

Analyse de Cycle de Vie d'un abaisseur de tension DC-DC et piste d'écoconception

Ndeye Fatou DIOP¹ - David MALEC²

Édité le
11/09/2024

¹ Étudiante en dernière année de Master EEA à l'Université Paul Sabatier - Toulouse III, France

² Professeur en Génie électrique à l'Université Paul Sabatier - Toulouse III, France, Membre senior SEE

Cette ressource fait partie du N° 113 de La Revue 3EI du 3^{ème} trimestre 2024.

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) appliquée aux convertisseurs de puissance constitue un outil incontournable pour évaluer leur impact environnemental. Cet article repose sur l'utilisation d'un logiciel qui permet de réaliser une ACV exhaustive de deux types de convertisseurs statiques DC-DC abaisseur de tension : un abaisseur à découpage et un abaisseur linéaire. L'objectif majeur de l'analyse de l'ACV est de repenser la conception d'un objet, d'un service, d'un système afin de réduire significativement son empreinte environnementale, tout en conservant, voire en améliorant, sa performance. Dans cet article, nous comparerons l'impact environnemental de ces deux convertisseurs et identifierons une piste d'éco-conception. Cette étude peut être déclinée sous forme d'un Bureau d'Études/Projet/Stage permettant aux étudiants du domaine EEA de s'initier à l'ACV et à l'éco-conception de convertisseurs étudiés en cours uniquement sur le plan de leurs performances électriques.

1 - Introduction

L'impératif de développement au sein de nos sociétés est le moteur principal de l'industrialisation contemporaine. Toutefois, malgré les avantages indéniables en termes d'amélioration du niveau de vie, cette industrialisation est à l'origine de la détérioration de notre environnement, voire de notre santé. Les conséquences, telles que la pollution, le réchauffement climatique, la destruction d'écosystèmes et l'épuisement des ressources naturelles nous poussent à agir de toute urgence pour atténuer ces dommages. La manière dont nous produisons et consommons de l'énergie est appelée à évoluer et l'éco-conception se profile comme l'une des stratégies essentielles pour y parvenir. Elle offre un moyen de concilier les impératifs de développement avec la préservation de l'environnement en repensant la conception des produits et des systèmes pour minimiser leur impact écologique tout en répondant aux besoins de nos sociétés en constante évolution. Dans cette étude, nous nous focaliserons sur l'impact environnemental de deux convertisseurs statiques en vue de les comparer et de dégager une piste d'écoconception. Cette démarche vise à promouvoir une utilisation plus durable des convertisseurs statiques de puissance.

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est une méthodologie qui nécessite des outils spécialisés pour évaluer de manière exhaustive les impacts environnementaux des produits ou systèmes. Parmi ces outils, nous pouvons citer SimaPro®, EIME®, GaBi®, Eco-Design®, OpenLCA® etc. Ils permettent de quantifier des indicateurs environnementaux : épuisement des ressources naturelles, pollution de l'eau, de l'air, du sol, consommation d'énergie et d'eau, réchauffement climatique, etc., à partir de méthodes de calcul et de bases de données (Ecoinvent, CODDE, Sphera, Eprel, Nexus, etc.).

Dans notre étude, nous avons employé le logiciel EIME® (Environmental Improvement Made Easy) qui a la particularité de comporter une riche bibliothèque de composants électriques et électroniques. Néanmoins, ce type d'étude peut être naturellement réalisée avec un autre logiciel.

L'objectif principal de notre projet est de comparer l'empreinte environnementale de deux convertisseurs de puissance en s'appuyant sur leurs ACV complètes.

Pour réussir pleinement notre projet, nous avons adopté la démarche suivante :

- Rappel du schéma électrique des deux convertisseurs ;
- Inventaire de tous leurs constituants ;
- Définition d'un scénario d'utilisation incluant la fin de vie.

Cet article pourra servir d'exemple à celles et ceux qui envisagent de se lancer dans la définition de projets étudiants similaires.

2 - Présentation d'un logiciel d'Écoconception

Un logiciel d'écoconception est un outil essentiel pour évaluer, améliorer et optimiser l'impact environnemental des produits, processus ou systèmes. Pour un produit, il offre en général les capacités suivantes :

- Analyse du Cycle de Vie (ACV) : elle permet de réaliser des évaluations complètes de l'ensemble du cycle de vie d'un produit, en prenant en compte les étapes de la fabrication, de l'installation, de l'utilisation et de la fin de vie ;
- Évaluation des impacts environnementaux : Il quantifie les impacts sur l'environnement, tels que les émissions de gaz à effet de serre, la consommation d'énergie, la production de déchets, la pollution de l'air et de l'eau, etc. ;
- Conception écoresponsable : Il aide à intégrer des pratiques et des matériaux respectueux de l'environnement dans la conception de produits, en favorisant des choix tels que l'utilisation de matériaux recyclables ou recyclés, l'optimisation de l'efficacité énergétique, et la réduction des déchets ;
- Analyse comparative : Il permet de comparer différents produits afin d'identifier le moins impactant mais également de vérifier les effets positifs d'un produit issu d'une démarche d'écoconception.

2.1 - Interface

Le logiciel EIME® que nous avons utilisé met à disposition une bibliothèque contenant une base de données essentielle pour la conception de produits. Il permet également de renseigner toutes les phases du cycle de vie, offre une variété de set d'indicateurs environnementaux et fournit des résultats sous forme numérique et graphique pour l'étude réalisée. La Figure 1 ci-dessous illustre l'interface du logiciel.

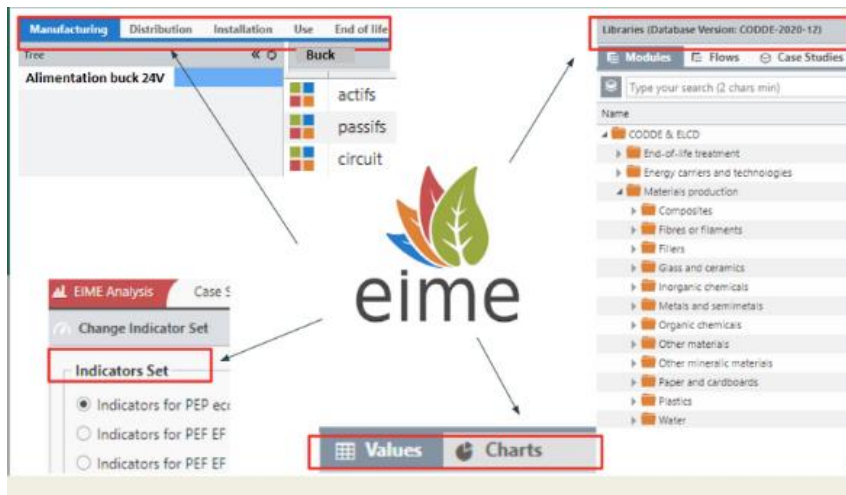


Figure 1 : Interface du logiciel EIME®

2.2 - Phases du cycle de vie

Le cycle de vie comporte cinq phases : la fabrication, la distribution, l'installation, l'utilisation et la fin de vie. Dans chaque phase, il suffira de renseigner les données relatives au cahier des charges.

Analyse du cycle de vie (ACV)

L'ACV est l'outil le plus abouti en matière d'évaluation globale et multicritère des impacts environnementaux. Cette méthode normalisée (ISO 14040 et 14044) permet de mesurer les effets quantifiables de produits ou de services sur l'environnement. L'ACV recense et quantifie, tout au long de la vie des produits, les flux physiques de matière et d'énergie associés aux activités humaines. Elle en évalue les impacts potentiels puis interprète les résultats obtenus en fonction de ses objectifs initiaux. Elle est fondée sur une double approche :

- Une approche cycle de vie : qu'il s'agisse d'un bien, d'un service, voire d'un procédé. Toutes les étapes du cycle de vie sont prises en compte pour l'inventaire des flux du "berceau à la tombe" : extraction des matières premières énergétiques et non énergétiques nécessaires à la fabrication du produit, phase de distribution incluant le mode de transport (aérien, maritime, terrestre), l'installation, l'utilisation consommant de l'énergie et/ou des flux et les opérations de maintenance si besoin ainsi que la collecte et l'élimination vers les filières de fin de vie (cf. figure 2).

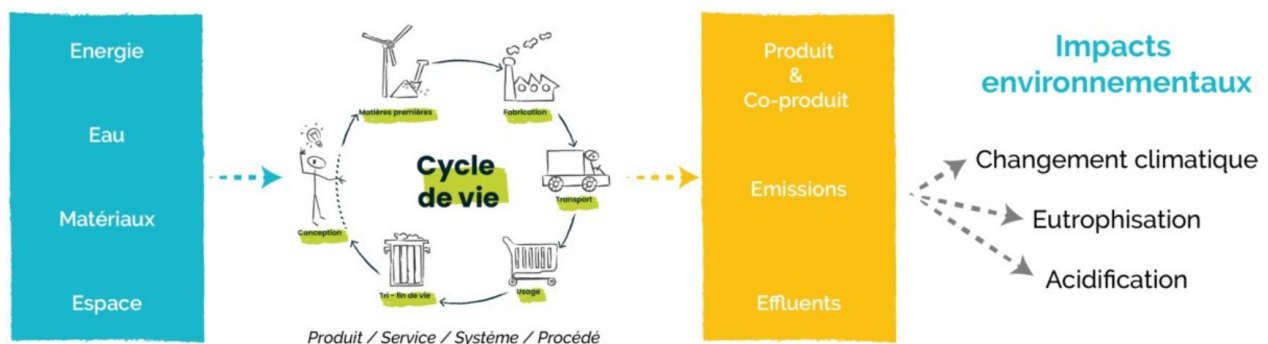


Figure 2 : Différentes phases d'une ACV [1]

- Une approche multicritère : une ACV se base sur plusieurs critères d'analyse de flux entrants et sortants. Un "flux" entrant correspond à tout ce qui entre (en bleu dans la Figure 2) et tout ce qui sort (en jaune dans la Figure 2). Parmi les flux entrants, on trouve, par exemple, ceux des matières et de l'énergie : ressources en fer, eau, pétrole, gaz. Quant aux flux

sortants, ils peuvent correspondre aux déchets, émissions gazeuses, liquides rejetés, etc. [2].

La collecte des informations relatives aux flux est une étape importante de l'ACV. Ils sont quantifiés à chaque étape du cycle de vie et correspondent à des indicateurs d'impacts potentiels sur l'environnement.

Dans notre étude réalisée avec EIME®-version University, nous avons évalué les indicateurs suivants [2] :

- A : Acidification potential for soil and water (potentiel d'acidification du sol et de l'eau en kg SO₂ équivalent) ;
- AP : Air pollution (pollution de l'air en m³) ;
- ADPe : Abiotic Depletion for non-fossil resources potential (déplétion abiotique pour des ressources non fossiles potentielles en kg S_b équivalent) ;
- ADPf : Abiotic Depletion for fossil resources potential (déplétion abiotique pour des ressources fossiles potentielles en mégajoules) ;
- EP : Eutrophication potential (potentiel d'eutrophisation en kg PO₄³⁻ équivalent) ;
- GWP : Global Warming Potential (potentiel de réchauffement climatique en kg CO₂ équivalent) ;
- ODP : Ozone layer Depletion Potential (Potentiel de Déplétion de la Couche d'Ozone en kg CCL₃F équivalent) ;
- POCP : Photochemical Oxidation (Oxydation Photochimique en kg C₂H₄ équivalent) ;
- WP : Water pollution (pollution de l'eau en m³).

Il existe différentes manières d'exploiter une ACV pour un objet : en divisant l'objet en sous-ensembles ou en identifiant le matériau le plus impactant ou en identifiant la phase la plus impactante, ce que nous expliciterons dans la suite.

2.3 - Exemple de rentrée des différents constituants des alimentations

La figure 3 ci-dessous montre une capture d'écran des constituants saisis dans l'interface du logiciel que nous avons utilisé.

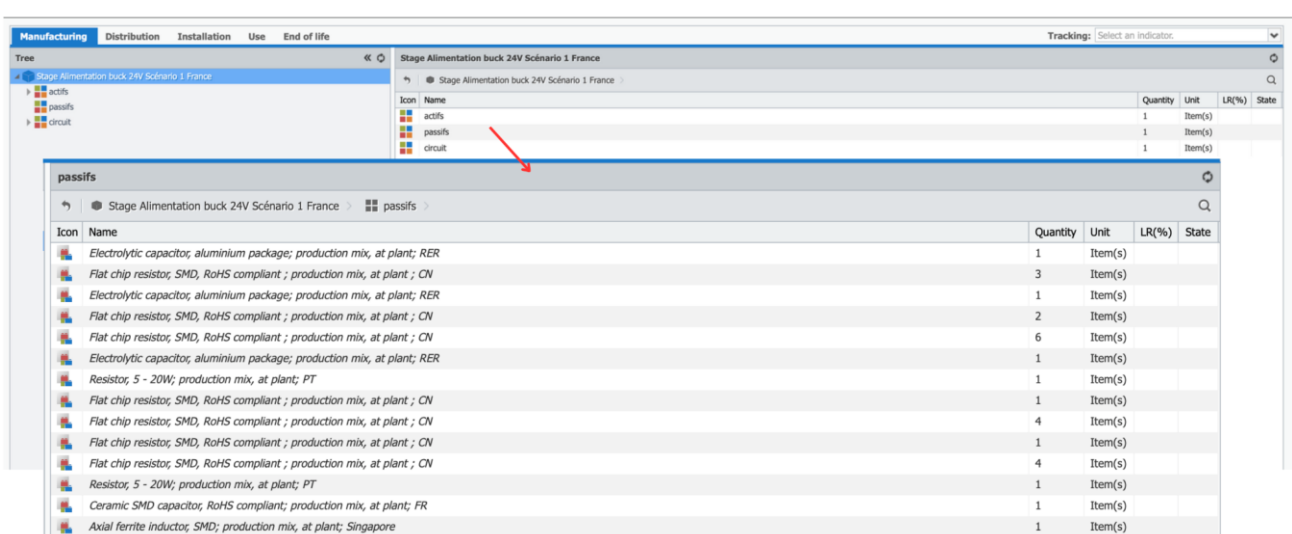


Figure 3 : Saisie des différents constituants dans l'interface du logiciel d'ACV

Trois cas de figure se présentent pour les constituants :

- Ils sont déjà répertoriés dans la base de données, dans ce cas ils sont directement utilisés ;
- Ils existent mais il est nécessaire d'effectuer une mise à l'échelle. Par exemple pour les condensateurs MKP, le composant modélisé rentre dans la gamme 10 nF-1 μ F. Il a été modélisé pour une masse donnée, il suffit donc d'utiliser un facteur d'échelle ;
- Ils n'existent pas dans la base de données et dans ce cas il faudra les créer (matériaux et process de fabrication).

3 - Etude des deux alimentations DC-DC

3.1 - Cahier des charges

Afin d'étudier nos convertisseurs statiques, il est primordial de définir un cahier des charges.

Nous nous sommes focalisés sur l'étude d'une alimentation de laboratoire multi-sorties (5, 9, 12, 15 et 24V) alimentée par une source continue de 30V et de courant nominal de sortie de 5A avec protection en courant. Cette alimentation sera montée dans un boîtier en ABS.

Deux scénarii d'utilisation ont été analysés :

- Scénario 1 : fonctionnement de l'alimentation 8h/jour soit 4h en pleine charge et 4h en veille.
- Scénario 2 : fonctionnement de l'alimentation 8h/jour soit 7h et 50 min en veille et 10 min en pleine charge.

Dans les deux scénarii, l'alimentation est à l'arrêt pendant 16h.

Le transport sera réalisé en camion (17t - taux de charge : 100% aller/50% retour) entre le site de fabrication et l'utilisation, la distance est de 780 km (Paris-Toulouse). Les alimentations seront conditionnées dans un emballage carton.

L'alimentation sera utilisée en France, nous utiliserons donc le modèle énergétique français.

Le scénario de fin de vie considère :

- Un recyclage à 100% des matières plastiques ;
- Un recyclage à 100% du radiateur aluminium ;
- Une incinération du carton d'emballage sans récupération d'énergie ;
- Un traitement du circuit imprimé avec récupération des métaux précieux ;
- Un recyclage matière des composants électroniques.

Dans tous les cas, nous avons appliqué la méthode des stocks : ne sont pris en compte dans notre ACV que le transport vers le site de traitement et l'enfouissement ou l'incinération sans récupération d'énergie des déchets. Le recyclage matière, l'incinération avec récupération d'énergie et la réutilisation de pièces seront pris en compte dans l'ACV du produit qui emploiera ces déchets valorisables.

Précisons ici que notre étude ne concerne que les convertisseurs sans y inclure leurs charges ni leurs sources continues d'entrée.

3.2 - Etude de l'alimentation de type "linéaire"

3.2.1 - Schéma structurel de l'ancienne génération d'alimentation stabilisée

Le schéma électrique d'un tel convertisseur ancienne génération est donné dans la Figure 4 :

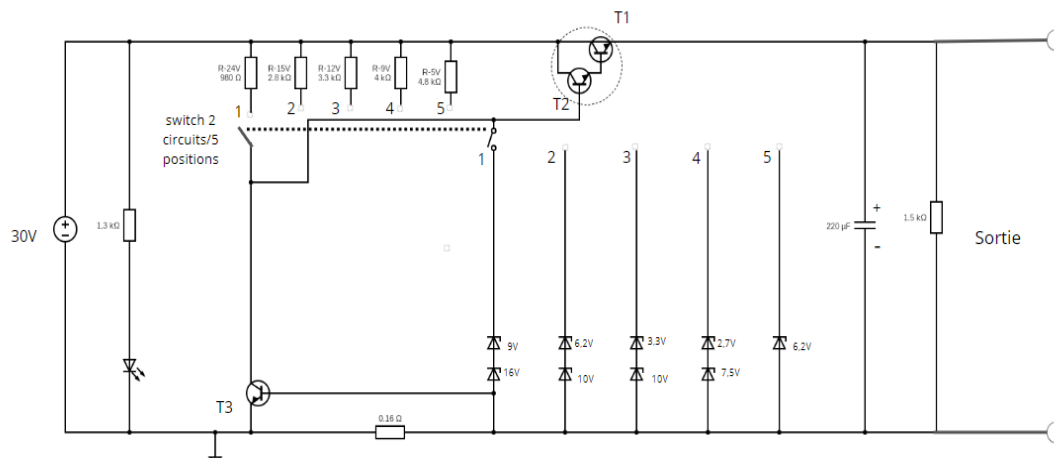


Figure 4 : Schéma structurel d'une alimentation stabilisée DC-DC de type "linéaire"

Dans ce circuit, la tension de sortie V_s est égale à la différence entre les tensions de Zener V_z et les chutes de tension V_{be} des transistors du Darlington. En commutant sur les différentes zener, il est possible de régler la valeur de la tension de sortie V_s (exemple : lorsque le commutateur est connecté sur la zener de 6,2V, la tension de sortie vaut $6,2 - 0,6 - 0,6 = 5V$). Dans la mesure où le Darlington (T1-T2) possède un gain en courant total important (qqz 1000), la polarisation des zener ne sera pas modifiée, de telle sorte que la tension de sortie ne dépendra pas du courant de charge. Il n'est donc pas nécessaire dans ce montage de rajouter des composants pour la régulation de tension. Le transistor T3 assure la protection en courant pour court-circuiter la(z) zener(s) en service en cas de surintensité.

De manière à introduire les pertes du convertisseur dans nos scénarii de fonctionnement, il est nécessaire de les identifier et de les calculer dans le schéma ci-dessus : résistances, zeners et transistors. Notons que dans ce montage les pertes les plus importantes en mode "actif" proviennent du ballast T1. Par exemple, pour une tension de sortie de 5V et 5A en sortie, les pertes dans T1 valent : $(30-5) \times 5 = 125W$, ce qui est très élevé; les pertes totales actives étant estimées à environ 131W. Ces pertes vont consommer de l'énergie électrique perdue pendant la phase d'utilisation de l'alimentation. De surcroît, la taille du radiateur en aluminium qui dépend de la puissance à dissiper sera importante, ce qui augmentera l'impact de la phase de fabrication.

Pour le mode Standby, les pertes sont estimées à 0,75W.

Pour un montage existant, il est possible d'évaluer les pertes (modes actif et standby) sans les calculer mais simplement en les déduisant des mesures de puissances à l'entrée et à la sortie.

3.2.2 - ACV par phases

- Scénario 1

Les valeurs des indicateurs environnementaux issus du logiciel d'ACV est donné dans les Tableaux 1 et 2 ci-dessous respectivement pour les tensions de sortie de 24V et de 5V correspondants respectivement aux bargraphes des Figures 5-a et 5-b.

	Manufacturing	Distribution	Installation	Use	End of life	Sum
A for PEP (kg SO2 eq.)	5.29e-3	3.18e-4	0.00e+0	1.09e-1	1.07e-3	1.15e-1
ADPe for EN15804 (kg antimony eq.)	3.26e-4	2.07e-7	0.00e+0	1.43e-5	9.55e-9	3.40e-4
ADPf for EN15804 (MJ)	5.88e+1	2.18e+0	0.00e+0	3.36e+2	2.22e+0	3.99e+2
AP for DHUP (m³)	1.04e+3	1.76e+1	0.00e+0	9.74e+2	9.76e+0	2.04e+3
EP for EN15804 (kg PO4 ³⁻ eq.)	1.56e-3	9.22e-5	0.00e+0	9.90e-3	1.67e-4	1.17e-2
GWP for EN15804 (kg CO2 eq.)	6.37e+0	1.69e-1	0.00e+0	2.92e+1	2.10e-1	3.60e+1
ODP for EN15804 (kg CCL3F eq.)	1.78e-6	1.22e-7	0.00e+0	4.17e-5	5.93e-8	4.37e-5
POCP for EN15804 (kg ethylene eq.)	1.01e-3	1.06e-5	0.00e+0	6.29e-3	5.08e-5	7.36e-3
WP for DHUP (m³)	3.20e+2	1.51e+1	0.00e+0	1.48e+3	4.16e+1	1.86e+3

Tableau 1 : Indicateurs environnementaux de l'alimentation linéaire pour 24V-5A en sortie (scénario 1)

Dans notre étude la phase "installation" de l'alimentation n'a pas d'impact mais celle-ci peut être prise en compte lorsqu'il y a consommation de fluide, d'énergie électrique ou de matériel lors de l'installation de l'équipement.

Le bargraphe par phases du cycle de vie correspondant est illustré sur la Figure 5-a suivante :

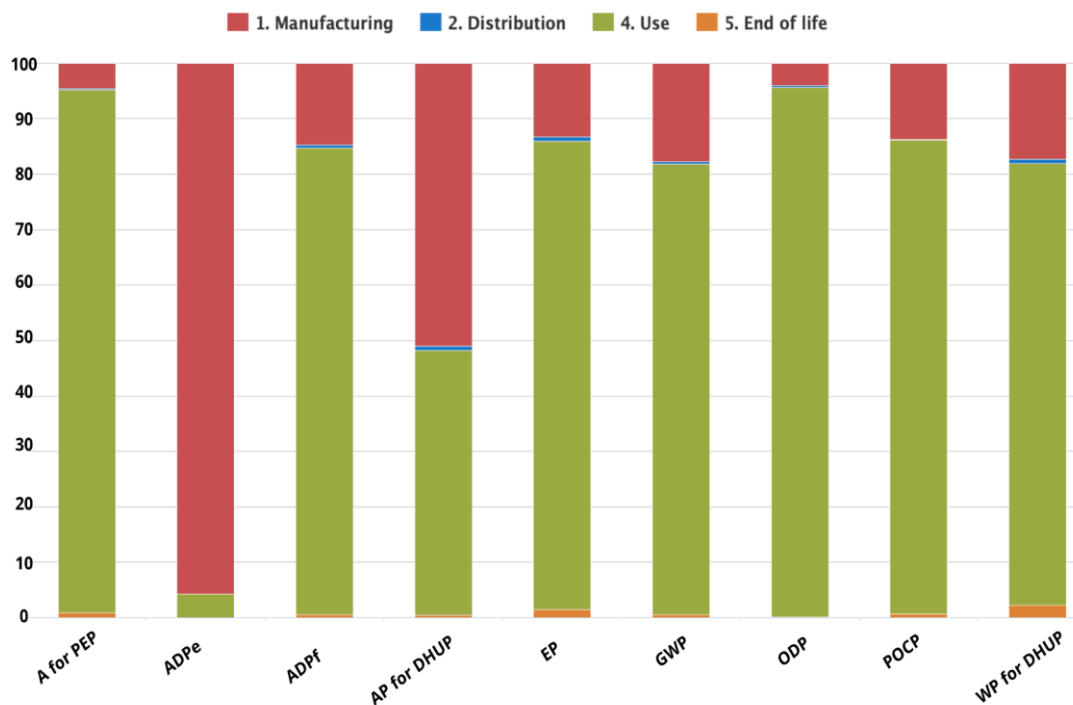


Figure 5-a : Bargraphe de l'alimentation linéaire pour 24V-5A en sortie (scénario 1)

	Manufacturing	Distribution	Use	End of life	Sum
A for PEP (kg SO ₂ eq.)	5.29e-3	3.18e-4	3.89e-1	1.07e-3	3.96e-1
ADPe for EN15804 (kg antimony eq.)	3.26e-4	2.07e-7	5.11e-5	9.55e-9	3.77e-4
ADPf for EN15804 (MJ)	5.88e+1	2.18e+0	1.20e+3	2.22e+0	1.27e+3
AP for DHUP (m ³)	1.04e+3	1.76e+1	3.49e+3	9.76e+0	4.56e+3
EP for EN15804 (kg PO ₄ ³⁻ eq.)	1.56e-3	9.22e-5	3.55e-2	1.67e-4	3.73e-2
GWP for EN15804 (kg CO ₂ eq.)	6.37e+0	1.69e-1	1.05e+2	2.10e-1	1.11e+2
ODP for EN15804 (kg CCL ₃ F eq.)	1.78e-6	1.22e-7	1.50e-4	5.93e-8	1.52e-4
POCP for EN15804 (kg ethylene eq.)	1.01e-3	1.06e-5	2.25e-2	5.08e-5	2.36e-2
WP for DHUP (m ³)	3.20e+2	1.51e+1	5.30e+3	4.16e+1	5.68e+3

Tableau 2 : Indicateurs environnementaux de l'alimentation linéaire pour 5V-5A en sortie (scénario 1)

Le bargraphe correspondant est illustré sur la Figure 6-b suivante :

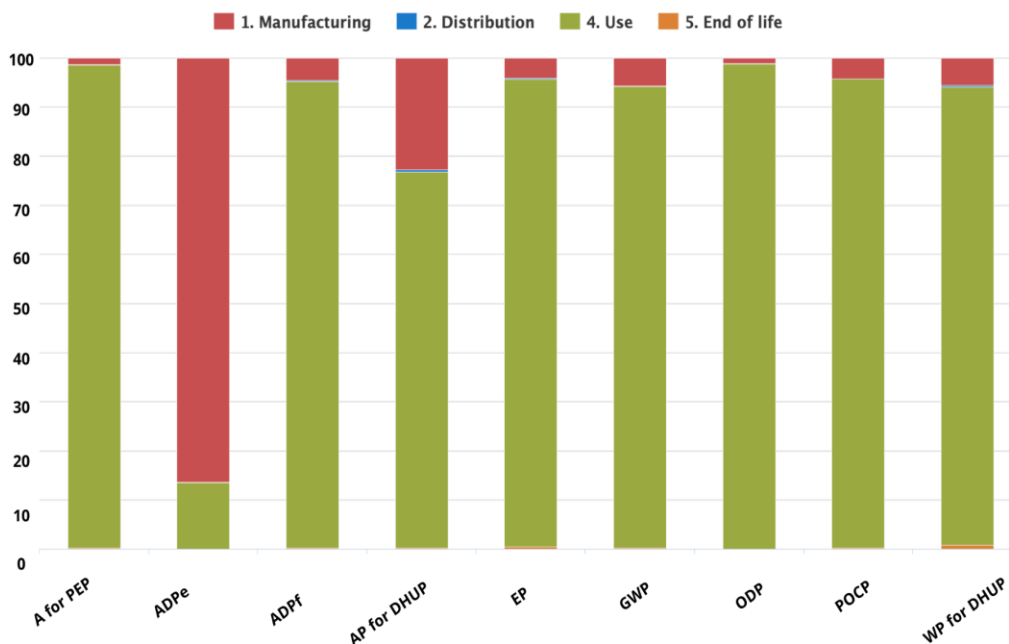


Figure 5-b : Bargraphe pour 5V-5A en sortie de l'alimentation linéaire (scénario 1)

D'après ces graphes, nous constatons que la phase d'utilisation est la plus impactante dans les deux cas de figure (24V et 5V). Le cas du 5 V est beaucoup plus défavorable car renfermant beaucoup plus de pertes électriques. Bon nombre d'équipements électriques présentent également cette tendance, à savoir que leur consommation d'énergie électrique est responsable d'une grande partie des impacts environnementaux. Il n'est cependant pas possible de généraliser cette tendance de manière systématique pour un type d'équipement donné. En effet, pour un moteur électrique par

exemple, sa fonction va impacter fortement son empreinte environnementale. Un moteur de ventilation qui fonctionne toute la journée verra son empreinte environnementale essentiellement due à sa consommation électrique. En revanche, s'il s'agit d'un moteur de volet roulant fonctionnant moins d'une minute par jour, cette empreinte sera essentiellement due à sa phase de fabrication. Nous verrons que dans le cas de notre alimentation de laboratoire, le scénario d'utilisation défini va modifier la phase du cycle de vie la plus impactante.

- **Scénario 2**

Nous procédons de la même façon que dans le scénario 1 et nous obtenons les résultats suivants :

	Manufacturing	Distribution	Use	End of life	Sum
A for PEP (kg SO2 eq.)	5.29e-3	3.78e-4	8.58e-3	1.07e-3	1.53e-2
ADPe for EN15804 (kg antimony eq.)	3.26e-4	2.08e-7	1.13e-6	9.55e-9	3.27e-4
ADPF for EN15804 (MJ)	5.88e+1	2.35e+0	2.65e+1	2.22e+0	8.99e+1
AP for DHUP (m³)	1.04e+3	1.81e+1	7.69e+1	9.76e+0	1.15e+3
EP for EN15804 (kg PO4 ³⁻ eq.)	1.56e-3	1.06e-4	7.82e-4	1.67e-4	2.61e-3
GWP for EN15804 (kg CO2 eq.)	6.37e+0	1.82e-1	2.31e+0	2.10e-1	9.07e+0
ODP for EN15804 (kg CCL3F eq.)	1.78e-6	1.22e-7	3.30e-6	5.93e-8	5.26e-6
POCP for EN15804 (kg ethylene eq.)	1.01e-3	1.49e-5	4.97e-4	5.08e-5	1.57e-3
WP for DHUP (m²)	3.20e+2	1.72e+1	1.17e+2	4.16e+1	4.96e+2

Tableau 3 : Indicateurs environnementaux de l'alimentation linéaire pour 24V-5A en sortie (scénario 2)

Le bargraphe correspondant est illustré sur la Figure 6-a suivante :

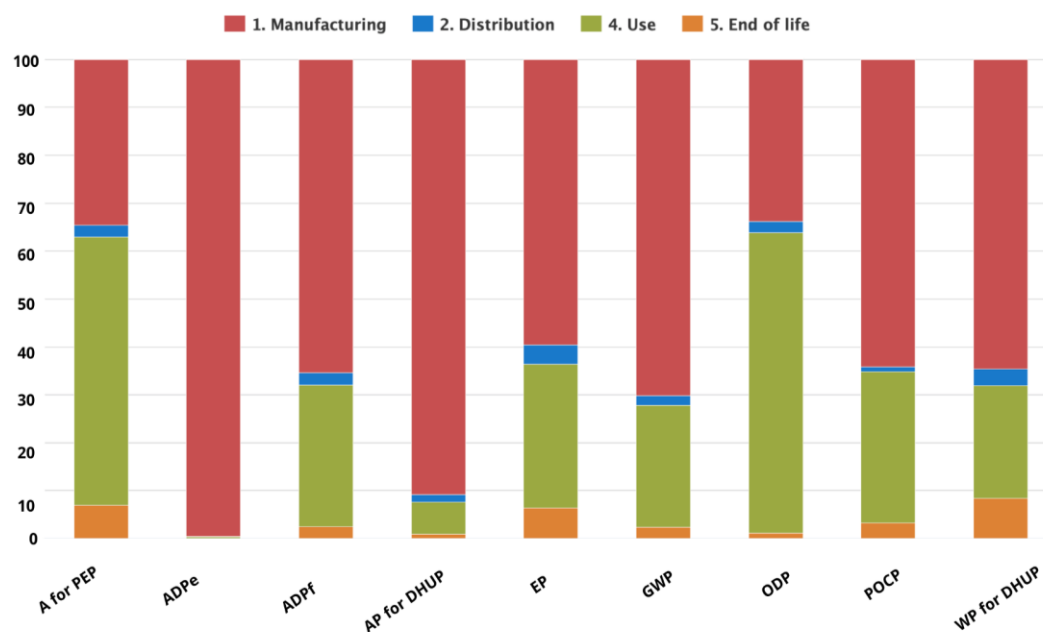


Figure 6-a : Bargraphe pour 24V-5A en sortie de l'alimentation linéaire (scénario 2)

	Manufacturing	Distribution	Use	End of life	Sum
A for PEP (kg SO2 eq.)	5.29e-3	3.78e-4	1.97e-2	1.07e-3	2.64e-2
ADPe for EN15804 (kg antimony eq.)	3.26e-4	2.08e-7	2.58e-6	9.55e-9	3.29e-4
ADPf for EN15804 (MJ)	5.88e+1	2.35e+0	6.09e+1	2.22e+0	1.24e+2
AP for DHUP (m³)	1.04e+3	1.81e+1	1.77e+2	9.76e+0	1.24e+3
EP for EN15804 (kg PO4 ³⁻ eq.)	1.56e-3	1.06e-4	1.80e-3	1.67e-4	3.63e-3
GWP for EN15804 (kg CO2 eq.)	6.37e+0	1.82e-1	5.30e+0	2.10e-1	1.21e+1
ODP for EN15804 (kg CCL3F eq.)	1.78e-6	1.22e-7	7.57e-6	5.93e-8	9.53e-6
POCP for EN15804 (kg ethylene eq.)	1.01e-3	1.49e-5	1.14e-3	5.08e-5	2.21e-3
WP for DHUP (m³)	3.20e+2	1.72e+1	2.68e+2	4.16e+1	6.47e+2

Tableau 4 : Indicateurs environnementaux de l'alimentation linéaire pour 5V-5A en sortie (scénario 2)

Le bargraphe correspondant est illustré sur la Figure 6-b suivante :

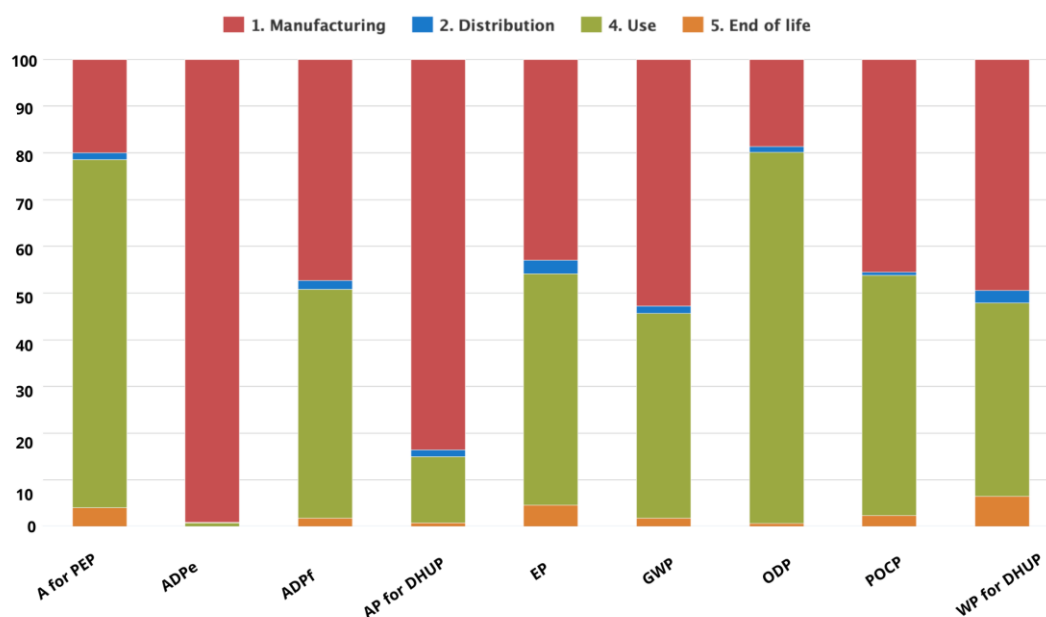


Figure 6-b : Bargraphe pour 5V-5A en sortie de l'alimentation linéaire (scénario 2)

D'après ces graphes, nous constatons que dans le scénario 2 où l'alimentation fonctionne beaucoup moins en phase active, la phase de fabrication devient alors la plus impactante. Dans le cas d'une sortie 24V-5A elle est même prépondérante.

Nous allons procéder à présent à l'identification du sous-ensemble le plus impactant en passant par une ACV par sous-ensembles.

3.2.3 - ACV par sous-ensembles de la phase de fabrication

Cette stratégie vise à comprendre et à quantifier les contributions spécifiques de chaque sous-ensemble de manière à identifier le plus impactant. Nous avons défini trois sous-ensembles : composants “actifs” (transistors, diodes, led et zener), composants “passifs” (résistances, condensateurs) et “circuit” (radiateur, commutateurs et connecteurs, circuit imprimé + fils, vis-écrous, soudure, boîtier). Cette ACV est illustrée sur la Figure 7 suivante :

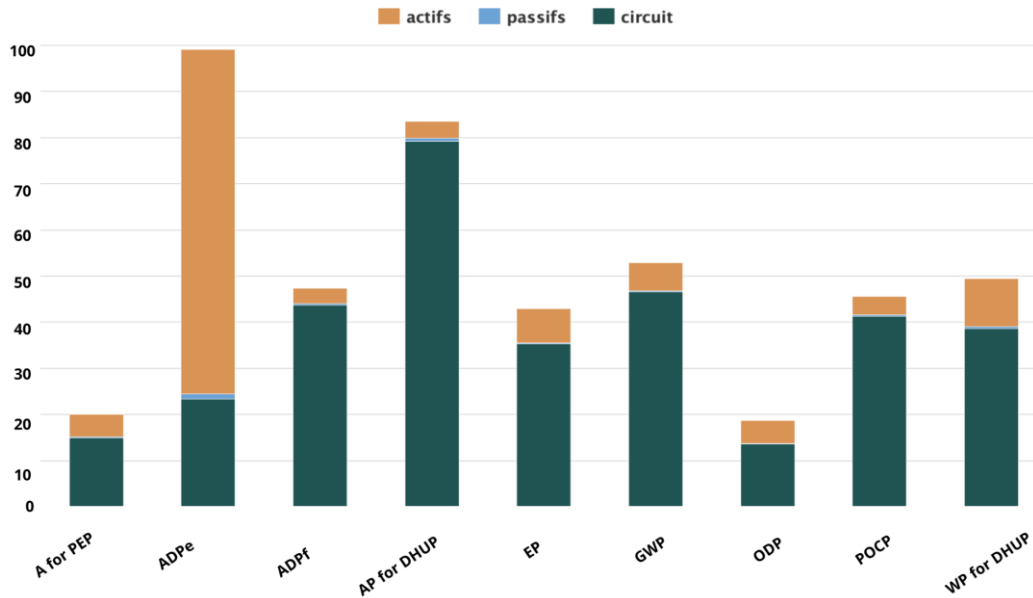


Figure 7 : Bargraphe de l'ACV de l'alimentation linéaire par sous-ensembles

Comme le montre clairement la Figure 7, le sous ensemble “circuit” est le plus impactant. Dans ce sous-ensemble, il est possible d'identifier le composant le plus impactant en passant par une ACV par éléments.

3.2.4 - ACV par éléments du sous-ensemble “circuit”

Nous déroulons la partie “circuit” et nous obtenons la figure 10 suivante :

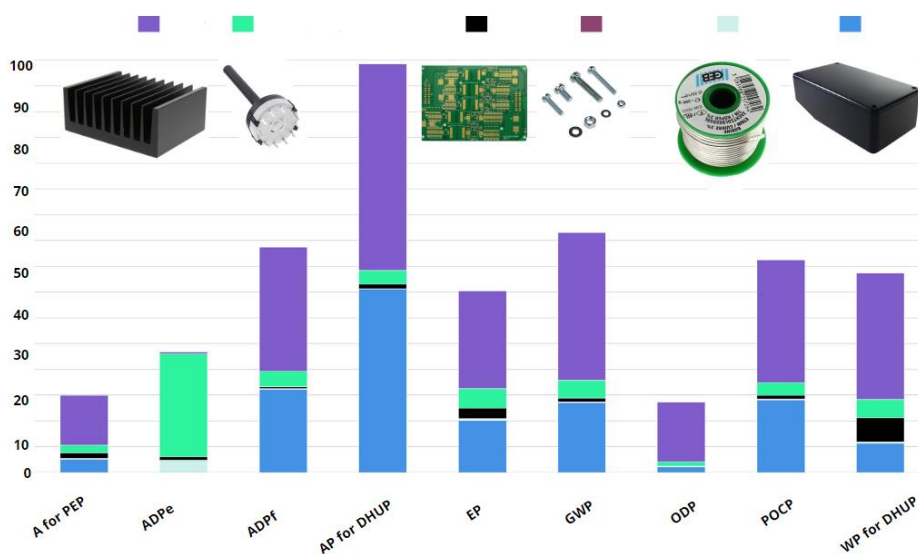


Figure 8 : Bargraphe de l'ACV par éléments de la partie “circuit” de l'alimentation linéaire

Au vu de ce graphe, l'élément radiateur en aluminium est le plus nocif pour l'environnement du fait de son poids qui est directement lié aux pertes élevées dans le transistor ballast. La production

d'aluminium primaire est en effet très impactante sur l'environnement [3]. On comprend ici tout l'enjeu d'utiliser de l'aluminium recyclé [4].

3.3 - Etude du convertisseur BUCK

3.3.1 - Schéma structurel du convertisseur à découpage de type "buck"

Le schéma électrique d'un tel convertisseur est donné dans la Figure 9 :

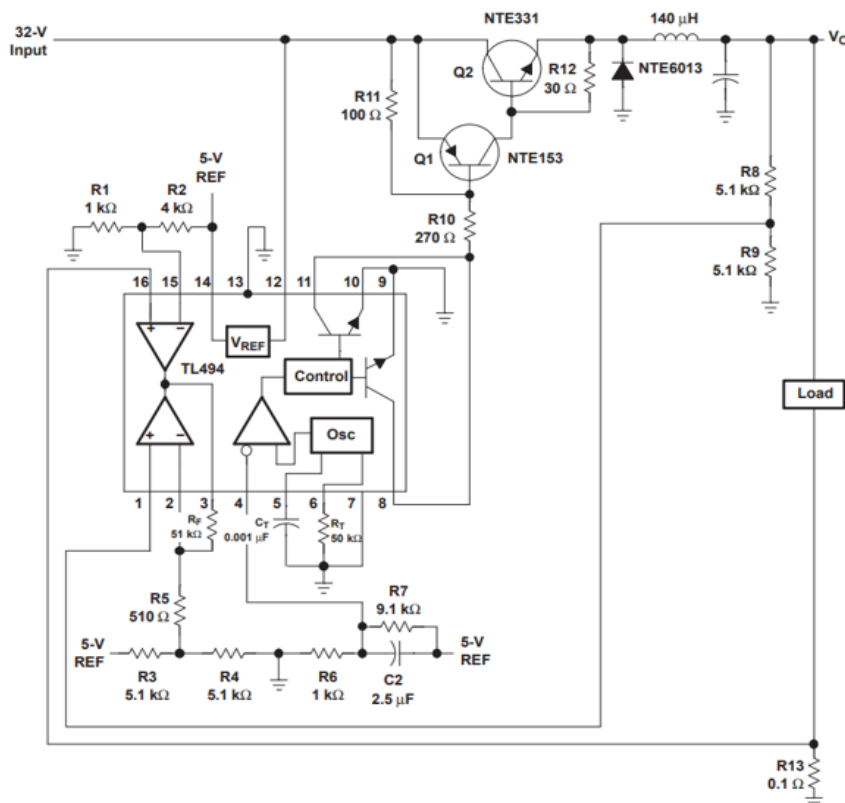


Figure 9 : Schéma structurel d'un convertisseur de type BUCK [5]

Ce convertisseur (BUCK) est composé d'un étage hacheur série à transistor (MOSFET ou Darlington) et d'un filtre LC de sortie. Dans l'exemple de la Figure 9, un circuit intégré (de type TL494) assure à la fois la régulation de la tension de sortie et la protection en courant. Comme dans le cas de l'alimentation linéaire, une LED de présence tension et sa résistance de polarisation ont été ajoutées au montage de la Figure 9 pour l'ACV.

Comme pour l'alimentation linéaire, le montage Buck présente également des pertes dues aux différents composants : pertes par commutation et par conduction dans les semiconducteurs de puissance, pertes joules dans les résistances, pertes magnétiques dans l'inductance, consommation du circuit intégré... Le calcul des pertes des composants peut être trouvé dans tout ouvrage classique traitant de l'électronique de puissance. La consommation du circuit intégré est donnée dans la datasheet du TL494.

Pour une tension de sortie de 5V et un courant de 5A, les pertes du montage Buck ont été évaluées à 14,4W soit 8,6 fois plus faibles que celles de l'alimentation linéaire. Le radiateur en aluminium devant dissiper moins de chaleur aura une taille réduite, donc un impact environnemental à la fabrication moindre.

Pour le mode Standby, les pertes sont estimées à 1,8W, soit 2,4 fois plus que l'alimentation linéaire, ceci à cause de la consommation du circuit intégré.

Comme pour le montage précédent, s'il existe, il est possible d'évaluer les pertes (modes actif et standby) en les déduisant des mesures de puissances à l'entrée et à la sortie.

Comme pour l'alimentation linéaire, nous effectuons des ACVs pour l'alimentation de type buck.

3.3.2 - ACV par phases

Le calcul des indicateurs environnementaux issus du logiciel d'ACV est donné dans les Tableaux, 5 et 6 ci-dessous respectivement pour les tensions de sortie de 24V et de 5V correspondant respectivement aux bargraphes des Figures 10-a et 10-b. Nous ne présentons ici que les résultats obtenus avec le scénario 1.

	Manufacturing	Distribution	Use	End of life	Sum
A for PEP (kg SO ₂ eq.)	4.11e-3	3.18e-4	5.61e-2	5.73e-5	6.06e-2
ADPe for EN15804 (kg antimony eq.)	1.31e-3	2.07e-7	7.36e-6	3.58e-10	1.32e-3
ADPF for EN15804 (MJ)	2.24e+1	2.18e+0	1.73e+2	4.49e-2	1.98e+2
AP for DHUP (m ³)	3.41e+2	1.76e+1	5.03e+2	1.23e+0	8.62e+2
EP for EN15804 (kg PO ₄ ³⁻ eq.)	1.06e-3	9.22e-5	5.12e-3	6.16e-5	6.33e-3
GWP for EN15804 (kg CO ₂ eq.)	2.93e+0	1.69e-1	1.51e+1	7.08e-3	1.82e+1
ODP for EN15804 (kg CCL ₃ F eq.)	1.01e-6	1.22e-7	2.16e-5	1.24e-9	2.27e-5
POCP for EN15804 (kg ethylene eq.)	4.54e-4	1.06e-5	3.25e-3	2.11e-6	3.71e-3
WP for DHUP (m ³)	3.08e+2	1.51e+1	7.64e+2	1.61e+1	1.10e+3

Tableau 5 : Indicateurs environnementaux de l'alimentation "buck" pour 24V-5A en sortie (scénario 1)

Le bargraphe correspondant est illustré sur la Figure 10-a ci-dessous :

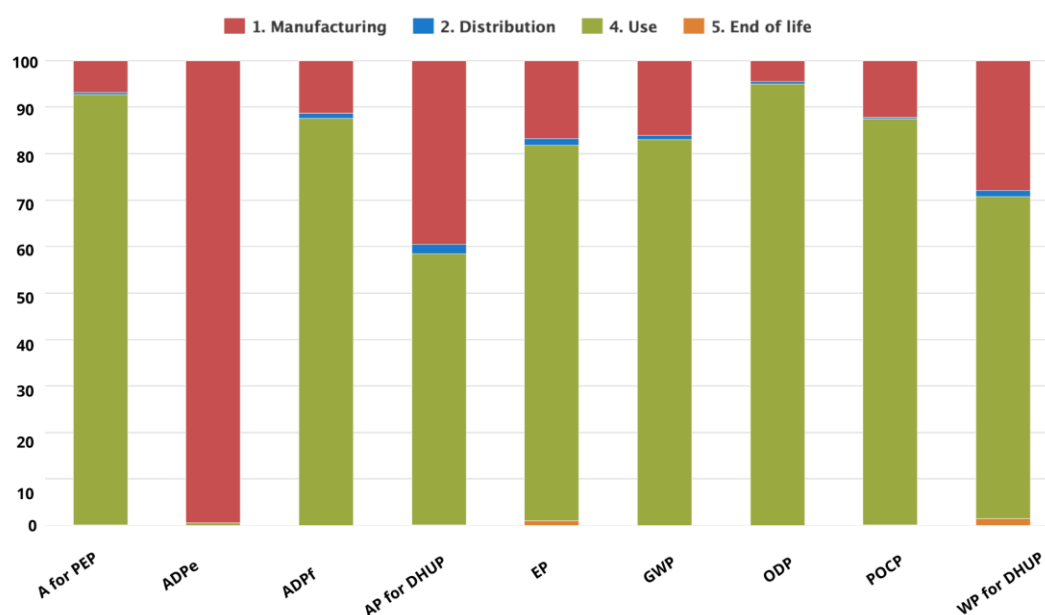


Figure 10-a : Bargraphe pour 24V-5A en sortie de l'alimentation "buck" (scénario 1)

	Manufacturing	Distribution	4. Use	End of life	Sum
A for PEP (kg SO ₂ eq.)	4.39e-3	2.17e-4	4.79e-2	2.32e-5	5.25e-2
ADPe for EN15804 (kg antimony eq.)	1.31e-3	5.30e-8	6.28e-6	1.63e-10	1.32e-3
ADPf for EN15804 (MJ)	2.32e+1	9.54e-1	1.48e+2	3.45e-2	1.72e+2
AP for DHUP (m ³)	3.49e+2	5.73e+0	4.29e+2	4.09e-1	7.84e+2
EP for EN15804 (kg PO ₄ ³⁻ eq.)	1.13e-3	5.50e-5	4.37e-3	1.65e-5	5.57e-3
GWP for EN15804 (kg CO ₂ eq.)	3.09e+0	7.15e-2	1.29e+1	3.89e-3	1.60e+1
ODP for EN15804 (kg CCL ₃ F eq.)	1.10e-6	3.05e-8	1.84e-5	1.07e-9	1.95e-5
POCP for EN15804 (kg ethylene eq.)	4.72e-4	1.26e-5	2.77e-3	9.80e-7	3.26e-3
WP for DHUP (m ³)	3.20e+2	8.57e+0	6.52e+2	4.30e+0	9.84e+2

Tableau 6 : Indicateurs environnementaux de l'alimentation "buck" pour 5V-5A en sortie (scénario 1)

Le bargraphe correspondant est illustré sur la Figure 10-b ci-dessous :

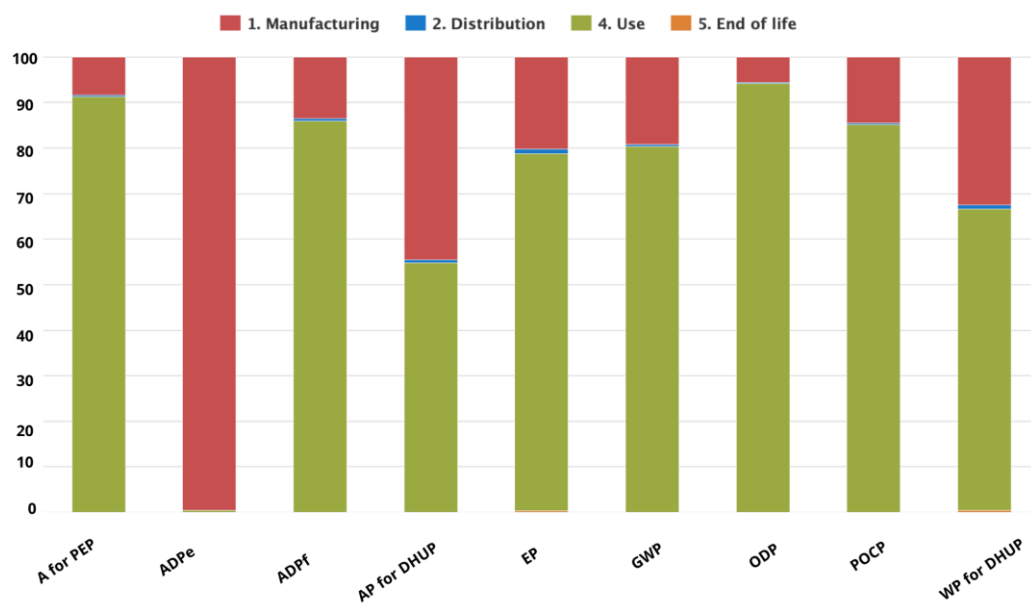


Figure 10-b : Bargraphe en sortie de l'alimentation "buck" 5V-5A (scénario 1)

D'après ces graphes, nous constatons que la phase d'utilisation est la plus impactante.

Le scénario avec une tension de 24V est notablement moins favorable en raison d'un niveau de pertes significativement plus élevé.

3.3.3 - ACV par sous-ensembles

Comme pour l'alimentation linéaire, nous allons procéder à une ACV par sous-ensembles. Nous avons défini les mêmes trois sous-ensembles : composants "actifs" (transistors, diodes, circuit

intégré, led), composants “passifs” (résistances, condensateurs, inductance) et la partie “circuit” (radiateur, commutateurs et connecteurs, circuit imprimé + fils, vis-écrous, soudure, boîtier).

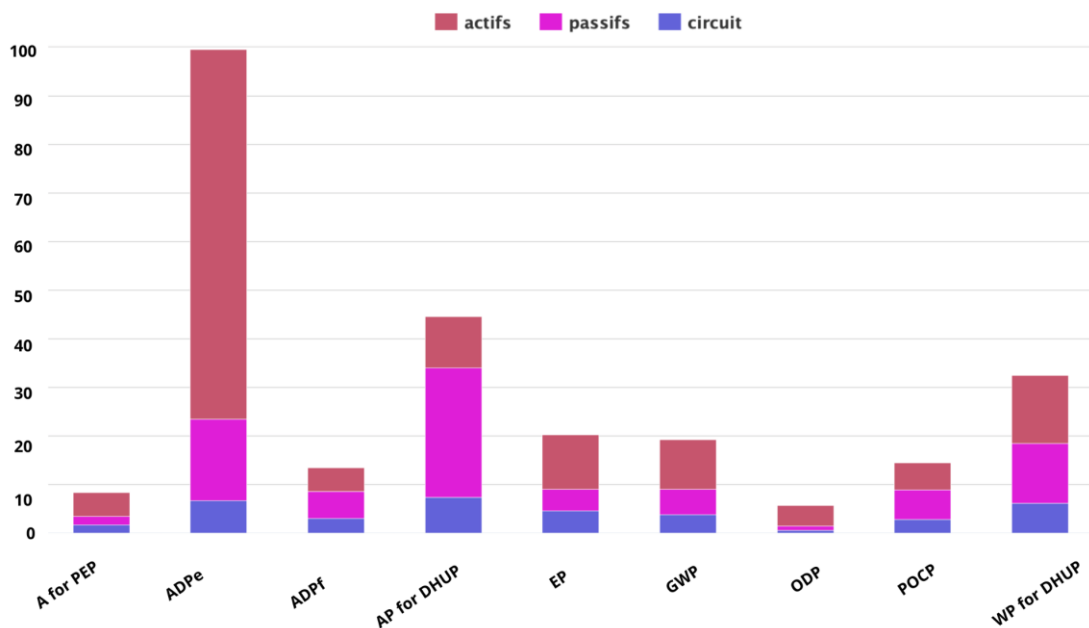


Figure 11 : Bargraphe de l’ACV par sous-ensembles de l’alimentation Buck

Comme le montre clairement la Figure 11, le sous-ensemble composants “actifs” se révèle être le plus significatif en termes d’impacts environnementaux. Dans la section suivante, nous allons chercher à identifier si l’un des éléments de ce sous-ensemble est responsable de ces impacts ou si ces impacts se répartissent entre tous les éléments.

3.3.4 - ACV par éléments

En extrayant du bargraphe précédent le sous-ensemble “actifs”, il apparaît que l’élément le plus impactant sur l’environnement est le circuit intégré, comme l’indique la Figure 12 ci-dessous. En effet, la fabrication des circuits intégrés implique l’utilisation de matériaux raffinés et de substances chimiques pour la fabrication des wafers, de l’encapsulation... et consomme de l’énergie, de l’eau, engendrant ainsi des répercussions environnementales élevées [6].

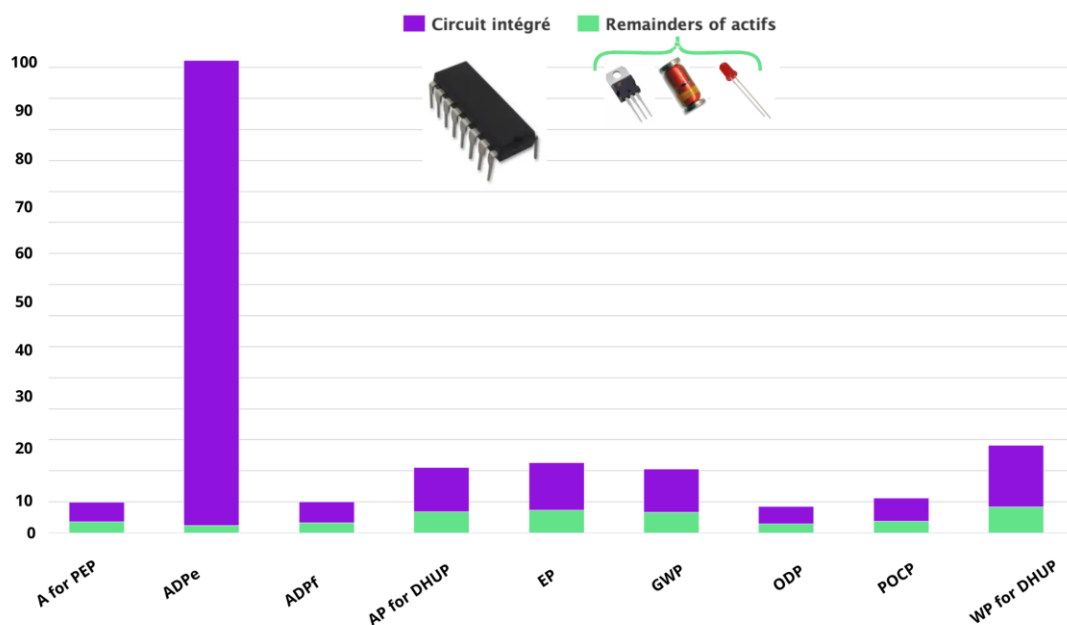


Figure 12 : Bargraphe de l’ACV par éléments de la partie composants “actifs” de l’alimentation Buck

4 - Comparaison entre l'alimentation linéaire et l'alimentation "Buck"

4.1 - Tableau récapitulatif

Au vu des études détaillées faites pour les deux alimentations, nous avons reporté dans le Tableau 7 ci-dessous un comparatif technique. Notons que pour les pertes, nous avons pris comme exemple le cas du 24V et du 5V.

Caractéristiques	Alimentation linéaire	Alimentation de type "buck"
Masse	323 g	101 g
Rendement	-77% pour 24V ; -16% pour 5V.	- 87 % pour 24V ; - 62% pour 5V.
Complexité	Moins de composants	Plus complexe
Pertes d'utilisation	36 W pour 24V ; 131 W pour 5V.	17 W pour 24V ; 15 W pour 5V.

Tableau 7 : Comparaison des deux alimentations

De manière à compléter le tableau 7 ci-dessus sur le plan environnemental, nous allons comparer les empreintes environnementales des deux alimentations.

4.2 - Représentation de type "toile d'araignée"

Pour comparer l'empreinte environnementale des deux alimentations, nous procédons à une représentation de type "toile d'araignée", respectivement pour une tension de 24V et de 5V. Visuellement, plus on s'approche du centre de la toile, plus les impacts environnementaux (reportés en périphérie de la toile) sont faibles.

Comme nous pouvons le constater sur la Figure 13 ci-après, pour une tension de 24V, l'alimentation "buck" est beaucoup moins impactante que l'alimentation linéaire pour tous les indicateurs environnementaux excepté celui de l'ADPe (épouséement des ressources non fossiles), attribué au circuit intégré.

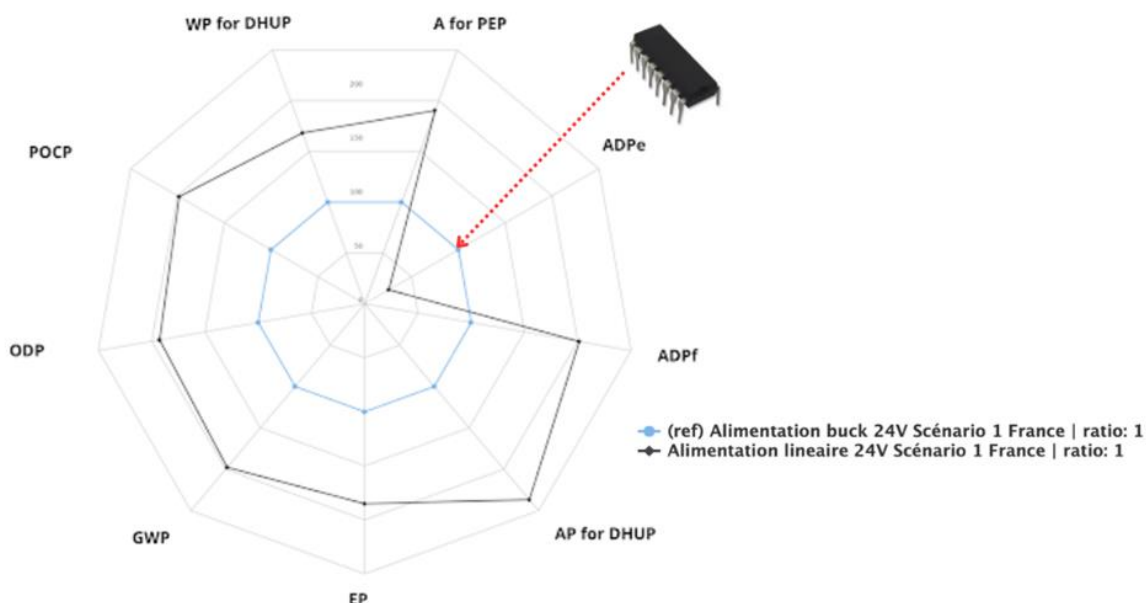


Figure 13 : Comparaison des deux alimentations pour une sortie de 24V-5A (scénario 1)

Pour une tension de sortie de 5V, nous remarquons également sur la Figure 14 que l'alimentation "Buck" est beaucoup moins impactante que l'alimentation linéaire exceptée à nouveau le facteur ADPE, toujours attribué au circuit intégré. L'écart est plus élevé que pour la tension de 24V, ceci à cause des pertes beaucoup plus élevées liées au fonctionnement de l'alimentation linéaire.

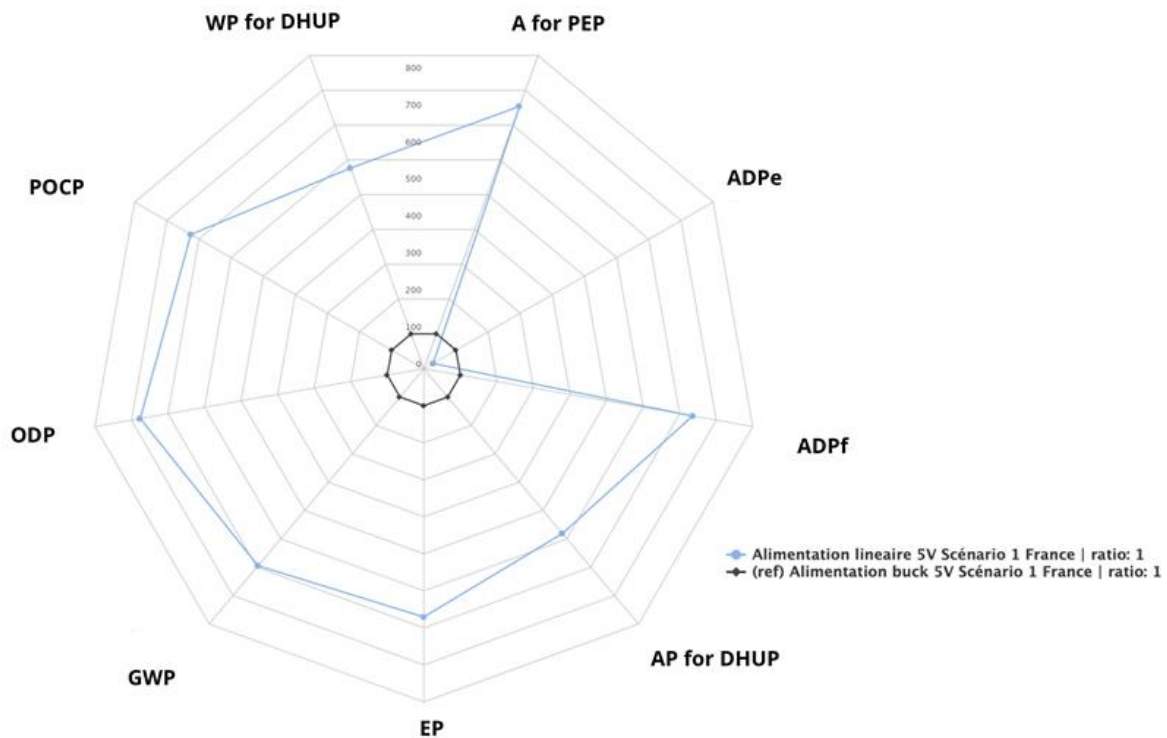


Figure 14 : Comparaison des deux alimentations pour une sortie de 5V-5A en sortie (scénario 1)

5 - Perspectives de développement

5.1 - Piste d'éco-conception de l'alimentation linéaire

Comme mentionné précédemment, l'alimentation linéaire présente, par son fonctionnement, un impact environnemental élevé en raison de la masse importante de son radiateur et de ses pertes considérables, surtout pour une faible tension de sortie. Dans cette perspective, nous avons entrepris d'explorer une piste d'éco-conception tout en respectant les principes qui la guident.

5.2 - Solution proposée

Compte tenu de sa constitution avec peu de composants, les leviers qui permettraient de pouvoir réduire l'impact environnemental de l'alimentation linéaire sont quasi-inexistants, sauf à modifier son principe de fonctionnement. Pour agir tout de même, il faut une étude plus globale qui prend en compte l'étage amont qui est la source d'entrée. Classiquement, cette source d'entrée est composée d'un transformateur abaisseur, d'un pont redresseur et de deux condensateurs de filtrage (forte valeur-électrochimique et faible valeur-plastique). De manière à réduire les fortes pertes de l'alimentation linéaire, la solution proposée consiste à employer un transformateur multi-sorties. En effet en réduisant la tension redressée d'entrée à une valeur proche de la tension de sortie souhaitée additionnée de la valeur de $V_{ce_{sat}}$ les pertes dans le transistor ballast seront très fortement réduites. Ainsi nous considérons qu'un transformateur à cinq sorties sera employé, associé à un commutateur supplémentaire permettant d'adapter la tension d'entrée lorsque la tension de sortie de consigne est modifiée. Dans notre modélisation, nous avons pris des valeurs de tension de sortie de l'alimentation d'entrée supérieures de 2V à la tension de sortie de l'alimentation linéaire.

Dans ce qui suit l'ACV ne sera réalisée que pour l'alimentation linéaire, sans y inclure la source d'entrée. Nous partons du principe que cette même source d'entrée alimentera également l'alimentation de type "buck". En suivant cette piste, les pertes de l'alimentation linéaire pour 5V en sortie passent de 131 W à 15 W.

Après prise en compte de cette nouvelle source d'entrée, nous avons comparé la nouvelle empreinte environnementale de l'alimentation linéaire avec celle précédemment évaluée. La Figure 15 indique clairement une forte réduction de cette empreinte pour une sortie de 5V-5A. Les pertes dans le transistor ballast ont été fortement réduites ainsi que la taille de son radiateur.

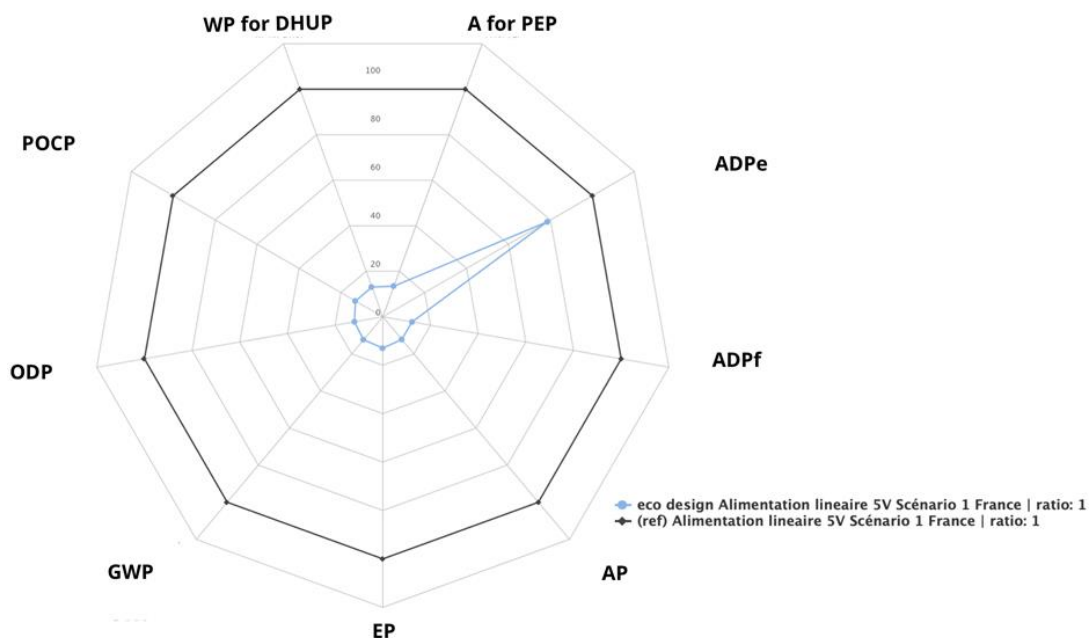


Figure 15 : Comparaison entre l'alimentation linéaire de base et la version éco-conçue 5V-5A (scénario 1)

Il serait à présent judicieux de comparer l'empreinte environnementale de l'alimentation linéaire avec celle de l'alimentation de type "buck", toutes deux alimentées avec la nouvelle source d'entrée. Dans la Figure 16 ci-dessous correspondant une sortie de 5V-5A (scénario 1), il apparaît clairement que l'empreinte environnementale de l'alimentation linéaire est devenue à présent plus faible que celle de l'alimentation de type "buck" (l'indicateur A -acidification des sols et de l'eau- étant quasi-identique), validant ainsi les modifications apportées à la source d'entrée.

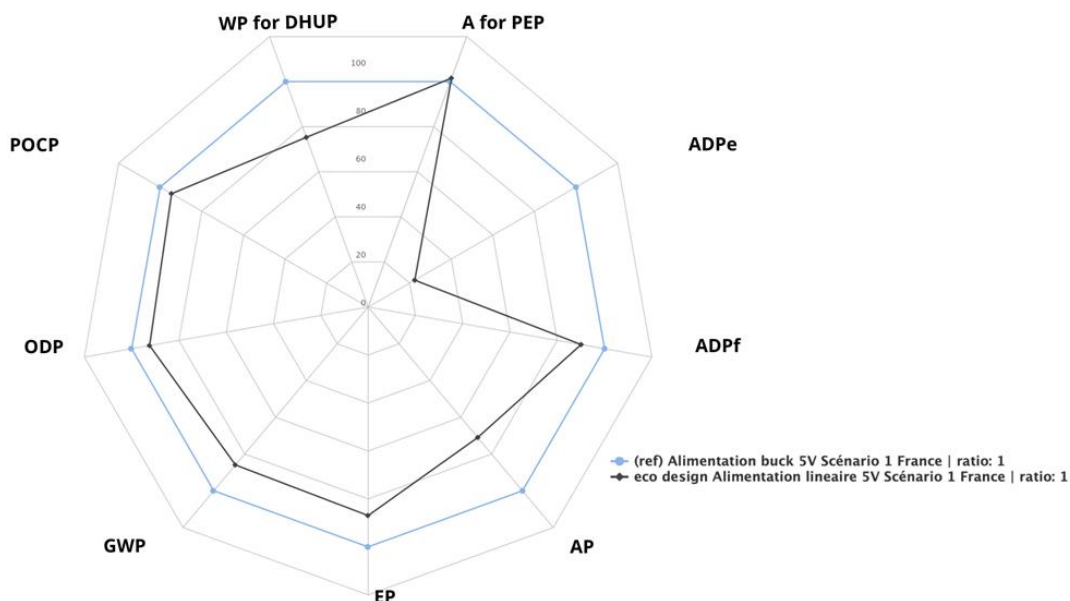


Figure 16 : Comparaison alimentation linéaire éco-conçue et "buck" pour 5V-5A en sortie (scénario 1)

6 - Conclusion

Cet article s'est focalisé sur l'ACV de deux convertisseurs DC-DC: une alimentation linéaire à transistor ballast et une alimentation à découpage de type "buck". L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) a joué un rôle central, évaluant l'impact environnemental à chaque phase du cycle de vie des convertisseurs. L'implémentation de stratégies ciblées pour réduire l'impact environnemental a conduit à des résultats positifs. Notamment, face à l'impact environnemental élevé de l'alimentation linéaire, l'éco-conception par le remplacement du transformateur mono-sortie par un modèle multi-sorties a considérablement réduit les pertes.

Cet exemple d'étude peut être proposé comme bureau d'étude ou travail dirigé de manière à introduire la démarche d'écoconception dans nos formations EEA. De conception simple, ces deux convertisseurs peuvent être modélisés grâce aux bibliothèques de composants incluses dans les bases de données des logiciels d'ACV. Ce type d'exercice permet d'aborder des points cruciaux : l'inventaire exhaustif des éléments du convertisseur étudié, la définition d'un scénario de conception, d'utilisation et de fin de vie, l'analyse par phases du cycle de vie, l'analyse par sous-ensembles et l'identification de pistes d'écoconception.

En proposant des solutions concrètes pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire l'impact environnemental des convertisseurs statiques, ces résultats contribuent à une démarche globale visant à concilier le développement industriel avec la préservation de l'environnement.

7 - Références

- [1]: Pôle éco-conception. Consulté le 28 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.eco-conception.fr/static/analyse-du-cycle-de-vie-acv.html>
- [2]: EIME « Manuel indicateurs PEP », EIME. Consulté le 06 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur : https://eimedoc.s3-eu-west-1.amazonaws.com/User+Guides/FR/03+-+Indicators+Handbook/EIME_Programme_PEP_FR.pdf
- [3]: ADEME. Consulté le 28 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur : https://prod-basecarbonesolo.ademe-dri.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?aluminium.htm
- [4]: ADEME. Consulté le 28 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://librairie.ademe.fr/ged/5692/memo-pts-aluminium-2021.pdf>
- [5]: Texas Instruments, « TL494 Pulse-Width-Modulation Control Circuits», Texas Instruments. Consultée le : 18juillet2023. [Enligne]. Disponible sur : https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl494.pdf?ts=1686562081226&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FTL494
- [6]: F. Taiariol, P. Fea, C. Papuzza, R. Casalino, E. Galbiati and S. Zappa, "Life cycle assessment of an integrated circuit product," *Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*. 2001

