre inventaire n'étaient pas disponibles.

Pour pallier ces limitations, le logiciel EIME [10] et sa base de données associée CODDE ont été mobilisés afin de compléter les informations manquantes, comme l'illustre le tableau 1.

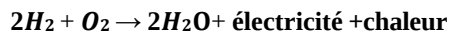
Tableau 1 : Comparaison des outils utilisés pour les deux inventaires

Matériau	Logiciel / bases de données utilisées dans notre inventaire	Logiciel / bases de données utilisées dans l'inventaire de référence
Fibres de tissu de carbone	EIME/CODDE	Gabi/Sphera
Platine	EIME/CODDE	Gabi/Ecoinvent
PFSA (Nafion)	Brightway2/Ecoinvent	Gabi/Ecoinvent
Thermoplastique renforcé de verre	Brightway2/Ecoinvent	Gabi/sphera
Acier inoxydable	Brightway2/Ecoinvent	Gabi/Ecoinvent
Électricité	Brightway2/Ecoinvent	Gabi/Ecoinvent
Silicone	Brightway2/ Ecoinvent	Gabi/sphera
Film PET avec colle	Brightway2/ Ecoinvent	Gabi/sphera
Noir de carbone	Brightway2/ Ecoinvent	Gabi/Ecoinvent
Cuivre	Brightway2/ Ecoinvent	Gabi/Ecoinvent
Produit en acier	Brightway2/ Ecoinvent	Gabi/sphera
Acier au chrome	Brightway2/ Ecoinvent	Gabi/Ecoinvent
Eau	Brightway2/ Ecoinvent	Gabi/sphera
Alcool	Brightway2/ Ecoinvent	Gabi/sphera

Cet inventaire est principalement basé sur les matériaux utilisés ainsi que sur les quantités employées lors de la phase de fabrication. Cependant, il reste difficile d'établir des procédés précis et standardisés, car les méthodes de production varient considérablement d'une entreprise à une autre.

3.1 LA PHASE D'UTILISATION

Dans le cadre de cette étude, nous considérons une PEMFC d'une puissance électrique nominale de 48 kW. Le rendement électrique retenu est de 55 %, valeur représentative des performances moyennes observées pour les PEMFC utilisées dans le secteur du transport. La durée de vie considérée pour le système est de 5 000 heures. La réaction électrochimique globale de la PEMFC s'écrit :



Les flux d'entrée et de sortie pris en compte dans notre étude lors de la phase d'utilisation sont illustrés dans la Figure 6

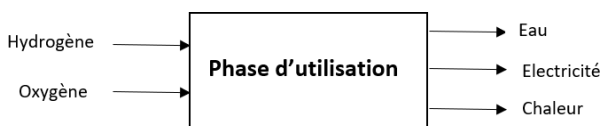


Figure 6 : : Schéma des flux entrants et sortants lors de la phase d'utilisation d'une pile à combustible PEMFC

L'énergie totale libérée par l'oxydation du dihydrogène est donnée par l'enthalpie standard de réaction (ΔH°) et s'élève à 286 KJ/mol. Sur cette valeur, 237 KJ/mol correspondent à l'énergie libre de Gibbs (ΔG°) convertible en électricité, tandis que les 49 kJ/mol restants sont dissipés sous forme de chaleur.

❖ Calcul de la consommation d'hydrogène

$$\text{Consommation } kg/h = \frac{\text{puissance}(kW)}{PCI \text{ kWh/kg} \times \text{Rendement}}$$

Dans cette équation, le PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur) de l'hydrogène est de 33,33 kWh/kg, et le rendement électrique du système est supposé être de 55 %. En appliquant cette formule pour une production de 48 kW, on obtient :

$$\text{Consommation}(kg/h) = \frac{48}{33.33 \times 0.55} \approx 2.62 \text{ kg/h}$$

Pour une durée de vie de **5 000 heures**, la quantité totale d'hydrogène consommée est estimée à **13 100 kg**,

4. RESULTATS ET DISCUSSION

4.1 Inventaire du système pile à combustible en phase de fabrication

Après avoir saisi tous les flux nécessaires à la réalisation de l'inventaire pour la phase de fabrication, les résultats ont été visualisés à travers la figure ci-dessous, illustrant les contributions de chaque sous-système au changement climatique (Figure 7).

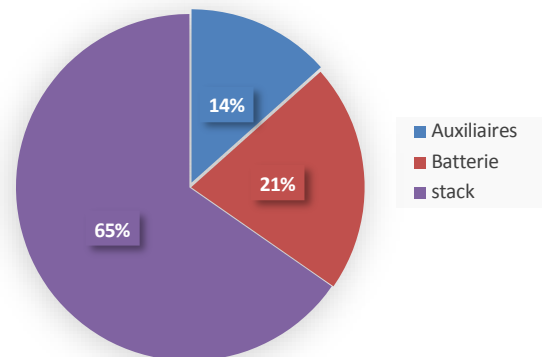


Figure 7 : Répartition des contributions au changement climatique par composant du système pile à combustible

L'analyse révèle que la pile à combustible (stack) est le principal contributeur aux impacts environnementaux, représentant 65 % de l'impact total. Cette contribution élevée s'explique par la présence de matériaux critiques, notamment le platine, et par les procédés de fabrication spécifiques. La batterie arrive en deuxième position avec 21 %, en raison de l'utilisation de métaux spécifiques tels que le lithium. Enfin, les systèmes auxiliaires (refroidissement, compression, gestion de l'air et de l'humidité) représentent 14 % des

impacts, principalement dus à leur complexité et aux pertes énergétiques liées à leur fonctionnement.

4.2 Analyse comparative de l'inventaire du stack en phase de fabrication

Notre analyse indique que la pile à combustible génère une consommation notable de ressources énergétiques, s'élevant à 4 000 kWh (1400 MJ), ce qui témoigne d'une forte dépendance énergétique, avec une augmentation de **4%** par rapport à l'autre inventaire cité en [7]. Cette technologie est en outre associée à des émissions significatives de CO₂, avec un potentiel de réchauffement global estimé à 683 CO₂ équivalents. Ces émissions s'expliquent par la production d'hydrogène (surtout par reformage du gaz naturel) et les procédés de fabrication des matériaux, comme le platine et les membranes, qui reposent sur des énergies carbonées, avec un écart important d'une diminution de **41 %** (figure 8).

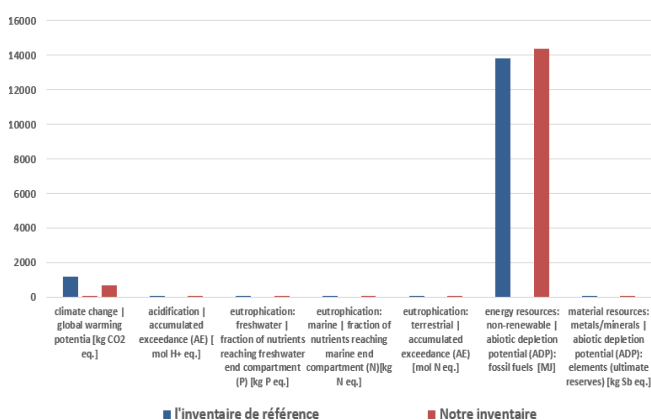


Figure 8 : Comparaison de nos résultats avec un inventaire de référence

Afin d'identifier le composant de la PEMFC ayant l'impact le plus significatif sur le changement climatique, une analyse individuelle de chacun des composants a été réalisée.

Les résultats obtenus sont décrits ci-après (Figure 9).

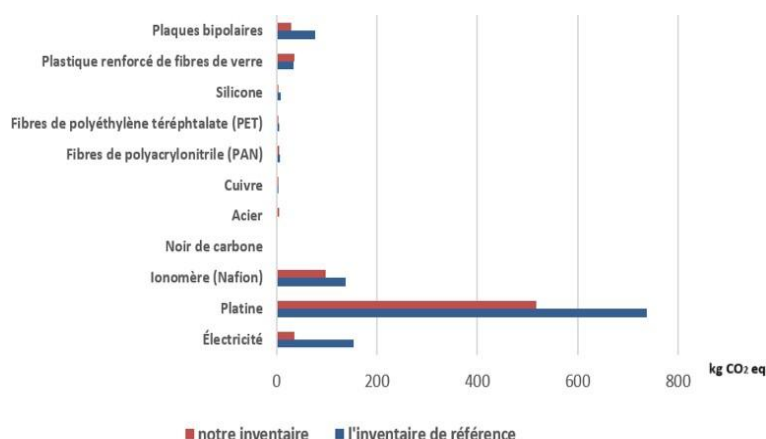


Figure 9 : Contribution de chaque composant du PEMFC au changement climatique

Le platine a l'impact le plus important puisqu'il nécessite des processus de fabrication complexes et énergivores. Puis, il y a le Nafion et l'électricité. Cependant, il existe toujours une variation entre les résultats des deux inventaires, pouvant atteindre plus de **50 %** pour l'écart lié à l'électricité.

Les écarts observés entre les résultats peuvent être attribués aux limites inhérentes à la méthode d'analyse de cycle de vie (ACV), qui influencent directement la robustesse des conclusions environnementales.

- Dépendance aux données d'inventaire :

Les résultats d'une ACV sont fortement conditionnés par les bases de données utilisées (Ecoinvent, GaBi, Sphera, etc.), les facteurs d'émission qui y sont associés, ainsi que les hypothèses géographiques, temporelles ou technologiques qui sous-tendent les modèles. Ces choix peuvent induire des variations notables dans les indicateurs environnementaux.

- Modélisation partielle ou générique de certains procédés :

Pour des matériaux complexes tels que le Nafion ou le platine, les chaînes de production sont parfois modélisées à l'aide de données moyennes ou représentatives, qui ne reflètent pas nécessairement les procédés spécifiques à un fabricant ou à une région. Cela engendre des incertitudes importantes dans l'estimation des impacts environnementaux.

- Influence du mix électrique :

Le profil environnemental de l'électricité utilisée au cours du cycle de vie qu'elle soit d'origine fossile, renouvelable ou issue d'un mix national joue un rôle déterminant dans l'intensité carbone des procédés, en particulier pour ceux à forte consommation énergétique. Cela explique notamment les écarts marqués observés dans la contribution de l'électricité entre les inventaires comparés.

4.3 Inventaire du stack de pile à combustible lors de la phase d'utilisation

La phase d'utilisation d'une pile à combustible dépend fortement de l'hydrogène utilisé, tant en termes de source que de mode de production, ainsi que de l'électricité consommée pour faire fonctionner les différents systèmes auxiliaires. En effet, l'impact environnemental de cette phase varie largement selon que l'hydrogène est produit à partir de sources fossiles, renouvelables ou par électrolyse alimentée par un mix électrique plus ou moins carboné.

Selon l'étude analyse du cycle de vie relative à l'Hydrogène publiée par l'ADEME en 2020, la quantité d'émissions de gaz à effet de serre associée à la production d'hydrogène est estimée à 15 kg CO₂ eq/kg H₂ pour l'hydrogène gris (produit à partir de gaz naturel), contre environ 2 kg CO₂ eq/kg H₂ pour l'hydrogène vert (produit par électrolyse à partir d'électricité renouvelable) [11]. Ainsi, pour une durée de vie de 5 000 heures, la Figure 10 illustre l'impact climatique associé à ces deux filières de production.

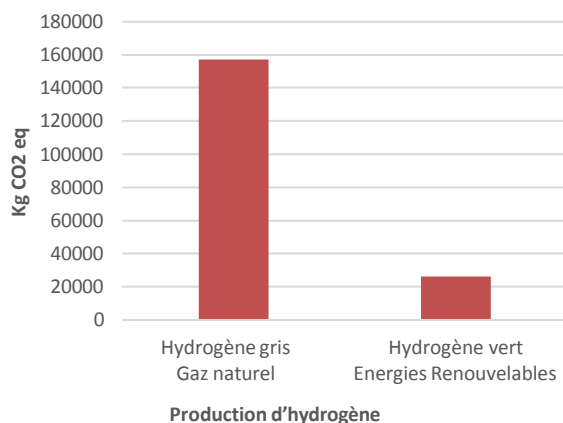


Figure 10 : Émissions totales de CO₂ eq. liées à l'hydrogène consommé par la PEMFC sur l'ensemble de sa durée de vie

Si l'on compare les émissions de CO₂ selon la phase du cycle de vie, on remarque que la phase d'utilisation domine largement l'empreinte carbone d'un système PEMFC, en particulier lorsque l'hydrogène utilisé est d'origine fossile.

En effet, alors que la fabrication de la pile génère environ 20 000 kg CO₂ eq., l'utilisation avec de l'hydrogène gris atteint près de 157 000 kg CO₂ eq, contre seulement 26 000 kg CO₂ eq avec de l'hydrogène vert. Ces résultats mettent en évidence l'importance du choix de la source d'hydrogène, qui peut multiplier par plus de cinq les émissions totales. Ainsi, pour que les piles à combustible contribuent réellement à la transition énergétique, leur intégration doit impérativement s'accompagner d'une production d'hydrogène bas-carbone (Figure 11).

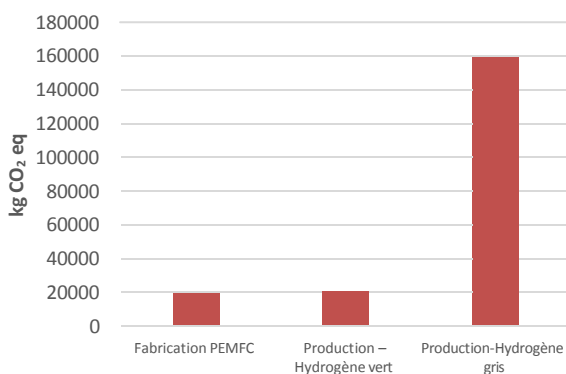


Figure 11 : Comparaison des émissions de CO₂ eq. entre la phase de fabrication d'une PEMFC et sa phase d'utilisation selon le type d'hydrogène (gris vs. vert)

Par ailleurs, la durée de vie de la pile à combustible joue un rôle crucial dans l'évaluation de ses impacts environnementaux. Les performances de la pile peuvent se dégrader avec le temps en raison de différents phénomènes d'usure et de vieillissement des matériaux constitutifs (par exemple : membrane, électrodes, catalyseurs). Cette

dégradation affecte l'efficacité de conversion et peut entraîner une consommation accrue d'hydrogène pour un même service rendu, augmentant ainsi l'impact environnemental global. C'est pourquoi il est essentiel d'intégrer l'aspect du vieillissement dans les études d'analyse du cycle de vie, afin de mieux refléter les performances réelles des systèmes en conditions d'usage.

5. CONCLUSIONS

Cette étude met en évidence les principales contributions environnementales liées à la phase de fabrication d'un système pile à hydrogène de 48 kW. En ce qui concerne le stack, la comparaison de notre inventaire avec celui de l'étude [7], bien que fondée sur une unité fonctionnelle similaire, révèle des divergences significatives dues aux choix de logiciels et de bases de données. Ces écarts mettent en lumière la nécessité de standardiser les méthodologies en analyse de cycle de vie pour garantir une meilleure comparabilité des résultats. Ce travail constitue également une base solide pour l'évaluation de la phase d'utilisation, dont la complexité devra être rigoureusement prise en compte. Enfin, l'intégration de la phase de vieillissement, identifiée comme la prochaine étape de cette recherche, s'avère indispensable pour affiner les évaluations environnementales et accompagner le développement de systèmes PEMFC plus durables.

6. REFERENCES

- [1] Haut Conseil pour le Climat, « Résumé du rapport annuel », septembre 2023.
- [2] « Émissions de gaz à effet de serre par activité | Insee ». Consulté le: 16 December 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2015759>
- [3] « EUROPEAN UNION CO2 STANDARDS FOR NEW PASSENGER CARS AND VANS ». Consulté le: 14 December 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/12/eu-co2-FS6-jul2021.pdf>
- [4] Simons, A., & Bauer, C. (2015). A life-cycle perspective on automotive fuel cells. *Journal of Cleaner Production*, 123, 45-56.
- [5] Stropnik, T., et al. (2019). Life cycle assessment of a 1 kW PEMFC system.
- [6] Arrigoni, A. (2022). Greenhouse gas implications of extending the service life of PEM fuel cells for automotive applications: A life cycle assessment. *Applied Energy*, 305, 117890.
- [7] Mori, M, et al (2023). Life cycle sustainability assessment of a proton exchange membrane fuel cell technology for ecodesign purposes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(99), 39673-39689.
- [8] AFNOR, « NF EN ISO 14040 : Management environnemental, Analyse du cycle de vie », oct. 2006.
- [9] P. Ahmadi, S. H. Torabi, H. Afsaneh, Y. Sadegheih, H. Ganjehsarabi, and M. Ashjaee, The effects of driving patterns and PEM fuel cell degradation on the lifecycle assessment of hydrogen fuel cell vehicles, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 5, pp. 3595–3608, 2020.
- [10] EIME présentation - Logiciel ACV et Eco-conception - Bureau Veritas CODDE
- [11] ADEME, « Analyse du Cycle de Vie relative à l'Hydrogène », 2020. Disponible sur : <https://bibliothèque.ademe.fr>