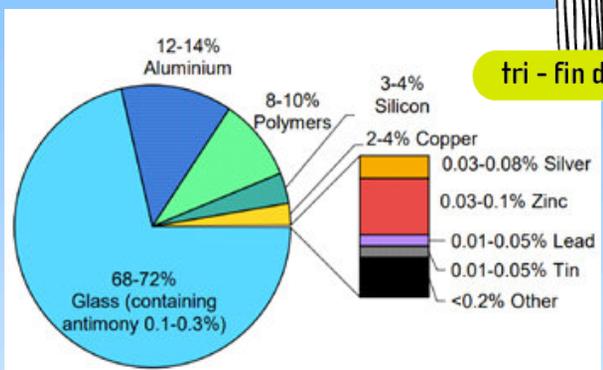
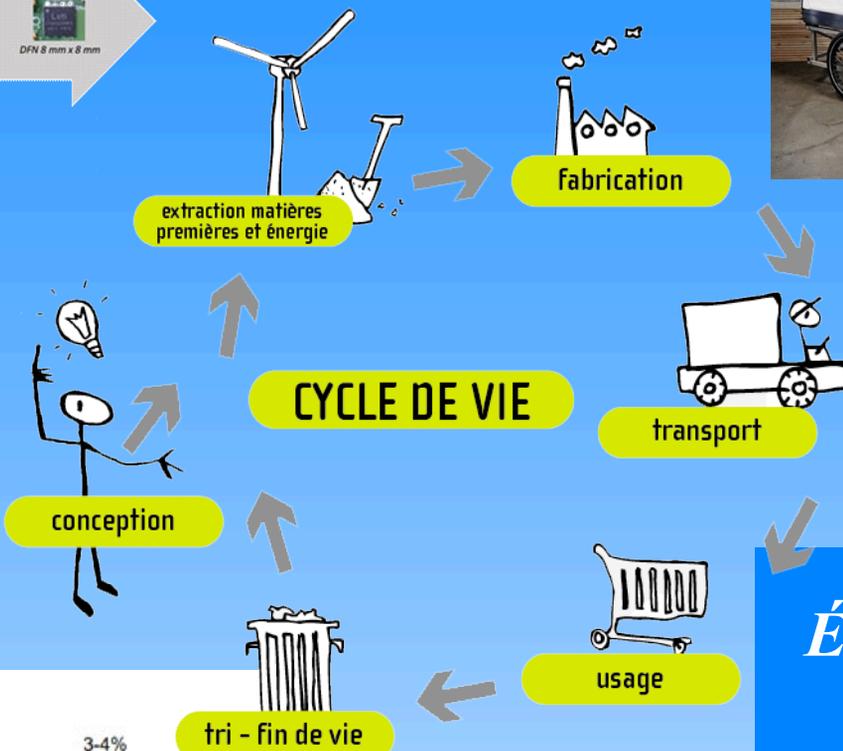
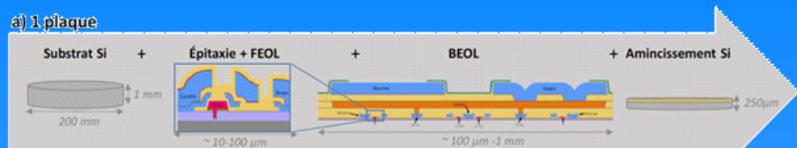


La Revue 3 E.I



*Écoconception
en
Génie
Électrique*

Publication trimestrielle du Cercle Thématique 13.01 de la SEE

ENSEIGNER L'ÉLECTROTECHNIQUE ET L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE



Société de l'Électricité, de l'Électronique
et des Technologies de l'Information
et de la Communication

N°113
3ème trimestre 2024

Abonnez-vous à la

La REE est une publication trimestrielle de la SEE

REE

REVUE DE
L'ÉLECTRICITÉ
ET DE
L'ÉLECTRONIQUE

Choisissez votre formule d'abonnement :



Version papier

1 an - 4 numéros**

(Parution : mars, juin, octobre, décembre). Distribution postale

Livraison France	Livraison UE	Livraison Hors UE
<input type="checkbox"/> 135 € TTC	<input type="checkbox"/> 150 TTC (146,91 € HT*)	<input type="checkbox"/> 165 TTC (161,61 € HT*)



Version numérique

Accès aux publications numériques ouvert pendant un an à compter de la date de paiement

France - UE - Hors UE
<input type="checkbox"/> 90 € TTC (88,15 € HT*)



Version duo

Version imprimée + version numérique

Livraison France	Livraison UE	Livraison Hors UE
<input type="checkbox"/> 165 € TTC	<input type="checkbox"/> 180 € TTC (173,30 € HT*)	<input type="checkbox"/> 195 € TTC (190,99 € HT*)

* Prix HT valide si le pays de facturation est hors UE, ou si la TVA Intracommunautaire est fournie pour un pays de l'UE.

** Abonnement papier servi à partir de la date de paiement

Votre adhésion à la SEE* pour 2024

<input type="checkbox"/> Standard	<input type="checkbox"/> Retraité <input type="checkbox"/> Enseignant <input type="checkbox"/> Jeune actif (< 35 ans)	<input type="checkbox"/> Etudiant <input type="checkbox"/> En recherche d'emploi
130 €	70 €	15 €

* Adhésion d'un an à compter de la date de paiement.

+ Votre abonnement REE** (Tarif réservé aux adhérents, version papier)

<input type="checkbox"/> Livraison France : 68 € TTC	<input type="checkbox"/> Livraison UE : 78 € TTC (76,40 € HT*)	<input type="checkbox"/> Livraison Hors UE : 83 € TTC (81,70 € HT*)
--	--	---

TVA de la revue REE : 2,1%. Adhésion collective possible via des conventions de partenariat - Contactez-nous à : sg@see.asso.fr

* Prix HT valide si le pays de facturation est hors UE, ou si la TVA Intracommunautaire est fournie pour un pays de l'UE.

** Abonnement papier servi à partir de la date de paiement.

Adresse de livraison

Mr Mme Prénom* :
Nom* :
Adresse* :
Code postal* : Pays* :
Ville* :
Tél.* :
e-mail* :

*Obligatoire

Adresse de facturation (Si différente)

Je joins le bon de commande administratif N° [] et je désire recevoir une facture au nom de mon employeur pour paiement à réception

Raison sociale de l'employeur :
Service : Activité (facultatif) :
Adresse :
Code postal : Ville :
Pays : N° TVA :

N° TVA intracommunautaire : obligatoire pour règlement HT en UE hors de France

Votre règlement

Je règle la somme de [] €
par Chèque à l'ordre de la SEE
 Virement après réception de la facture
 Carte bancaire (Visa, Eurocard/Mastercard)
N° Carte []
Date de validité [] N° cryptogramme [] (3 derniers chiffres au dos de la carte)

e-mail* :
Date* [] Signature* et cachet si il y a lieu :

*Obligatoire

BULLETIN À COMPLÉTER ET RENVOYER À : SEE - 17 rue de l'Amiral Hamelin - 75116 Paris - France
Tél. +33(0)1 56 90 37 17 - abo@see.asso.fr

ABONNEMENT PLUS RAPIDE EN LIGNE : www.see.asso.fr

Je consens à recevoir les autres diffusions de la SEE & de ses activités (congrès, soirées débats, revues, etc.) qui sont extérieures aux diffusions liées à mon abonnement.

Conformément aux dispositions légales et réglementaires en matière de données personnelles, les informations recueillies sur ce formulaire sont enregistrées dans un fichier informatisé par la SEE (Société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication) pour la mise en place et le suivi de l'abonnement souscrit ainsi que pour l'envoi de courriers, e-mails de réabonnements. Elles sont conservées et sont destinées à être utilisées par la SEE et les prestataires techniques de la SEE afin de permettre la bonne réception du magazine et d'assurer le service client. Vous pouvez exercer votre droit d'accès aux données vous concernant par courrier : SEE - Service abonnements 17 rue de l'Amiral Hamelin 75116 Paris ou par le formulaire de contact du site web : www.see.asso.fr. Offre d'abonnement, valable du 01/12/2023 au 25/11/2024 inclus, dans la limite des quantités disponibles.





La Revue 3E.I
Publication trimestrielle
de la SEE

**SOCIÉTÉ de l'ELECTRICITE, de l'ELECTRONIQUE
et des TECHNOLOGIES de l'INFORMATION
et de la COMMUNICATION.**

17, rue de l'Amiral Hamelin, 75116 PARIS
Tél : 01 56 90 37 17
www.see.asso.fr

SEE, association reconnue d'utilité publique par le décret du 7 décembre 1886
Siret 785 393 232 00042, APE 9412 Z, n° d'identification FR 44 785 393 232

Hébergé par :

**Culture Sciences
de l'Ingénieur**

4 avenue des Sciences, 91190 Gif sur Yvette
tel : 01 81 87 55 22
<https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>

La Revue 3E.I

**3E.I : Enseigner l'Électrotechnique et l'Électronique
Industrielle**

La Revue 3E.I, Édition SEE,
17 rue de l'Amiral Hamelin
75116 PARIS

Directeur de la publication
François GERIN
Président de la SEE

Rédacteur en Chef
Franck LE GALL

Adresser les propositions d'article à :
revue3ei@gmail.com

Communication :
Mme. Mélisande DE LASSENCE
Communication1@see.asso.fr
01 56 90 37 17

Dépôt Légal : janvier 2024
Commission Paritaire 1222 G 78028
ISSN 1252-770X

Comité de publication

Morgan ALMANZA (ENS Paris-Saclay)

Hamid BEN AHMED (ENS Rennes)

Arnaud BRUGIER (IUT GIM Saint-Denis)

François COSTA (SATIE UMR 8029, UPEC)

Hervé DISCOURS (IUT GEII Cachan)

Jean-Michel GAY (Retraité STI2D-BTS ET Versailles)

Hélène HORSIN-MOLINARO (Culture Science de
l'Ingénieur)

Jean-Philippe ILARY (IUT GEII Ville-d'Avray)

Anthony JUTON (ENS Paris-Saclay)

Franck LE GALL (ISEN Brest)

Ingrid MININGER (BTS CIEL ER Cachan)

Emmanuel MONNOT (STI2D Versailles)

Abir REZGUI (ESIEE Paris)

Magali SAUVERGEAT (BTS CIEL IR Arpajon)

Jean-François SERGENT (Retraité Univ Lille)

Sommaire du n° 113

p. 3 *Éditorial*

Thème : Ecoconception en Génie Electrique (partie 1)

p. 4 *Hamid Ben Ahmed et al., « Éléments d'éco-conception en génie électrique »*

p. 26 *Ndeye Fatou Diop et David Malec, « Analyse de Cycle de Vie d'un abaisseur de tension DC-DC et piste d'écoconception »*

p. 46 *Alexandre Chagnes, « Recyclage des Cartes Electroniques : Vers une Economie Circulaire »*

p. 54 *Gabin Guillemaud et al., « Empreinte environnementale d'un composant de puissance GaN/Si »*

Hors Thème :

p. 63 *Arnaud Sivert et al. « Adéquation des véhicules faibles consommations énergétiques électriques (Xdefi ADEME) »*

Editorial

Les conséquences du dérèglement climatique et son origine anthropique sont maintenant patentes dans de vastes parties du globe. Les rapports se succèdent et les politiques publiques tentent de répondre à ces défis. Parmi les solutions avancées, le développement des réseaux et des systèmes électriques figure en bonne place et ce, particulièrement lorsque la production d'électricité est décarbonée. En effet, les convertisseurs de puissance sont actuellement optimisés pour obtenir les meilleurs rendements sous contraintes de coût et/ou de volume.

Cette évolution s'accompagne d'une demande croissante de matériaux (cuivre, terres rares...) dont l'utilisation est très peu optimisée. On estime à environ **50 millions de tonnes** la quantité de DEEE (déchets d'équipements électriques et électroniques) générée en 2018 dans le monde et celle-ci pourrait atteindre 120 millions de tonnes d'ici 2050 si rien ne change. La raréfaction des ressources va donc rendre de plus en plus cruciale le développement de cycles vertueux de recyclages des équipements électriques.

Dans ce numéro du troisième trimestre 2024, nous vous proposons donc d'ouvrir le thème de « L'écoconception en Génie Electrique » en mettant l'accent sur l'analyse du cycle de vie.

« Dossier : Ecoconception en Génie Electrique »

L'article de Hamid Ben Ahmed et de ses collègues ouvre le thème en présentant l'analyse sur cycle de vie (ACV), méthode adéquate pour quantifier et analyser les impacts environnementaux d'un produit. Dans cet article, les auteurs précisent le contexte des ACV et donnent quelques outils, méthodes et données d'ACV liés au génie électrique en s'appuyant sur des exemples concrets.

MM. Diop et Malec nous proposent un article 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. Dans cet article, ils comparent l'impact environnemental de ces deux convertisseurs et identifient une piste d'éco-conception.

C'est le recyclage des cartes électroniques qui est abordé dans l'article d'Alexandre Chagnes. Il y décrit les étapes du recyclage, impliquant des opérations de concentration physique et des opérations hydrométallurgiques pour récupérer ces métaux.

Pour clore provisoirement le thème de l'écoconception (il sera prolongé dans le numéro 114), Gabin Guillemaud et ses collègues proposent un article sur l'étude du coût énergétique et les impacts environnementaux à la fabrication des composants de puissance à base de semiconducteurs à large bande interdite "Wide Band Gap (WBG)". Alors que le potentiel gain en efficacité énergétique de ces composants est bien connu il y a peu de données d'analyse de cycle de vie (ACV) disponibles pour ces composants. Dans ce papier, les postes les plus impactants sont analysés et des pistes d'éco-conception sont proposées.

« Hors Thème »

Nous refermons ce numéro avec la publication de l'équipe d'Arnaud Sivert sur les conditions d'adéquation entre le prix, la masse, la consommation, l'autonomie, le volume utile et la fiabilité pour qu'un véhicule intermédiaire puisse trouver un marché porteur. Les auteurs poursuivent ainsi la série d'articles consacrés au vélo à assistance électrique, éventuellement couchés et carénés et démontrent une fois de plus l'intérêt du choix de véhicules adaptés aux usages.

¹ ENS Rennes, Laboratoire SATIE

² Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

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

Cette ressource présente quelques éléments informatifs sur l'ACV et l'éco-conception en génie électrique et systèmes énergétiques. Le contenu est extrait de deux articles rédigés par les auteurs dans les techniques de l'Ingénieur parus en 2024 [28] [29].

1 - Introduction

On estime à environ **50 millions de tonnes** la quantité de DEEE (déchets d'équipements électriques et électroniques) générée en 2018 dans le monde, selon un rapport piloté par l'Organisation des nations unies (ONU). Et celle-ci pourrait atteindre 120 millions de tonnes d'ici 2050 si rien ne change. Sans surprise, ce sont les pays occidentaux et développés qui sont les plus grands producteurs et exportateurs de DEEE. Chacun en rejette 17,7 kg/habitant/an. La gestion des DEEE est directement liée aux matériaux qui les composent (une grande hétérogénéité) et de leur taux de criticité. La Commission Européenne définit une 30^{ème} de matériaux critiques, des matières premières pour lesquelles il existe un risque de difficulté d'approvisionnement du fait de la situation géographique des gisements, l'énergie nécessaire à l'extraction, les besoins présents et futurs. Les enjeux sont également environnementaux, la pollution de la planète n'est plus à prouver et les dégradations écologiques lors de la décomposition des éléments dangereux, les intoxications, étouffements ou blessures causés à la faune lorsqu'elle absorbe ou s'accroche aux déchets sont des événements, hélas, courants. En 2015, seul 1% des DEEE collectés en France a échappé à la destruction ou enfouissement, pour être réutilisé.

Dans le domaine de l'énergie, aujourd'hui, les convertisseurs de puissance sont conçus pour présenter le meilleur coût et/ou volume sous contraintes thermiques, ou pour présenter le meilleur rendement sous contraintes de coût et/ou de volume. Cependant, nous pensons que l'optimisation de la conception devrait se faire sur l'ensemble du cycle de vie en tenant compte des matériaux utilisés, des pertes cumulées, de l'énergie incorporée et des impacts liés à leur fabrication tout comme leur déconstruction/recyclage.

Les dispositifs du génie électrique ont une place privilégiée et spécifique dans cette indispensable quête de développement soutenable. Tout d'abord, car ils représentent un maillon majeur dans l'efficacité énergétique des process industriels. Ensuite, ils sont eux-mêmes des consommateurs et des producteurs d'énergie électrique, notamment d'origine renouvelable, et dont il est important de minimiser leur impact environnemental. Enfin, leur nombre ne cesse de croître à la fois au niveau industriel que grand public. L'analyse sur cycle de vie (ACV) est une méthode adéquate pour quantifier et analyser les impacts environnementaux d'un produit.

Dans cet article, il s'agira de préciser le contexte des ACV, de donner quelques outils, méthodes et données d'ACV liés au génie électrique et enfin d'illustrer le propos au travers des exemples du génie électrique.

2 - Cadre législatif et normatif

La réglementation de l'écoconception du Génie Électrique est définie par des normes ou/et des directives. Les normes et les directives relatives à l'écoconception de systèmes électriques ont plusieurs objectifs clés, qui incluent :

1. Encourager l'amélioration de l'efficacité énergétique des produits électroniques de puissance : établir des exigences en matière d'efficacité énergétique, de consommation d'énergie en mode veille, et de modes de fonctionnement pour inciter les fabricants à produire des systèmes électriques plus efficaces énergétiquement.
2. Réduire l'utilisation de substances dangereuses : imposer des restrictions sur l'utilisation de substances dangereuses comme le plomb, le mercure et le cadmium, qui sont nocives pour l'environnement et la santé humaine.
3. Promouvoir la durabilité et la réparabilité : encourager les fabricants à concevoir des produits électroniques de puissance qui peuvent être réparés et mis à niveau, prolongeant ainsi leur durée de vie et réduisant le volume de déchets électroniques.
4. Établir des critères pour la fin de vie des produits : établir des critères pour la collecte, le traitement et le recyclage des déchets électroniques, ce qui contribue à réduire les impacts environnementaux liés à l'élimination des produits en fin de vie.
5. Améliorer la transparence et la communication : encourager la transparence sur les performances environnementales, en exigeant la communication d'informations sur l'impact environnemental et les caractéristiques des produits.

En somme, les normes sur l'écoconception de systèmes électriques ont pour but de promouvoir des pratiques de conception plus durables et respectueuses de l'environnement, tout en améliorant la qualité et les performances des produits électroniques de puissance.

2.1 - Acteurs

L'établissement de normes/directives en écoconception implique la participation de plusieurs acteurs, présentés dans le tableau 1. Ces acteurs travaillent conjointement.

Tableau 1 : Les principaux acteurs de l'écoconception.

Organismes de normalisation	Ce sont les principaux acteurs impliqués dans l'élaboration et la mise à jour des normes. Ces organismes comprennent des organisations nationales telles que l'AFNOR en France, le DIN en Allemagne, le BSI en Grande-Bretagne, et des organisations internationales telles que l'IEC, ISO et CENELEC.
Fabricants	Les fabricants sont souvent impliqués dans le développement de nouvelles normes et de nouvelles méthodes d'évaluation.
Associations professionnelles	Elles représentent les intérêts des fabricants et des fournisseurs de l'industrie.
Organisations gouvernementales	Les gouvernements ont un rôle important dans l'élaboration de réglementations et de politiques en matière d'écoconception. Ils fournissent des conseils et encouragent l'adoption de normes et de réglementations.

2.2 - Cadre normatif et législatif

Le tableau 2 présente une liste de normes génériques fournissant des lignes directrices pour la prise en compte d'aspect environnementaux pendant la phase de conception d'un produit [1].

Tableau 2 : Normes concernant la mise en œuvre de l'écoconception et l'évaluation de l'impact environnemental

ISO 14006:2020	Lignes directrices pour intégrer l'écoconception
ISO 14009:2020	Lignes directrices pour intégrer la circularité des matériaux
ISO 14031:2021	Évaluation de la performance environnementale - Lignes directrices
ISO 14040:2006	Analyse du cycle de vie - Principes et cadre
ISO 14044:2006	Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices

Des normes sectorielles, plus spécifiques aux systèmes électriques sont présentées ci-dessous.

- La norme EN 50598 - Écoconception pour l'électrotechnique : cette norme fournit des directives pour l'évaluation environnementale et fournit une méthodologie pour la réalisation de l'analyse du cycle de vie (ACV) des produits électroniques. Elle est applicable à une large gamme de produits électrotechniques, tels que les alimentations électriques, les variateurs de vitesse et les moteurs électriques.
- La norme IEC 62430 - Conception écologique pour les produits électriques et électroniques : cette norme fournit des exigences et des lignes directrices pour la conception des produits électrotechniques. Elle couvre des aspects tels que la réduction des substances dangereuses, l'efficacité énergétique, la recyclabilité et la gestion de cycle de vie.
- La norme IEC 61724 - Systèmes de surveillance de la performance des systèmes photovoltaïques : cette norme fournit des exigences et des méthodes pour surveiller la performance des systèmes photovoltaïques. Elle permet aux propriétaires de systèmes photovoltaïques de vérifier si leurs systèmes fonctionnent de manière optimale et si les performances sont conformes aux attentes.

Plusieurs directives européennes sont liées à l'écoconception de systèmes électriques. Le règlement européen relatif à l'écoconception pour les produits liés à l'énergie (Energy-related Product - ErP) est l'un des principaux textes réglementaires pour l'écoconception des produits électriques et électroniques.

Le règlement ErP établit des exigences minimales de performance environnementale pour les produits consommateurs d'énergie tels que les alimentations électriques, les chargeurs ou les onduleurs [2]. Ces exigences portent notamment sur l'efficacité énergétique.

La directive RoHS (Restriction of Hazardous Substances) établit des limites pour les substances dangereuses telles que le plomb, le mercure ou le cadmium dans les équipements électriques et électroniques. Cette directive vise à réduire l'utilisation de ces substances nocives au bénéfice de l'environnement et la santé humaine.

La directive DEEE (Déchets d'équipements électriques et électroniques) établit des normes pour la gestion des déchets d'équipements électriques et électroniques. Elle impose aux fabricants de s'approprier la mise en place des programmes de collecte et de recyclage pour les produits en fin de vie. Cependant ce système n'est pas parfait, en 2020 le taux de collecte des DEEE n'était que 45 % [27].

Le règlement REACH (Enregistrement, Évaluation, Autorisation et Restriction des substances Chimiques) impose des exigences strictes sur l'utilisation de substances chimiques dans la fabrication des systèmes électriques.

Enfin, La directive EcoDesign fixée en 2009 par l'Union Européenne, a pour objectif de réduire les consommations de certaines catégories de produits (produits d'éclairage, appareils de chauffage et refroidissement, etc.) dont les transformateurs HT/BT.

Au-delà des normes et des directives existantes, de nouvelles réglementations environnementales sont en cours de développement pour encourager encore davantage l'écoconception en électronique de puissance.

En résumé, le cadre législatif de l'écoconception de systèmes électriques est réglementé par des normes et des directives. Elles ne sont pour l'instant que très peu spécifiques aux domaines du Génie Électrique comme l'électronique de puissance. Cependant en vue du besoin, de plus en plus de normes et directives devraient émerger dans les années à venir.

À retenir

- La réglementation de l'écoconception du Génie Électrique vise à améliorer l'efficacité énergétique, réduire les substances dangereuses, promouvoir la durabilité, établir des critères pour la fin de vie et améliorer la transparence.
- Les acteurs impliqués incluent les organismes de normalisation, les fabricants, les associations professionnelles et les organisations gouvernementales.
- Des normes telles qu'ISO 14006 et des normes spécifiques aux systèmes électriques comme EN 50598 et IEC 62430 sont utilisées pour l'écoconception.
- Les directives européennes telles que ErP, RoHS, DEEE et REACH réglementent l'écoconception des produits électriques.
- De nouvelles réglementations environnementales sont en développement pour encourager l'écoconception en électronique de puissance.

3 - Méthode d'ACV appliquée au Génie Électrique, indicateurs

3.1 - Définition

L'ACV est une méthode multicritère qui permet de quantifier les impacts d'un « produit » (qu'il s'agisse d'un bien, d'un service voire d'un procédé), depuis l'extraction des matières premières qui le composent jusqu'à son élimination en fin de vie, en passant par les phases de distribution et d'utilisation, soit « du berceau à la tombe ». La figure 1 illustre ce cycle de vie, sans la partie circularité qui fera l'objet d'une section spécifique.

L'ACV est aujourd'hui définie par les normes internationales ISO 14040 à 14043. La méthode ACV est d'écrite en [3], les différentes étapes sont rappelées ci-dessous et présentées à la figure 1.

- Étape 1 : Définition des objectifs et du champ de l'étude. Cette étape est très importante car elle conditionne tout le reste et surtout les interprétations.
- Étape 2 : Inventaire des flux de matières et énergies associés aux étapes du cycle de vie rapporté à l'unité fonctionnelle retenue. Les flux de matières et d'énergies entrants et sortants à chaque étape du cycle de vie sont inventoriés (inventaire du cycle de vie : ICV).
- Étape 3 : Évaluation des impacts potentiels à partir des flux de matières et énergies recensés. Présentée sous la forme de série de résultats des impacts potentiels (du type « X kg d'équivalents CO2 pour l'effet de serre », « Y kg d'équivalents H+ pour l'acidification », ...).

- Étape 4 : Interprétation des résultats obtenus en fonction des objectifs. Évaluation de la robustesse des résultats.

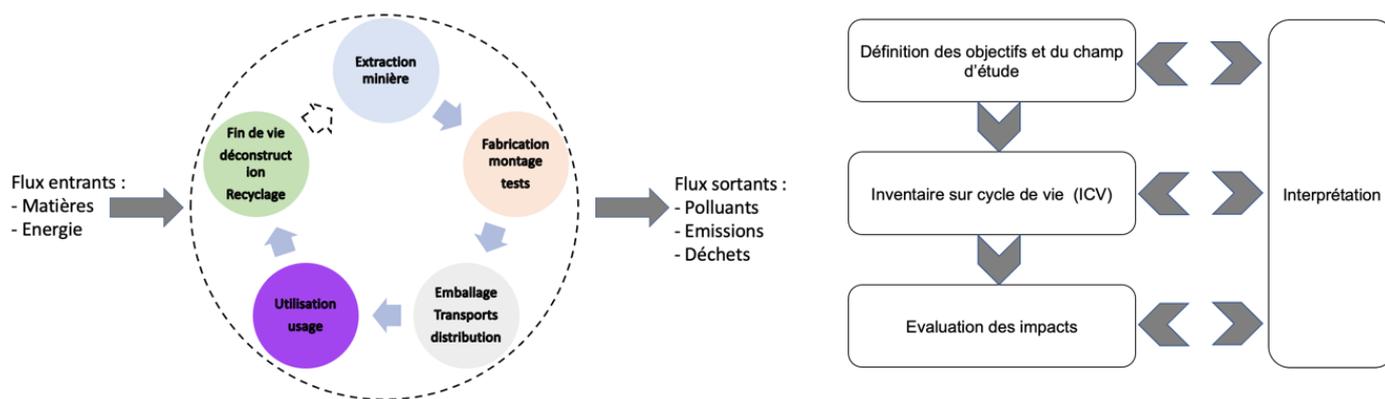


Figure 1 : Illustration du cycle de vie et les étapes d'une ACV

La méthode ACV fait consensus et est applicable à tous les domaines. Elle évite le transfert de pollution, identifie les points faibles et points forts, ainsi que les lacunes de connaissances sur une partie d'un produit. Elle aide à orienter les choix industriels ou publiques.

3.2 - Liste des logiciels disponibles

Il existe de nombreux logiciels pour effectuer une ACV, cependant certains semblent présenter plus d'avantages que d'autres pour le secteur du Génie Electrique. Une liste est présentée dans le tableau 3.

Tableau 3 : Liste des principaux logiciels ACV pouvant être utilisés pour des système électriques.

Logiciel ACV	Simapro	Gabi	OpenLCA	Umberto	EcoDesign Studio	Brightway 2	EIME
Gratuit/Payant	Payant	Payant	Gratuit	Payant	Payant	Gratuit	Payant
Compatibilité BdD	Nombreuses	Gabi	Nombreuses	Ecoinvent, Carbon Minds chemicals databases	Base Impact, (option base ecoinvent, données privées)	Nombreuses	CODDE, ecoinvent, Base Impact, PEF/OEF, Negaocet
Collaboratif	Peu, partage des résultats	Non	Oui, plusieurs méthodes de collaboration	Non	Oui	Oui	Non
Incertitude et étude de sensibilité	Analyse de scénario				Analyse de scénario	Analyse de scénario	
	Monte-Carlo			L'équipe d'assistance d'Umberto peut fournir quelques outils basés sur Excel pour permettre l'analyse de sensibilité		Monte-Carlo	
	Matrice Pedigree	Écart en pourcentage peuvent être utilisés pour les flux d'inventaire.	Matrice Pedigree			Large possibilité d'implémentation grâce à l'utilisation de python	Matrice Pedigree

Remarques	Logiciel d'ACV bien établi et largement utilisé, avec une grande variété de fonctionnalités et de bases de données disponibles.	Une interface utilisateur intuitive, et des fonctionnalités de modélisation avancées.	Open source, gratuit, avec une communauté active de développeurs et d'utilisateurs. Il offre une grande flexibilité pour la modélisation de systèmes complexes.	Une interface utilisateur intuitive et des fonctionnalités avancées pour la modélisation de systèmes complexes.	Ecodesign Studio est conçu pour une ACV simplifiée (l'objectif est de permettre à des non-experts de modéliser correctement un produit).	Open source gratuit, développé pour les besoins spécifiques de l'ACV. Il offre une grande flexibilité pour la modélisation de systèmes complexes, mais nécessite une certaine expérience en modélisation d'ACV et en python.	Les ACV Pep ecopassport (Electric, Electronic and heating & cooling products) sont faits avec.
-----------	---	---	---	---	--	--	--

Il convient de noter que ces logiciels peuvent également être utilisés pour des applications plus générales d'ACV en dehors du Génie Électrique.

3.3 - Liste de bases de données

Les Bases de données (BdD) servent à faciliter la création de l'ICV en permettant de ne pas avoir à lister tous les flux élémentaires (directement puisés ou rejetés dans les milieux naturels) entrants et sortants du système étudié. Les BdD définissent des flux complexes (entre les acteurs intervenant dans le système), ce qui représente une agrégation de flux élémentaires. Une BdD adaptée à un secteur inclut des flux complexes appartenant à ce secteur. Par exemple une BdD spécifique au domaine de l'électronique peut proposer le flux complexe de la diode. Comme pour les logiciels, il existe un grand nombre de bases de données. Le tableau 4 en présente certaines en lien avec le Génie Électrique.

Tableau 4 : Liste de BdD pouvant être utilisées pour des systèmes électriques.

BdD	Gratuit/ Payant	Transparence	Adapté au GE	Nombre de flux	Remarques
Ecoinvent Home - ecoinvent	Payant	Bonne	Electromécanique, électronique, chimie, énergie, etc.	+18000	Complète et permet de modéliser de nombreux processus de production et de consommation. Elle est également transparente quant aux sources de données et aux hypothèses utilisées. Toutefois, elle n'est pas spécifiquement adaptée à l'électronique
Base Empreinte (ADEME) Base Empreinte@ (ademe.fr)	Gratuit	Moyenne	Limité	+1600	Pas exhaustive, cependant, elle permet de modéliser de nombreux processus de production et de consommation. Toutefois, elle n'est pas spécifiquement adaptée à l'électronique. C'est la fusion de la Base Carbone® et la Base IMPACTS®
CODDE LCIE Département CODDE COncception Développement Durable Environnement	Liée à EIME	Bonne	Présence d'une BdD sectorielle : électromécanique.	+800	Exclusif au logiciel EIME
ELCD	Gratuit	Bonne	Traitement en fin de	+300	Cette base de données est développée par

Welcome! - (europa.eu)			vie, transporteurs d'énergie, production de matériaux, etc.		l'Union européenne et contient des données pour de nombreux secteurs, y compris le Génie Electrique.
GaBI Product Sustainability (GaBi) Data Search Sphera	Payant	Oui	Énergies renouvelables, électronique, électricité et TIC, etc.	+15000	La base de données n'est pas spécifique au secteur du Génie Electrique, cependant elle possède un large jeu de donnée dans le domaine.
WEEE LCI Bienvenue sur! - écosystème LCI Database (ecosystem.eco)	Gratuit	Moyenne	Modéliser la fin de vie des équipements électriques et électroniques ménagers et de certains équipements professionnels.	+900	Base de données française d'inventaire du cycle de vie liée à la gestion des équipements électriques et électroniques (EEE) dans le cadre de l'organisation française de la responsabilité des producteurs.
CPM LCA database CPM LCA Database (chalmers.se)	Gratuit	Bonne	Transporteurs d'énergie, technologies ; production de matériaux ; services de transport ; systèmes ; traitement en fin de vie ; Déchets	+500	Base de données en ligne

Pour mieux comprendre, la BdD GaBi est prise en exemple dans le but de décrire comment le secteur du Génie Électrique peut en tirer parti. La BdD présente différents flux complexes liés au Génie Électrique qui sont rangés dans des thématiques spécifiques que l'on appellera fonctions, telles que les diodes, les transistors, les condensateurs, les substrats FR4, etc. Ces mêmes fonctions se déclinent en types, par exemple avec le condensateur, il y a le type aluminium, céramique, tantale, etc. Et pour terminer, on arrive aux flux complexes à utiliser pour l'ACV. La figure 2 présente l'aperçu de l'extension de la base de données « électronique » présente dans le logiciel GaBi. Plus la BdD est complète, plus on pourra être précis dans le choix des composants, sur le type de boîtier, la taille de la puce, la technologie sélectionnée, etc.

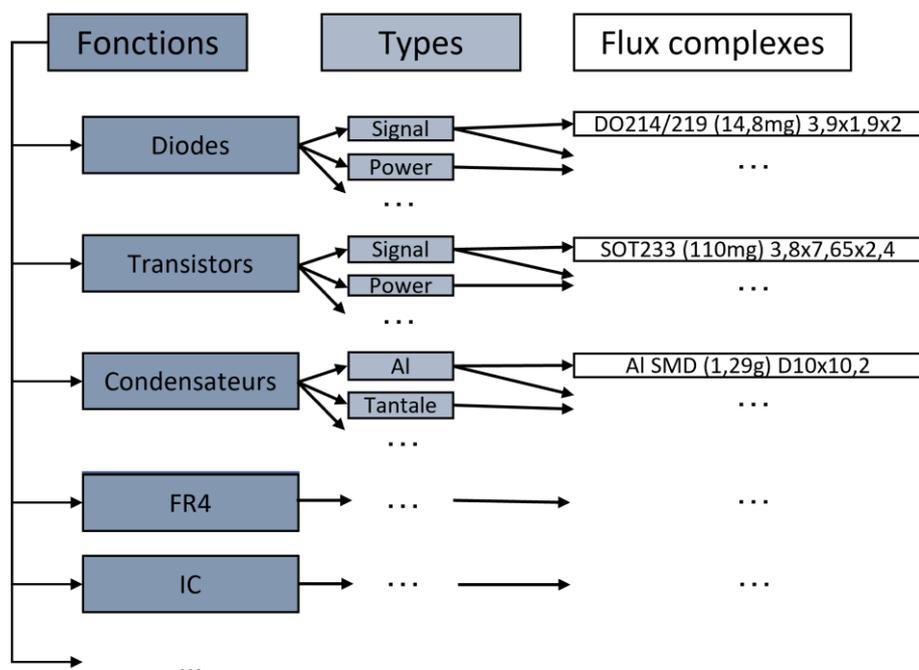


Figure 2 : Aperçu de l'extension de la base de données « électronique » (disponible dans le logiciel GaBi) [4, 5].

Pour décrire plus précisément ce que sont ces flux complexes, la figure 3 représente l'analyse du procédé de fabrication d'un circuit intégré (IC) à l'aide du logiciel GaBi [4]. Il apparaît d'abord que le flux complexe « semi-conducteur » a des entrées, une sortie et des flux en parallèle. Les entrées sont elles aussi d'autres flux complexes qui représentent les besoins nécessaires à la fabrication du circuit intégré. Par exemple avec « wafer » qui cache le procédé pour la fabrication du wafer. Il y a aussi l'utilisation de métaux précieux pour les connexions, le choix du substrat, de la pâte à braser, du boîtier ou de la semelle. À cela se rajoute l'énergie nécessaire à la fabrication du IC. La sortie représente le produit final.

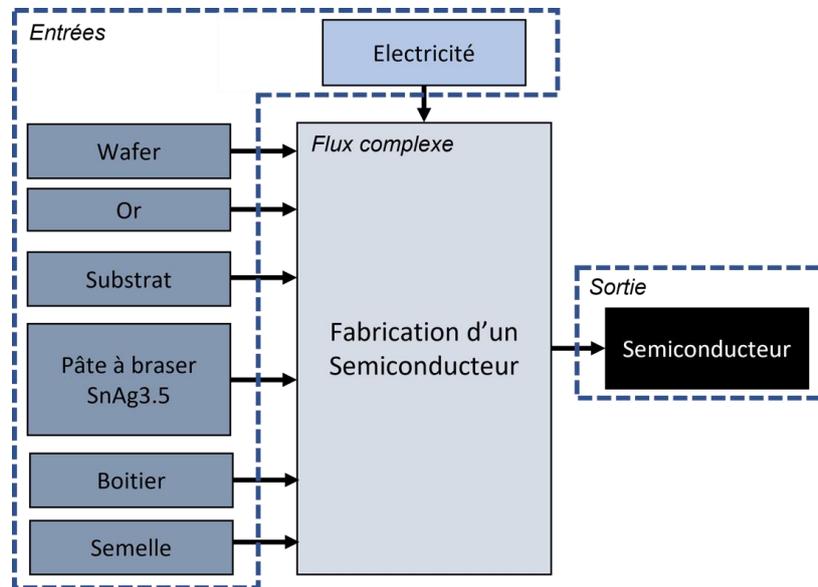


Figure 3 : Conceptualisation du procédé de fabrication d'un circuit intégré à l'aide logiciel GaBi [4].

3.4 - Indicateurs et méthode de caractérisation

Après avoir réalisé l'inventaire (ICV), l'étape 3 consiste à évaluer les impacts environnementaux. Il en existe une grande quantité qui peut être classée en deux catégories (représentées à la figure 4) :

- *Midpoint* (impact intermédiaire) : Impact dans la chaîne de causalité.
- *Endpoint* (dommages finaux) : Dommage à la fin de la chaîne de causalité.

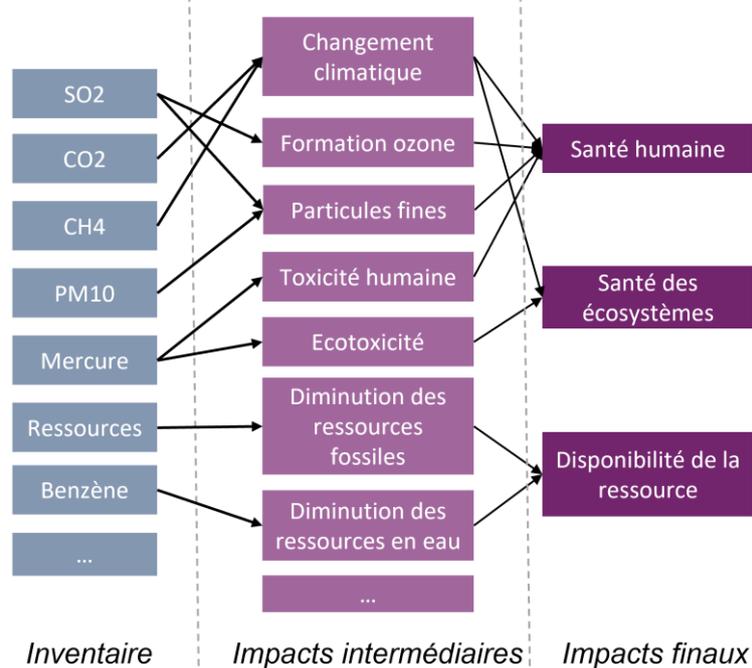


Figure 4 : Catégories d'impacts Midpoint et Endpoint [6].

Les catégories d'impacts sont calculées à partir de méthodes de caractérisation appelées "life cycle impact assessment" (LCIA). Les modèles LCIA peuvent être monocritère (un seul impact environnemental), comme multicritère. L'équation 1 représente le modèle typique d'un impact environnemental pour les méthodes de caractérisation des impacts intermédiaires.

$$SI_i = \sum_s FI_{s,i} \cdot M_s \quad (1)$$

Avec SI_i le score d'impact intermédiaire pour la catégorie i , $FI_{s,i}$ le facteur de caractérisation intermédiaire qui exprime l'importance relative d'une substance dans le contexte d'une catégorie d'impact intermédiaire i et M_s la masse de la substance.

Par exemple pour l'impact sur le changement climatique (pouvoir de réchauffement radiatif à 100 ans, unité de mesure kgCO₂eq), toutes les substances sont caractérisées pour obtenir des kgCO₂eq, le facteur de caractérisation du CO₂ est 1, celui du CH₄ est de 21, etc.

Une fois les impacts obtenus, deux étapes peuvent être ajoutées qui sont la normalisation et la pondération. La normalisation est l'étape au cours de laquelle les impacts environnementaux sont multipliés par des facteurs de normalisation afin de calculer l'ampleur de leur contribution aux catégories d'impact et les comparer à une unité de référence. On obtient des résultats adimensionnels et normalisés. Un exemple est donné à la figure 5 [7] : il représente la normalisation des impacts environnementaux par rapport aux limites planétaires d'un onduleur avec une charge de 150 kW, à partir d'une source d'alimentation en courant continu de 450 V, sur une durée de fonctionnement de 10000 heures. L'exemple est détaillé plus précisément au paragraphe 3.5. La normalisation indique que l'épuisement des ressources minérales et métaux est l'impact le plus important par rapport aux limites planétaires.

Dans l'étape de pondération, les résultats normalisés sont multipliés par une série de facteurs de pondération (en %) qui rendent compte de l'importance relative des catégories d'impact.

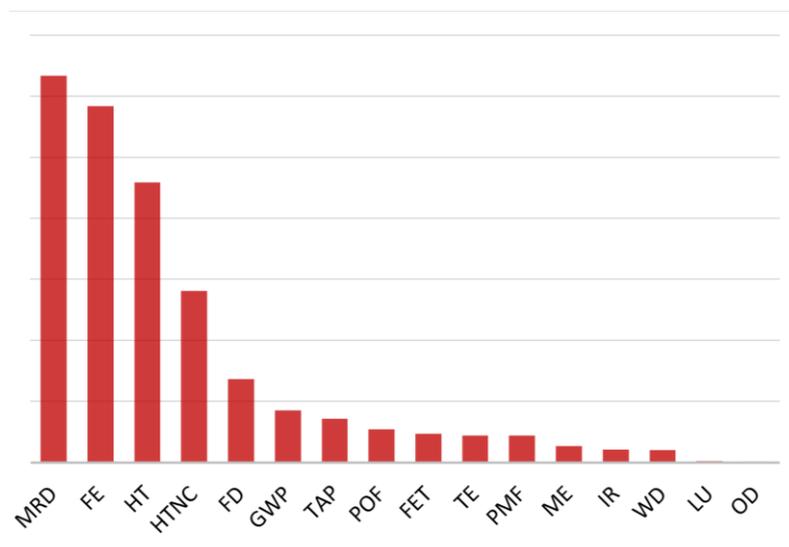


Figure 5 : Hiérarchie des impacts environnementaux avec l'utilisation par rapport aux limites planétaires comme normalisation. Impacts environnementaux calculés pour un point de fonctionnement de l'onduleur avec une charge de 150 kW. Les acronymes sont présentés au tableau 5 [7].

Toutes les méthodes LCIA ne prennent pas en compte tous les flux élémentaires et les éléments du tableau périodique des éléments [8], ce qui peut influencer les impacts environnementaux. Mais aussi les facteurs de pondération des flux élémentaires peuvent évoluer entre les LCIA. Cela amène à des variations d'un impact similaire pour des LCIA différentes [9].

Un choix des catégories d'impacts et des méthodes de caractérisation est à faire par un spécialiste de l'ACV. Cependant, la Commission européenne a présenté une méthode harmonisée de l'empreinte environnementale, le PEF pour "product environmental footprint" [10], afin que tous les acteurs se basent sur les mêmes règles. Le PEF est présenté sous la forme d'un guide et a pour ambition de se décliner par secteur avec le PEFCR (product environmental footprint category rules), un PEF spécifique à une catégorie de produit. Toutes les indications pour effectuer une ACV y sont définies dont les différents impacts environnementaux à étudier (voir tableau 5).

Tableau 5 : Catégorie d'impacts à prendre en compte lors d'une étude PEF [10]

Impacts environnementaux (Midpoint)	Acronyme	Unité	Explication
Changement climatique / Gaz à effet de serre	GWP	KgCO2eq	Le fonctionnement normal de l'effet de serre permet de réguler la température terrestre en retenant une partie de la chaleur émise par la Terre. Cependant, les activités humaines, notamment l'utilisation d'énergies fossiles telles que le pétrole, le gaz et le charbon, perturbent cet équilibre et accentuent l'effet de serre. Le dioxyde de carbone (CO2) est le principal gaz à effet de serre responsable de près des deux tiers des émissions mondiales. C'est pourquoi on utilise souvent l'équivalent CO2 (eqCO2) pour quantifier les émissions de gaz à effet de serre.
Appauvrissement de la couche d'ozone	OD	kg CFC-11eq	La couche d'ozone protège les êtres vivants des rayons ultraviolets (UV) nocifs du soleil. Cependant, les activités humaines ont produit des substances qui appauvrissent cette couche, appelées "substances appauvrissant la couche d'ozone" (SACO) telles que le chlore et le brome. Les chlorofluorocarbures (CFC) sont les SACO les plus couramment produits. En conséquence, cela peut entraîner des brûlures superficielles, des conjonctivites, des cataractes, une augmentation des cancers de la peau et des maladies du système immunitaire. De plus, la réduction de la photosynthèse due à l'appauvrissement de la couche d'ozone peut affecter la qualité et les rendements des cultures ainsi que la chaîne alimentaire aquatique en faisant disparaître le plancton.
Toxicité humaine, cancer	HT	CTUh	Évalue les impacts sur la santé humaine causés par l'exposition chronique à des substances cancérigènes ou non émises dans l'environnement. Estime l'augmentation probable de la morbidité (nombre de personnes malades) pour l'ensemble de la population humaine. (CTU = Comparative toxic units)
Toxicité humaine, autre que cancer	HTNC	CTUh	
Particules	PM	Incidence des maladies	L'émission de particules fines est reconnue comme l'un des facteurs les plus importants contribuant à la mortalité mondiale.
Rayonnement ionisant, santé humaine	IR	kBq U235 eq	Certains éléments chimiques sont instables et peuvent émettre des rayonnements dangereux tels que les rayons alpha, bêta, gamma, X ou neutrons. La mesure de cette activité radioactive se fait en Becquerel (Bq), qui représente le nombre de désintégrations atomiques par seconde.
Formation d'ozone photochimique, santé humaine	POF	Kg COVNMeq	Il s'agit de la formation d'ozone à partir de polluants primaires. L'ozone provoque des effets néfastes sur la santé humaine et sur les végétaux (pollutions estivales). Le COVNM (Composés Organiques Volatils Non Méthaniques) est l'unité de mesure, car le méthane qui est aussi un composé organique volatil à une influence sur l'environnement différente, c.-à-d. effet de serre.
Acidification	TAP	Mole H+ eq	La concentration en ions H+ définit l'acidité : plus la concentration en H+ est forte, plus le pH est faible et plus l'acidité augmente. Cela a un impact direct sur la biodiversité.

Eutrophisation - terrestre	TE	Mole Neq	C'est l'accumulation de nutriment dans un milieu, dû principalement dû au rejet phosphate et nitrate, rejet agricole. Concrètement, l'eutrophisation terrestre favorise par exemple la croissance des espèces dites « mange-lumière » aux dépens d'autres espèces privées, de fait, de lumière.
Eutrophisation, eaux douces	FE	Kg Peq	Trop de nutriment amène à la prolifération de certains végétaux, le plus souvent des algues.
Eutrophisation, marine	ME	Kg Neq	Conséquence : Il n'y a plus d'oxygène dans les milieux aquatiques, les autres espèces meurent.
Écotoxicité, eaux douces	FET	CTUe	Évalue la toxicité de l'émission de substances sur les écosystèmes. Caractérise les risques induits par la présence des composés chimiques dans un système écologique spécifique.
Utilisation des terres	LU	Adimensionnelle (pt), kg production biotique, kg sol, m3 d'eau, m3 d'eaux souterraines	Quantifie l'occupation d'une certaine surface pendant un temps donné ainsi que la variation de la qualité du sol pendant cette occupation.
Consommation d'eau	WD	m3 équivalent monde (m3 world eq)	Quantifie la déplétion des ressources en eau. Peut prendre en compte la précarité de la ressource dans certaines zones géographiques si l'inventaire le permet.
Épuisement des ressources, minéraux et métaux	MRD	Kg Sbeq (masse d'antimoine équivalente)	Quantifie la déplétion des ressources naturelles. Prend en compte la précarité de la ressource.
Épuisement des ressources, matières fossiles	FD	MJ	

3.5 - Règles d'or dans les ACV en Génie Électrique

La dernière étape de l'ACV est l'interprétation des résultats, mais d'ores et déjà il existe 5 facteurs dans le domaine du Génie Électrique qui font grimper les impacts environnementaux [4], que voici :

1. L'énergie électrique : la consommation électrique correspondant aux pertes peut être prépondérantes au niveau des impacts devant la fabrication en fonction du type de produit et de son cycle de fonctionnement. Un système avec un mode veille performant et peu de perte est à privilégier.
2. La masse : plus la masse est élevée, plus la consommation d'énergie et de matière lors de la fabrication sont importants.
3. Le volume du PCB : les PCB peuvent être composés de plusieurs couches. Une augmentation du nombre de couches amène à une augmentation du nombre d'étapes de fabrication, d'énergie et de matériaux dont des matériaux parfois précieux comme l'or, voire le facteur n° 5.
4. Le nombre et le type du composant à semi-conducteur : la taille de la puce détermine en grande partie l'impact du composant à semi-conducteur, en raison des opérations à forte intensité énergétique qui se déroulent en amont (*wafer fab*). Les circuits intégrés contiennent de l'or, de l'argent et d'autres métaux précieux, voire le facteur n° 5.

5. Les matériaux précieux : les métaux précieux ont les impacts les plus élevés par masse (produits de base). Plus l'électronique est petite (miniaturisation), plus la pureté et les métaux précieux sont utilisés par rapport à la masse totale de l'électronique.

Pour aller plus loin ...

L'évaluation environnementale des systèmes électriques est un domaine complexe et en constante évolution, qui pose de nombreux défis pour les chercheurs et les professionnels de l'industrie [11, 12]. L'un des principaux défis est le manque de complétude et l'âge des données disponibles pour l'analyse. Les données doivent être récoltées de manière rigoureuse, ce qui est souvent coûteux et prend du temps. Une façon de pallier cette limite est la prise en compte des incertitudes dans le résultat final à travers une analyse d'incertitude et de sensibilité. De plus, il y a un manque de compatibilité entre les études, ce qui rend difficile la comparaison des résultats. Un autre défi important est la modélisation de l'inventaire, qui nécessite la prise en compte de nombreux paramètres complexes et variables. Aussi il est souvent difficile de critiquer ses propres résultats, ce qui peut entraîner des biais dans l'analyse. Enfin, l'utilisation de deux approches différentes en ACV : Conséquentielle et Attributionnelle. L'objectif de la première approche est de modéliser l'ensemble des impacts environnementaux consécutifs à un changement survenant dans le cycle de vie d'un produit. L'objectif est donc sensiblement différent de celui d'une ACV Attributionnelle qui consiste à étudier le cycle de vie d'un produit.

Malgré ces défis, l'ACV reste un outil essentiel pour évaluer les impacts environnementaux des systèmes électriques et trouver des solutions pour les minimiser.

À retenir

- L'ACV évalue les impacts environnementaux d'un produit tout au long de son cycle de vie, de l'extraction des matières premières à l'élimination en fin de vie.
- Des logiciels ACV, tels que Simapro, Gabi, OpenLCA, sont disponibles, chacun ayant ses avantages et inconvénients pour le Génie Électrique.
- Les bases de données regroupent des flux complexes liés au secteur, comme Ecoinvent, Base Empreinte, CODDE, facilitant ainsi la création de l'inventaire.
- Les impacts environnementaux sont classés en catégories d'impacts midpoint (intermédiaires) et endpoint (finaux), évalués grâce à des méthodes de caractérisation, avec la possibilité d'appliquer la normalisation et la pondération.
- Des règles d'or à destination du concepteur en Génie Électrique permettent de connaître les facteurs aggravant les impacts environnementaux.

4 - Écoconception et économie circulaire de systèmes électriques

Les efforts d'écoconception pour les systèmes électriques sont portés sur plusieurs domaines clés, tels que :

- L'efficacité énergétique : Les efforts ont été faits pour maximiser l'efficacité énergétique des produits électroniques de puissance. Les concepteurs cherchent à minimiser les pertes énergétiques structurellement ou en optimisant la gestion du convertisseur.
- Les matériaux : Les matériaux utilisés dans les produits électroniques de puissance peuvent avoir un impact significatif sur l'environnement. Les concepteurs cherchent à utiliser des matériaux recyclables et à réduire l'utilisation de matériaux nocifs pour l'environnement, tels que le plomb, le mercure et le cadmium.

- Les procédés de fabrication/montage/déconstruction : Les procédés de fabrication sont optimisés pour devenir plus durables, en réduisant la consommation d'énergie, en minimisant les déchets générés et en favorisant des pratiques de démontage et de recyclage efficaces.
- Dimensionnement : Les paramètres dimensionnels sont modifiés en lien avec une approche d'éco-optimisation en maximisant des critères issus du cahier des charges fonctionnel et en minimisant des critères environnementaux sur cycle de vie.
- La durée de vie : Les produits électroniques de puissance ont une durée de vie limitée, qui peut avoir un impact important sur l'environnement en fin de vie. Les concepteurs cherchent à prolonger la durée de vie des produits électroniques de puissance et à faciliter le recyclage et la réutilisation des composants électroniques.
- La gestion de la chaleur : Les produits électroniques de puissance génèrent de la chaleur qui peut être nuisible pour les composants électroniques. Les concepteurs cherchent à améliorer la gestion de la chaleur dans les produits électroniques de puissance pour réduire les défaillances et prolonger la durée de vie.
- La réparabilité : Les produits électroniques de puissance sont souvent difficiles à réparer, ce qui peut entraîner une augmentation des déchets électroniques. Les concepteurs cherchent à améliorer la réparabilité des produits électroniques de puissance en concevant des produits modulaires et en utilisant des méthodes de fabrication qui facilitent la réparation.

La figure 6 présente le fonctionnement de l'écoconception de systèmes électriques. Une fois les efforts d'écoconception fournis, il est nécessaire de les quantifier grâce à la méthode ACV afin de vérifier le gain environnemental et les potentiels effets rebonds. L'écoconception consiste en la résolution d'un problème multicritères. Une vision globale est alors indispensable. Par exemple choisir d'améliorer l'efficacité énergétique influencera le dimensionnement et la durée de vie du système. Minimiser les pertes peut se faire avec l'augmentation du niveau de pureté des matériaux utilisés, en augmentant l'intégration, mais cela augmente la consommation de ressources, les efforts à la production, les difficultés de réparation et de recyclage.

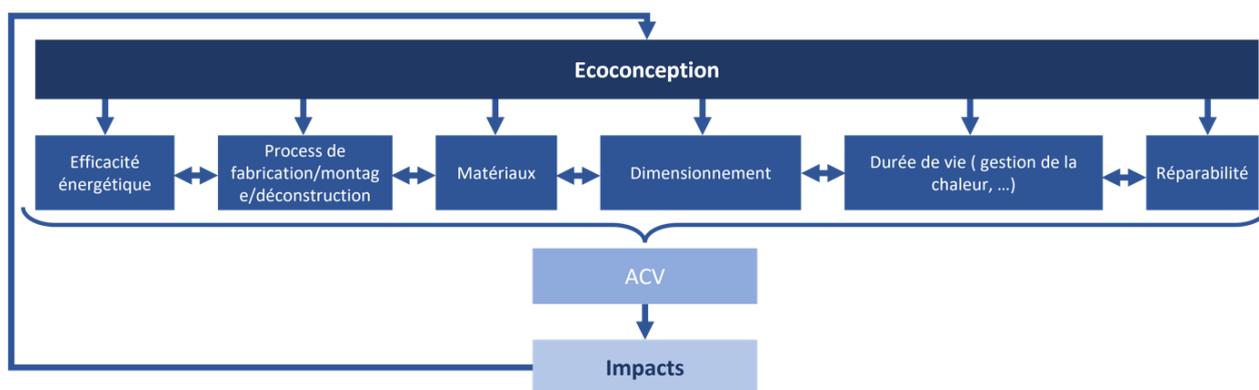


Figure 6 : Principe de l'écoconception des systèmes électriques.

Les initiatives d'écoconception pour les systèmes électriques ont entraîné des améliorations significatives en termes d'efficacité énergétique et de réduction de l'utilisation de matériaux nocifs pour l'environnement. Cependant l'écoconception dans le domaine peut prendre d'autres formes et est aujourd'hui étudiée au niveau des laboratoires pour les systèmes électriques [14], une liste des thématiques est présentée ci-dessous.

- Rendement : pour réduire la consommation et la pollution, il est possible de choisir une topologie de convertisseur adéquate, en optimiser la conception électrique et la commande,

ou encore changer de technologie (par exemple, en optant pour des composants à semiconducteurs à grand gap, SiC ou GaN au lieu du silicium).

- Écofiabilité : ce domaine combine l'optimisation et la fiabilité en se demandant s'il est préférable d'utiliser un composant fiable, mais coûteux en matières premières, ou un composant peu fiable, mais peu coûteux.
- Conception multiusage : cette branche étudie l'économie circulaire, avec notamment des pratiques de revalorisation et de réutilisation (Figure 7). Plus le cercle est petit, plus l'économie circulaire est efficace. La circularité peut être organisée dans l'optique de repenser, de prolonger ou d'optimiser la fin de vie de produit [14, 26].
- Éco-dimensionnement : en jouant sur les paramètres dimensionnels des produits, il est possible d'optimiser les impacts environnementaux. La section suivante présentera un exemple du Génie Électrique.

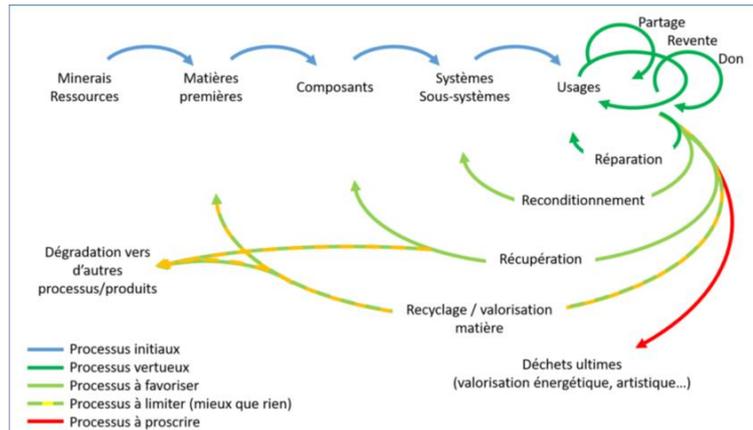


Figure 7 : Cycle de vie d'un système électrique dans une économie classique ou circulaire [20].

Les différents outils d'écoconception qui existent sont présentés dans la référence [20]. Pour la plupart ils sont applicables aux systèmes électriques, ils peuvent être déclinés en quatre catégories :

- Les outils d'évaluation,
- De préconisation,
- De sensibilisation,
- De communication.

À retenir

- Les efforts d'écoconception visent à maximiser l'efficacité énergétique, réduire l'utilisation de ressources, optimiser les processus de fabrication, prolonger la durée de vie, et favoriser la réparabilité des systèmes électriques.
- L'écoconception nécessite une vision globale et peut aboutir à des compromis, par exemple, entre l'efficacité énergétique et la consommation de ressources.
- Différents outils d'écoconception existent, tels que les outils d'évaluation, de préconisation, de sensibilisation et de communication.
- Le recyclage et la réparation en fin de vie sont des pratiques encourageantes pour réduire l'impact environnemental, mais le recyclage des produits électriques reste complexe en raison de la dispersion des matériaux, de la haute entropie des alliages, et de la dégradation d'usage.
- Pour une économie circulaire efficace, il est essentiel de renforcer les infrastructures de collecte et de traitement des déchets électriques, développer des technologies de recyclage avancées, et intégrer l'écoconception pour optimiser la fin de vie des produits.

5 - Exemples d'études

Bien que relativement confidentielle, quelques études ACV de composants du Génie Électrique sont publiées soit par des industriels, soit par des académiques. Un état des lieux spécifique pour l'électronique de puissance est proposé dans une très récente publication [14] par les membres d'un groupe de travail dénommé « Convertisseurs Électroniques de Puissance Plus Soutenables (CEPPS) » du GDR SEEDS

Dans cette section, nous allons illustrer un certain nombre d'études issues de la bibliographie. Nous commencerons par des exemples liés aux matériaux du Génie Électrique puis des exemples relatifs à quelques dispositifs électriques. Les premiers exemples se limitent à la phase de fabrication (hors usage). La phase d'utilisation est liée aux conditions d'utilisation et donc très spécifiques à l'exemple traité, c'est-à-dire peu généralisable.

5.1 - Impacts à la fabrication des cartes électroniques et principaux composants

La figure 8 représente les impacts environnementaux liés aux cartes de commande (1 carte de commande rapprochée et 1 carte logique) d'un onduleur de voiture électrique de 150 kW [7]. L'ACV complète d'un l'onduleur IGBT est présentée au paragraphe 5.2. La carte driver a une surface de 150 cm² et la carte logique de 70 cm². Le tableau 6 montre les différentes masses totales des sous-parties présentes sur les PCB. D'après la figure 8, pour les différents impacts environnementaux, les circuits intégrés et le matériaux FR4 avec les pistes de cuivre sont les principaux hotspots avec respectivement ≈50% et ≈20% des impacts.

Tableau 6 : Masse totale des différentes composantes des cartes de commande.

	Circuit intégré	Condensateur	Diode, led	Bobine	Résistance	Brasure	Transistor	Transformateur	Connecteurs, Interrupteurs
Masse (g)	10.2	12.8	4.4	0.4	1.3	2.0	1.8	30.0	23.1

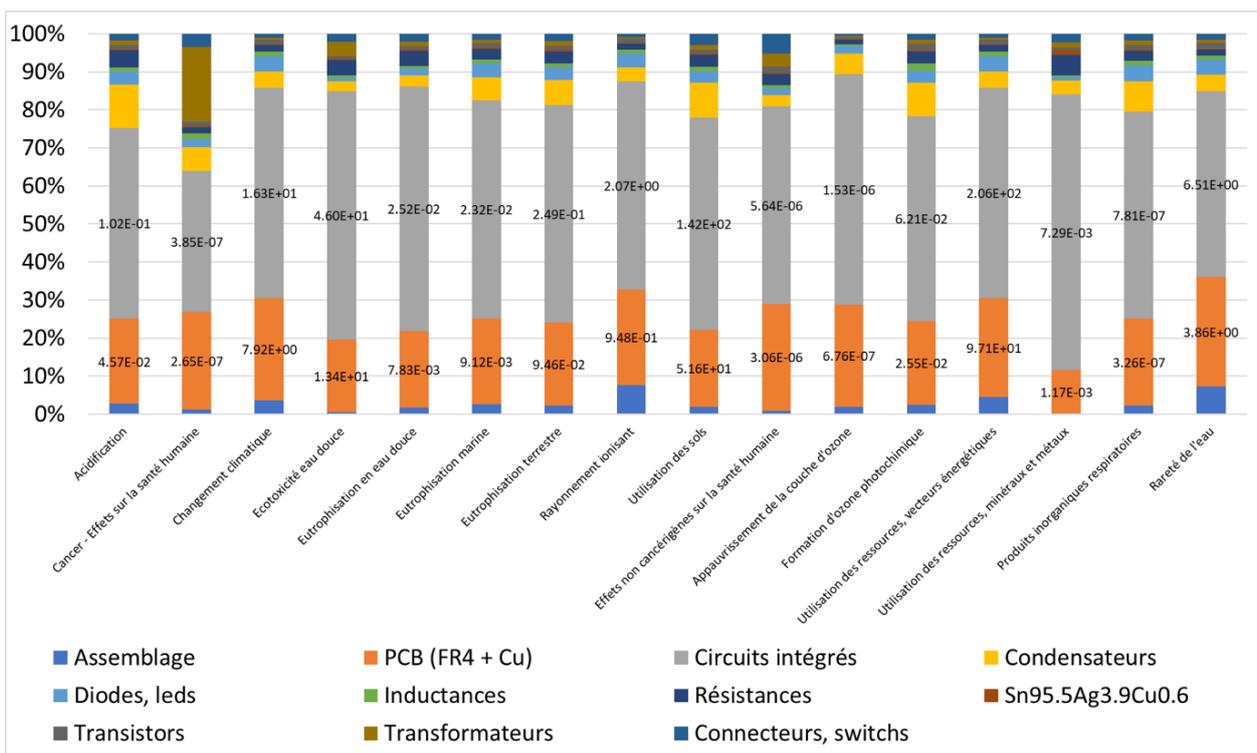


Figure 8 : Impacts environnementaux à la fabrication des cartes de commande pour un onduleur de voiture électrique de 150 kW [7].

5.2 - ACV d'un onduleur IGBT pour véhicule électrique

Cette étude issue de [7] présente l'ACV d'un onduleur de véhicule électrique. Cette ACV est réalisée selon plusieurs étapes, précises :

- La première étape consiste en la mise en place du champ d'étude : l'unité fonctionnelle est définie comme suit : un onduleur triphasé AC capable de fournir une puissance de 150 kW (pour une machine électrique), fonctionnant avec une tension continue moyenne de 450 V pendant 15 ans avec 10000 heures de fonctionnement.
- La deuxième étape est la création de l'inventaire sur cycle de vie. Différentes références bibliographiques ont été utilisées afin de construire l'inventaire sur cycle de vie (ICV). On peut citer les principales sources de données provenant de l'Hybrid pack drive [17], qui représente un onduleur formé d'un refroidisseur, d'un module de puissance, d'une capacité de bus et de carte de commande. Des données provenant de l'étude menée par System Plus Consulting (société spécialisée en rétro-ingénierie, basée à Nantes, France) sur le FS820R08A6P2B HybridPACK Drive 750 V IGBT, le module de puissance [18]. Des données *open access* provenant d'un inventaire de mise à l'échelle pour onduleur de véhicule électrique proposé par l'université Chalmers [13].
- La troisième étape sert à l'évaluation des impacts environnementaux. Le logiciel open-source OpenLCA et la base de données Ecoinvent ont été utilisés couplés avec la méthode de caractérisation des impacts proposé par le PEF.

Comme présenté précédemment, il est possible de hiérarchiser les impacts environnementaux grâce à la normalisation. La normalisation par rapport aux limites planétaires est utilisée dans l'étude. Le résultat indique l'épuisement des ressources minérales (MRD) comme le plus important, suivi de l'eutrophisation des eaux douces et les aspects liés à la toxicité humaine, aux cancers et aux maladies non cancéreuses. Le changement climatique est en 6ème position.

La figure 9 présente les impacts environnementaux sur cycle de vie, la fabrication et l'utilisation sont les deux sous-sections qui se distinguent le plus avec les impacts environnementaux les plus élevés. L'épuisement des ressources minérales est largement dominé par la fabrication (environ 94 %), principalement par le module de puissance (environ 43 % de la fabrication totale), pour lequel les contacts électriques et la plaque de base constituent les principales causes (environ 53 % et 31 % du module de puissance, respectivement). Vis-à-vis des autres impacts au niveau de la fabrication, le boîtier en aluminium, la capacité de bus et le busbar peuvent être définis comme éléments dominants (hotspots). Ces résultats permettent d'orienter une action d'écoconception, avec des technologies capables de proposer une évolution des hotspots, tels que des modules de puissance intégrés ou sans semelle. Bien évidemment il faudra vérifier que la solution proposée soit réellement bénéfique. Un autre aspect devra également être considéré. Il s'agit du vieillissement des composants, aussi bien en usage qu'en calendrier [15]. Cet aspect impacte à la fois le remplacement des composants défectueux (surcoût des impacts à la fabrication) mais aussi la technique de diagnostic utilisable (intérêt à la réparabilité).

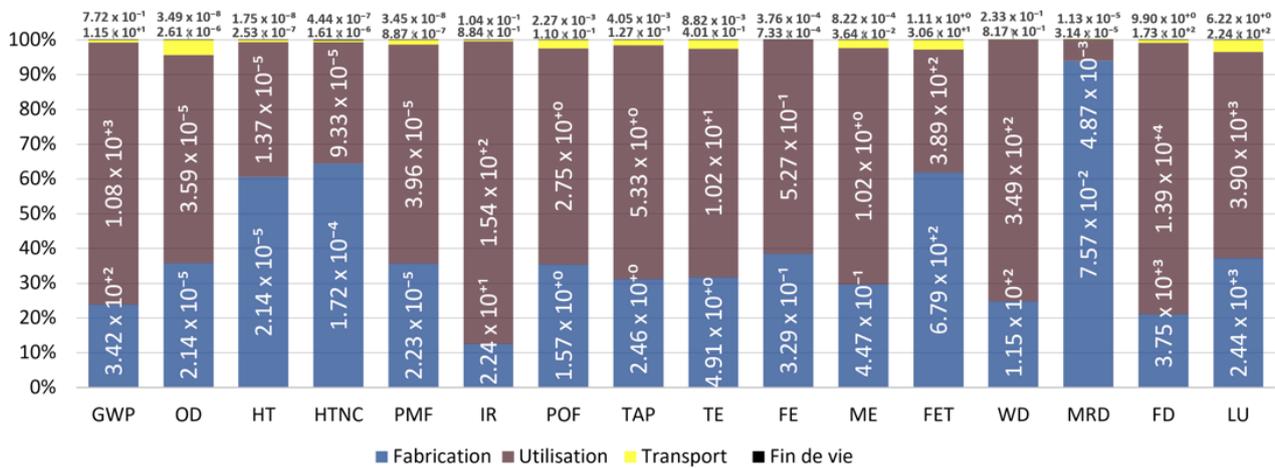


Figure 9 : Impacts environnementaux liés à l'onduleur de 150 kW.
Les acronymes sont présentés tableau 5 [7].

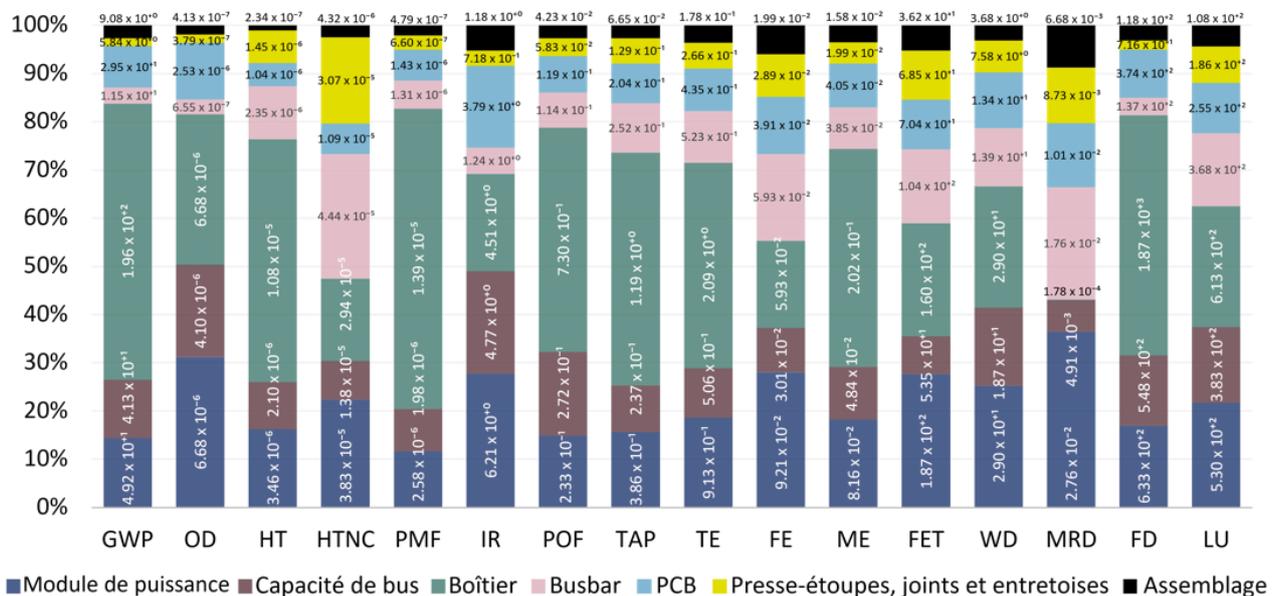


Figure 10 : Impacts environnementaux liés à la fabrication de l'onduleur de 150 kW.
Les acronymes sont présentés tableau 5 [7]

5.3 - ACV des moteurs électriques à aimants permanents pour VE

Ici, il s'agit d'une étude ACV complète d'un moteur électrique synchrone à aimants permanents (PMSM) pour véhicules électriques [16]. Dans la référence précitée, trois options de moteur électrique ont été comparées dans l'étude : (1) un PMSM équipé d'aimants Nd(Dy)FeB, (2) un PMSM équipé d'aimants SmCo₅, et (3) un moteur synchrone-réductant (SynRM) assisté par aimants permanents de type céramiques en Sr-ferrite.

Un certain nombre de paramètres de performance ont été maintenus constants entre les solutions comparées : tous les moteurs peuvent fournir et gérer le même décollage (c'est-à-dire la même capacité à fournir un couple pour l'accélération de 0 à 50 km/h en 3,2 à 3,3 s pour toutes les options), la vitesse maximale (145 km/h) et les points de fonctionnement du cycle de conduite choisi pour l'évaluation de l'efficacité énergétique en phase d'utilisation : le "cycle d'essai mondial harmonisé pour la conduite de véhicules utilitaires légers" (WLTC).

Cependant, les machines ont été autorisées à différer en termes de performances d'accélération au-delà de la vitesse de base nominale, et elles présentent des puissances nominales de pointe

légèrement différentes : 100 kW pour le PMSM Nd(Dy)FeB, 97 kW pour le PMSM SmCo₅ et 95 kW pour le SynRM Sr-ferrite assistée par PM.

L'unité fonctionnelle est un kilomètre parcouru. Chaque moteur répondant aux paramètres de performance susmentionnés a été supposé résister à une distance totale de 200 000 km sur le cycle de conduite sélectionné (le WLTC) pendant toute sa durée de vie. Notons que dans cette étude, afin que les résultats soient facilement comparables, l'énergie nécessaire pour la propulsion du véhicule n'est pas intégrée au bilan, seules les pertes énergétiques dans toute la chaîne électrique (y compris l'énergie nécessaire pour transporter sa propre masse en termes de résistance au roulement) sont prises en compte.

Les résultats, obtenus en utilisant la base de données Ecoinvent 3, sont illustrés à la figure 11.

Les phases de production (à l'exception des aimants) et d'utilisation sont modélisées pour deux pays - la Suède et les États-Unis - afin d'illustrer les effets des différentes sources d'approvisionnement en électricité. Les impacts sur le changement climatique et la toxicité humaine se sont avérés les plus importants. La fabrication complète se situe entre 1,7 et 2,0 g d'équivalent CO₂/km pour toutes les options de motorisation (source électrique : Suède). Le SynRM assisté par des aimants présente le rendement le plus élevé et les émissions de CO₂ les plus faibles. La production de cuivre est importante du point de vue de la toxicité et des effets sur la santé humaine, avec des émissions problématiques lors de l'exploitation minière. Les résultats en matière d'épuisement des ressources divergent en fonction de la méthode d'évaluation. Mais une analyse de sensibilité a montré que d'autres résultats étaient robustes. Les principaux objectifs de conception des moteurs sont identifiés : haute efficacité énergétique, boîtiers minces, enroulements terminaux compacts, laminés segmentés pour réduire les déchets de production, et facilité de démontage.

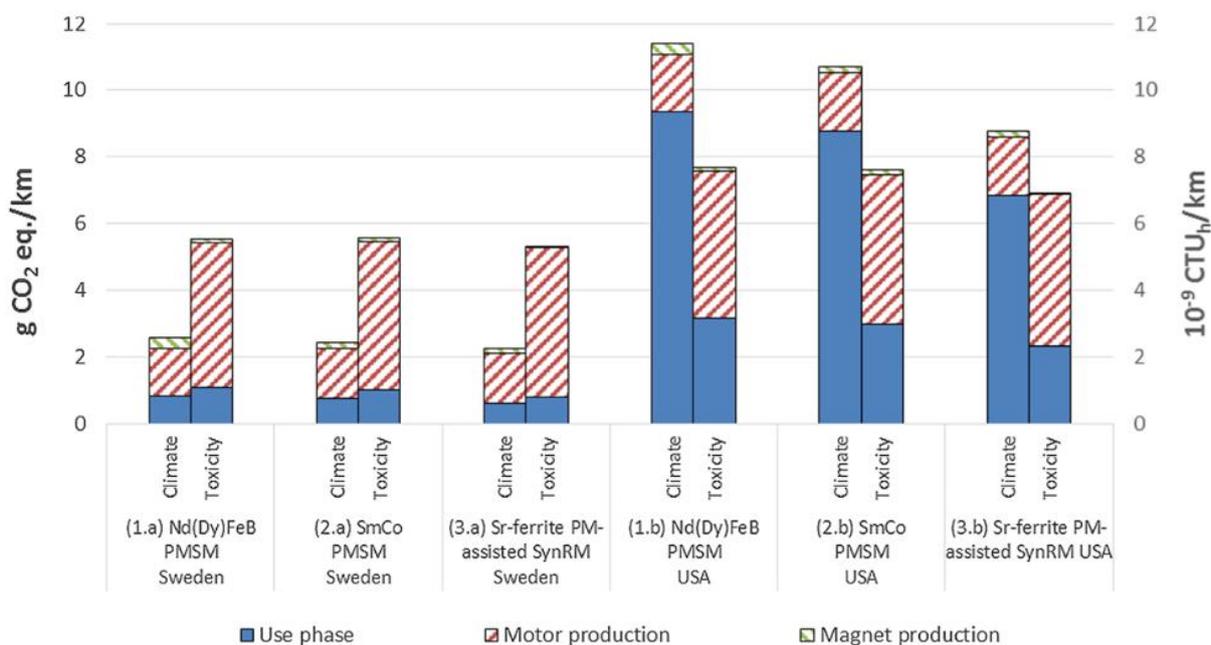


Figure 11 : Impacts (changement climatique et toxicité humaine) liés au véhicule électrique avec différentes motorisations (hors énergie nécessaire à la propulsion du véhicule) [16]

5.4 - ACV de modules Photovoltaïques

Les émissions de dioxyde de carbone sur l'ensemble du cycle de vie correspondent aux émissions causées par la production, le transport ou l'installation de matériaux liés aux systèmes photovoltaïques. Outre les modules eux-mêmes, l'installation typique comprend un câble électrique et un support métallique. Les systèmes photovoltaïques au sol comprennent également une

fondation en béton. Les installations éloignées peuvent nécessiter une infrastructure supplémentaire pour la transmission de l'électricité au réseau électrique local. Outre les matériaux usités précisés à la figure 12, l'analyse du cycle de vie doit prendre en compte le dioxyde de carbone émis par les véhicules lors du transport des modules photovoltaïques entre l'usine, l'entrepôt et le site d'installation.

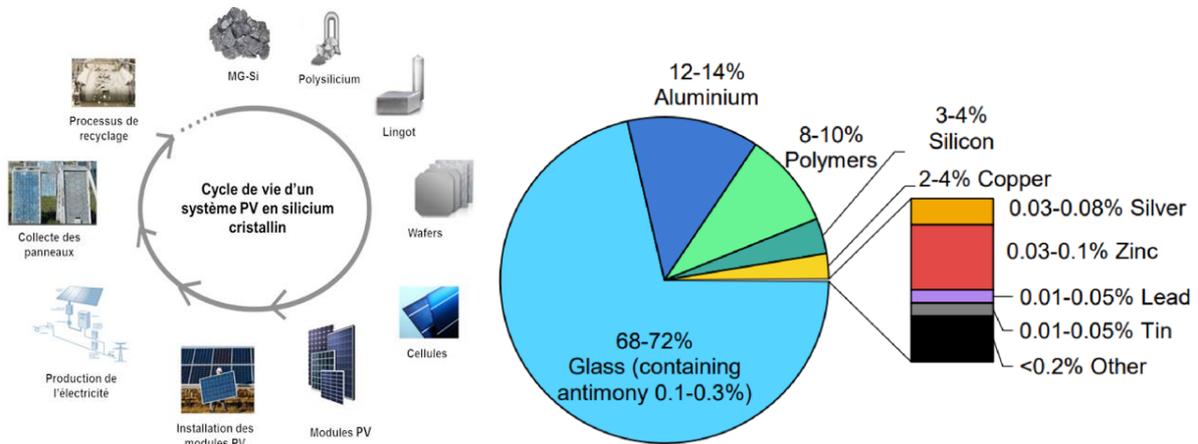


Figure 12 : Cycle de vie d'un panneau PV et répartition en masse des matériaux composant un module PV en silicium [19]

La référence [19] a montré qu'à l'exception des impacts liés à la toxicité humaine, la phase de fabrication correspond à 60% des impacts et la phase d'installation à 40%. De grandes quantités d'énergie et donc des émissions de CO2 sont utilisées pour convertir le sable siliceux en silicium de haute pureté nécessaire à la fabrication des cellules photovoltaïques. L'assemblage des modules photovoltaïques est une autre étape à forte intensité de ressources, avec l'ajout d'un cadre en aluminium à haute teneur énergétique et d'une protection en verre. On estime l'impact CO2 à 420 kqCO2-ég par kWc fabriqué [27].

La figure ci-dessous issue de [47] détaille la contribution normalisée de chaque étape de fabrication (purification du silicium, sa cristallisation, sa découpe en brique, la découpe en wafer, mis en place des cellules, interconnexion et encapsulation des cellules) et d'installation d'un panneaux PV mono-cristallin.

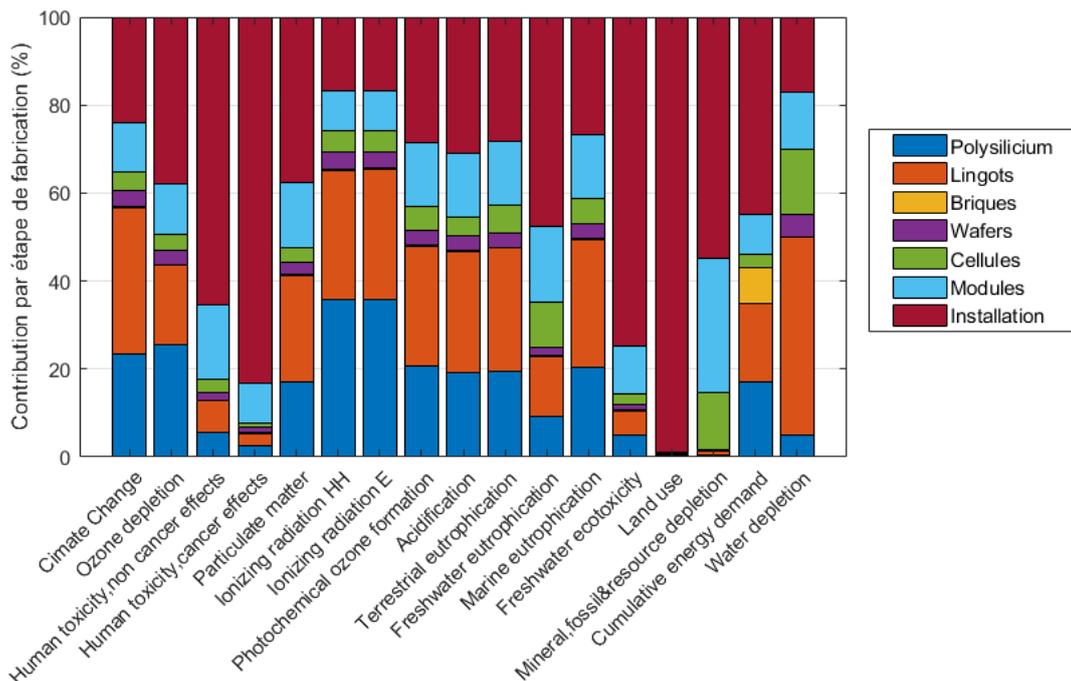


Figure 13 : Contribution des procédés de fabrication dans les impacts environnementaux normalisés du système PV mono-Si monofacial [19]

Signalons enfin que bien que la durée de vie d'un panneau solaire aujourd'hui dépasse les 20 ans, le recyclage des modules photovoltaïques en fin de vie attire l'attention des chercheurs en raison tout d'abord des déchets électroniques engendrés. D'ici la fin de l'année 2050, on prévoit qu'environ 10 % des déchets électroniques seront générés par des modules photovoltaïques dégradés). En raison également des matériaux précieux qu'ils contiennent. Le recyclage des panneaux PV devient alors un enjeu majeur. Ce recyclage est une combinaison de processus chimiques, physiques et thermiques à optimiser afin de minimiser les coûts et les impacts globaux sur l'environnement [28].

6 - Conclusion

Tout d'abord, n'oublions pas qu'en Génie Électrique particulièrement, toute manipulation énergétique a des conséquences sur l'environnement (dont nous faisons partie) ! On ne pourra pas éliminer ces conséquences mais il s'agit, dans une pratique écoresponsable, de les réduire au strict minimum pour assurer le service alloué.

Longtemps considérés comme solutions naturelles et évidentes de réduction de nos impacts environnementaux (outils d'efficacité énergétique, dispositifs de développement des énergies renouvelables), les dispositifs du Génie Électrique, particulièrement ceux de grande série, ne sont pas moins sources de pollutions et d'impacts environnementaux. Ils doivent aujourd'hui prendre leur part dans l'effort de réduction de ces impacts au niveau de chaque phase de leur vie.

L'écoconception des systèmes électriques en est à ses prémices, et le travail effectué est aujourd'hui principalement concentré sur la valorisation de matières et sur l'efficacité énergétique. Mais il faut dépasser ce stade en adoptant des stratégies à déployer en amont avec toutes les parties prenantes de la chaîne de valeur [24], telles que :

- Optimisation de la durée de vie : assurer que tous les composants ont une durée de vie similaire et limiter les risques de défaillance.
- Modularité : concevoir des configurations modulaires pour faciliter la maintenance, le recyclage, la réutilisation des fonctions et des matériaux [23].
- Réparabilité : faciliter les réparations en proposant des solutions de diagnostic, des pièces standardisées et une fiabilité accrue.
- Conception pour plusieurs cycles de vie : concevoir des produits qui peuvent être réparés, mis à jour, adaptés, compatibles avec les normes environnementales et les pratiques d'entretien.
- Reconditionnement : reconcevoir les produits pour faciliter le processus de reconditionnement, du démontage à l'inspection, en passant par le nettoyage, le reconditionnement et le réassemblage [26].
- Mise à jour : concevoir des produits pouvant être mis à niveau et réutilisés pour d'autres fonctions ou usages.
- ...

Ces principes de conception écoresponsable visent à créer des produits durables, fiables, adaptatifs et réparables, afin de réduire les déchets et l'impact environnemental lié à la production et à l'élimination des produits.

Notons également l'effet rebond. L'amélioration d'un des impacts environnementaux peut amener à un transfert de pollution en dégradant les autres impacts. C'est pourquoi il est indispensable d'adopter une vision exhaustive des impacts environnementaux, de considérer l'ensemble du cycle de vie et d'anticiper les répercussions potentielles.

D'autre part, il est également important de noter le manque de données notamment liés aux procédés de fabrication de composants électriques. Les bases de données existantes en GE sont à la fois à robustifier mais aussi à compléter. Les industriels et les laboratoires de recherche doivent combiner leurs efforts pour enrichir ces BdD et mettre à disposition des données fiables et complètes. Sans cela, les objectifs d'un Génie Électrique au service de la soutenabilité seraient vains.

Ces thématiques d'écoconception de dispositifs de Génie Électrique constituent donc de formidables opportunités tant académiques (recherche et formation) qu'industrielles. C'est en effet une source riche de créativité et d'innovation dans les concepts, les process de fabrication, de montage et de déconstruction, dans les méthodologies et dans les usages. Cela permet aussi de revisiter nos approches. Par exemple, l'efficacité de fonctionnement et l'intégration sont, jusqu'ici deux objectifs majeurs que la communauté de Génie Électrique s'est donné depuis des décennies. L'approche sur cycle de vie multicritères montre que ces objectifs peuvent être antinomiques par rapport à des objectifs de soutenabilité, le premier menant à une surconsommation de matières premières pures et le second au mieux à une déconstruction difficile, au pire à une aggravation notable des impacts environnementaux.

7 - Remerciements

Les auteurs remercient tout d'abord Bernard Multon, ancien professeur à l'ENS Rennes pour avoir initié ces thématiques d'écoconception en Génie Électrique dès les années 2000 au sein de la formation à l'ENS mais aussi au sein du laboratoire SATIE.

Les auteurs remercient également les chercheurs du groupe de travail du GDR SEEDS dénommé « GT Convertisseurs Électroniques de Puissance Plus Soutenables (CEPPS) », animé par J.C. Crébier (G2ELab) et L. Dupont (SATIE) [25], pour les échanges très riches et les réflexions menées autour de l'électronique de puissance soutenable.

8 - Glossaire

ACV : Analyse sur cycle de vie

AFNOR : Association Française de Normalisation

BSI : British Standard Institution (Institut anglais de normalisation)

CENELEC : Comité Européen de Normalisation en Électronique et en Électrotechnique

DIN : Deutsches Institut für Normung (Institut allemand de normalisation)

IEC : International Electrotechnical Commission (Commission internationale d'électrotechnique)

ICV : Inventaire sur cycle de vie

ISO : International Organization for Standardisation (Organisation internationale pour la normalisation)

LCIA : Life cycle Impact Assessment (méthode de caractérisation des impacts environnementaux)

DEEE : Déchets d'équipements électriques et électroniques

IE : Impact environnemental

BdD : base de données

GES : Gaz à effet de serre

FEOL : front end of line

BEOL : back end of line

PEF : Product Environmental Footprint

DCB : Direct Bonded Copper substrates

PCB : de l'anglais Printed Circuit Board ou circuit imprimé en français

PBT : polybutylène téréphtalate est un polyester thermoplastique cristallin

PPS : polysulfure de phénylène est un polymère semi-cristallin

Références :

- [1] L. FANG, T. TURKBAY ROMANO, M. RIO, J. MELOT, JC. CREBIER. “L’apport des normes et de la réglementation pour la soutenabilité en électronique de puissance”. SYMPOSIUM DE GENIE ELECTRIQUE, SGE 2023, 5-7 juillet 2023, Lille.
- [2] J. HERIBERT “Mise en Application réussie de la directive ErP”. 2014, Eaton, Livre blanc Directive ErP 2009/125/CE
- [3] ROUSSEAU, PATRICK., 10 mai 2022, « Analyse du cycle de vie (ACV) Présentation, méthodologie, applications et limites ». Dans : « Chimie verte », [en ligne], Editions T.I. [Paris, France], 2023, g5500, [Consulté le 13/07/2023], TIP142WEB, [base de données en ligne], doi:10.51257/a-v2-g5500, disponible à l'adresse : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/chimie-verte-principes-reglementations-et-outils-d-evaluation-42490210/analyse-du-cycle-de-vie-acv-g5500/>
- [4] SPHERA. “Electronics in LCA and Life Cycle Thinking of Electronics, Hot Spots and Lessons (to be) Learned”. SICT 2020, Belgique, Sphera. [PowerPoint-Präsentation \(sictdoctoralschool.com\)](#)
- [5] HERRMANN, CONSTANTIN & SPIELMANN, MICHAEL. “Methods and Overview on Activities on Carbon Footprints”. Electronic Goes Green 2008, Berlin.
- [6] WOLFOVA, M & ESTOKOVA, ADRIANA & ONDOVA, MARCELA & MONOKOVA, A. (2018). Comparing of the external bearing wall using three cultural perspectives in the life cycle impact assessment. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 385. 012064. 10.1088/1757-899X/385/1/012064.
- [7] BAUDAIS, B. ; BEN AHMED, H. ; JODIN, G. ; DEGRENNE, N. ; LEFEBVRE, S. Life Cycle Assessment of a 150 kW Electronic Power Inverter. Energies 2023, 16, 2192. <https://doi.org/10.3390/en16052192>
- [8] MARILYS PRADEL, JULIEN GARCIA, SAMULI VAIJA. “Guide de bonne pratique de la prise en compte des ressources minérales”. 2019, Réseau EcoSD.
- [9] CHEN, XIAOJU & MATTHEWS, H. & GRIFFIN, W. (2021). Uncertainty caused by life cycle impact assessment methods: Case studies in process-based LCI databases. Resources, Conservation and Recycling. 172. 105678. 10.1016/j.resconrec.2021.105678.
- [10] ZAMPORI, L., ET PANT, R., Méthode de l’empreinte environnementale de produit (PEF), EUR 29682 FR, Office des publications de l’Union européenne, Luxembourg, 2019, ISBN 97 8-92-76-00653-4, doi : 10.2760/265244, JRC115959
- [11] SCHMIDT J, PIZZOL M. “Critical review of four comparative life cycle assessments of printed and electronic communication”. Aalborg, Denmark, 2014.
- [12] ERIC MASANET, YUAN CHANG, ANAND R. GOPAL, PETER LARSEN, WILLIAM R. MORROW III, ROGER SATHRE, ARMAN SHEHABI, PEI ZHAI. “Life-Cycle Assessment of Electric Power Systems “. Annual Review of Environment and Resources 2013 38:1, 107-136
- [13] NORDELÖF, A., & ALATALO, M. (2017) A Scalable Life Cycle Inventory of an Automotive Power Electronic Inverter Unit. Technical and Methodological Description, version 1.01, Chalmers University of Technology. Disponible à : http://cpmdatabase.cpm.chalmers.se/DataReferences/LCI%20model%20report%20inverter%20unit%20v1.01_Final.pdf
- [14] GT CEPPS. État de l’art de la recherche vers une électronique de puissance soutenable. Symposium de Génie Electrique, SGE 2023, 5-7 juillet 2023, Lille.
- [15] BAUDAIS, B.; BEN AHMED, H.; JODIN, G.; DEGRENNE, N.; LEFEBVRE. “Influence des modèles de vieillissement sur les impacts environnementaux pour les composants d’électronique de puissance”. Symposium de Génie Electrique (SGE) 2023, Lille.

- [16] ANDERS NORDELÖF, EMMA GRUNDITZ, SONJA LUNDMARK, ANNE-MARIE TILLMAN, MIKAEL ALATALO, TORBJÖRN THIRINGER, Life cycle assessment of permanent magnet electric traction motors, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 67, 2019, Pages 263-274, ISSN 1361-9209, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.11.004>
- [17] Infineon (2020) HybridKit Drive Quickstart Manual Quick Start Guide for HYBRIDKIT DRIVE
- [18] ELENA BARBARIN, Rapport Infineon FS820R08A6P2B HybridPACK Drive 750V IGBT Module, Nov 2017, version 2, System plus consulting, 21 rue la Noue Bras de Fer 44200 NANTES - FRANCE
- [19] N. GAZBOUR ET AL., “A path to reduce variability of the environmental footprint results of photovoltaic systems,” Journal of Cleaner Production, vol. 197, pp. 1607-1618, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.06.276.
- [20] BUTEL-BELLINI, Béatrice et JANIN, Marc. Écoconception : état de l'art des outils disponibles. *Techniques de l'ingénieur. L'Entreprise industrielle*, 1999, vol. 4, no G6010, p. G6010. 1-G6010. 12.
- [21] RAHMANI, BOUBAKR & RIO, MAUD & LEMBEYE, YVES & CRÉBIER, JEAN-CHRISTOPHE. (2021). Opportunités de la modularité pour l'écoconception de convertisseurs de puissance. July 2021, 4ème SYMPOSIUM DE GENIE ELECTRIQUE (SGE 2021), Juillet 2021, Nantes
- [22] JORGE MARTINEZ-LEAL. Développement d'outils d'aide à la décision en conception pilotés par l'analyse multicritère de la valorisabilité du produit et l'outillage des lignes directrices d'écoconception pour la fin de vie. Autre [cond-mat.other]. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2019. Français. ffNNT : 2019ENAM0062ff. fftel-02939064f
- [23] GDR SEEDS, GT Convertisseurs Electroniques de Puissance Plus Soutenables (CEPPS) <https://seeds.cnrs.fr/gt-convertisseurs-electronique-de-puissance-plus-soutenables/>
- [24] TUGCE TURKBAY ROMANO, LI FANG, MAUD RIO, THECLE ALIX, JULIEN MELOT, FABRICE SERRANO, ALEXANDRE DRAY, PIERRE LEFRANC, YVES LEMBEYE, NICOLAS PERRY, JEAN-CHRISTOPHE CREBIER, « Évaluation de la démontabilité des convertisseurs électroniques de puissance pour une circularité améliorée », Symposium de Génie Electrique (SGE) 2023, Lille, <https://hal.science/hal-04161305>
- [25] AMELIE MÜLLER, LORENZ FRIEDRICH, CHRISTIAN REICHEL, SINA HERCEG, MAX MITTAG, DIRK HOLGER NEUHAUS, “A comparative life cycle assessment of silicon PV modules: Impact of module design, manufacturing location and inventory”, Elsevier 2021, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111277>
- [26] HARISH TRIVEDI, ARUNABH MESHARAM, RAJEEV GUPTA, “Recycling of photovoltaic modules for recovery and repurposing of materials”, [Journal of Environmental Chemical Engineering](https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109501) (IF 7.7) 2023, DOI:10.1016/j.jece.2023.109501
- [27] In Extenso Innovation Croissance, Marion JOVER, Mathilde BORIE. ADEME, Sandrine MORICEAU. Novembre 2021. Équipements électriques et électroniques : données 2020 - Rapport annuel - 105 pages.
- [28] H. BEN AHMED, B. BAUDAIS, and G. JODIN, “Écoconception en génie électrique. Notions fondamentales.” *Technique de l'Ingénieur* mars 2024. <https://doi.org/10.51257/a-v1-d3087>
- [29] H. BEN AHMED, B. BAUDAIS, and G. JODIN, “Écoconception en génie électrique. Exemples.” Mars 2024. *Technique de l'Ingénieur*, <https://doi.org/10.51257/a-v1-d3088>

Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>

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

école
normale
supérieure
paris-saclay

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.

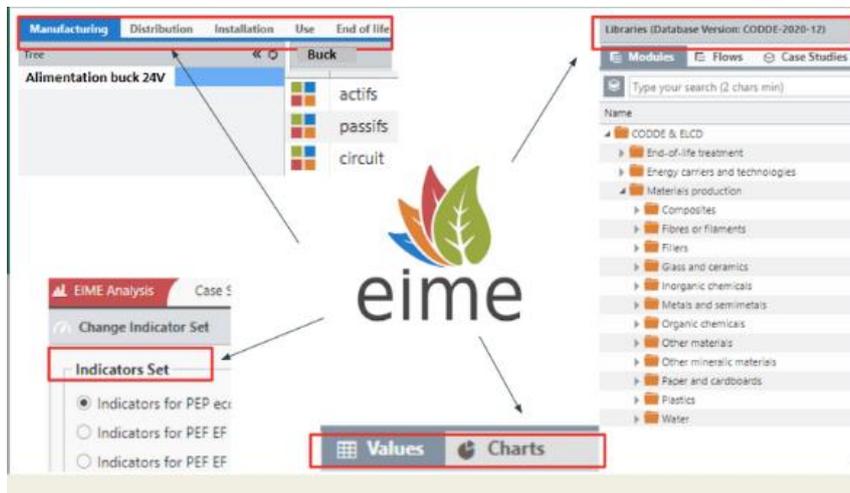


Figure 1 : Interface du logiciel EIME®

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).

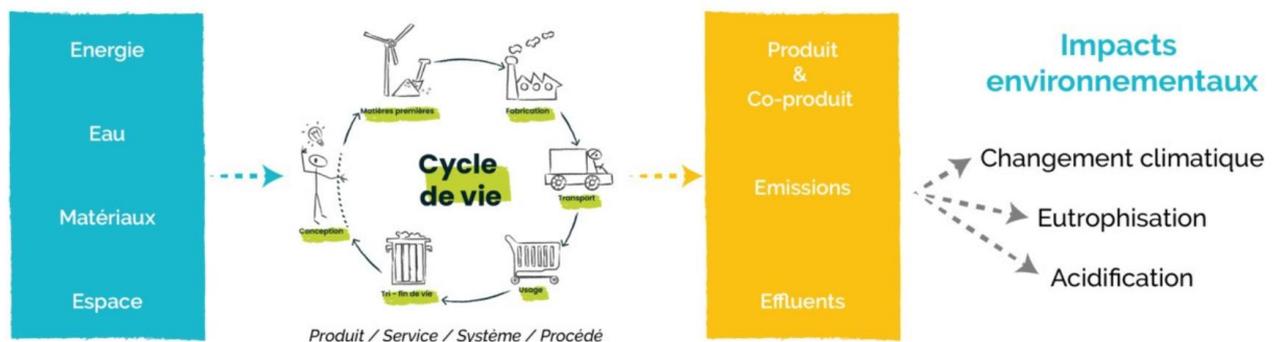


Figure 2 : Différentes phases d'une ACV [1]

- 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.

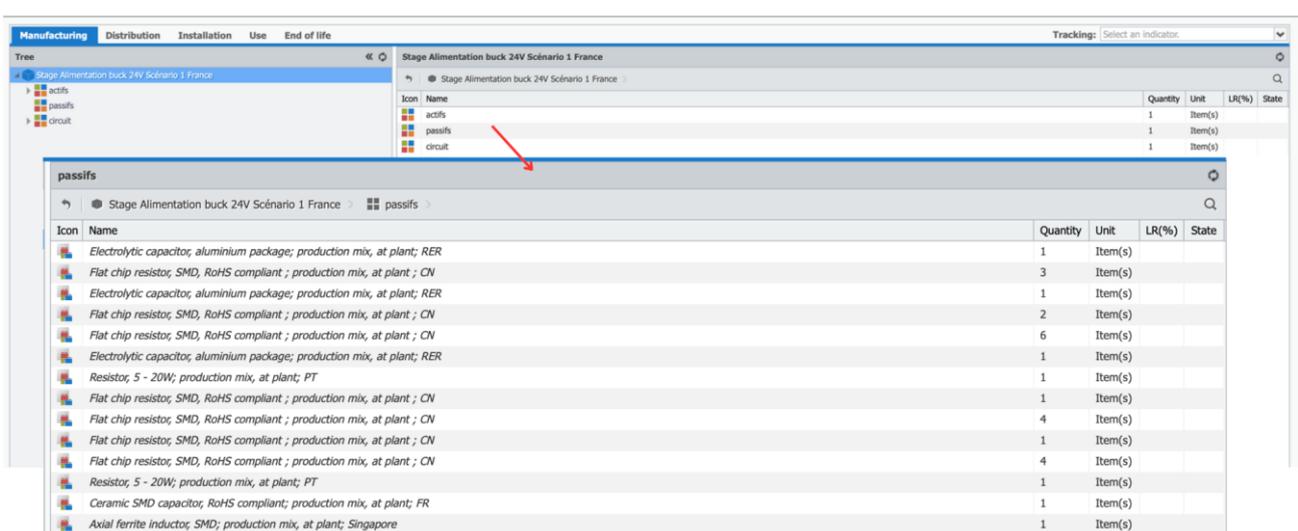
Dans notre étude réalisée avec EIME®-version University, nous avons évalué les indicateurs suivants [2] :

- 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.



Icon	Name	Quantity	Unit	LR(%)	State
	Electrolytic capacitor; aluminium package; production mix, at plant; RER	1	Item(s)		
	Flat chip resistor, SMD, RoHS compliant ; production mix, at plant ; CN	3	Item(s)		
	Electrolytic capacitor; aluminium package; production mix, at plant; RER	1	Item(s)		
	Flat chip resistor, SMD, RoHS compliant ; production mix, at plant ; CN	2	Item(s)		
	Flat chip resistor, SMD, RoHS compliant ; production mix, at plant ; CN	6	Item(s)		
	Electrolytic capacitor; aluminium package; production mix, at plant; RER	1	Item(s)		
	Resistor, 5 - 20W; production mix, at plant; PT	1	Item(s)		
	Flat chip resistor, SMD, RoHS compliant ; production mix, at plant ; CN	1	Item(s)		
	Flat chip resistor, SMD, RoHS compliant ; production mix, at plant ; CN	4	Item(s)		
	Flat chip resistor, SMD, RoHS compliant ; production mix, at plant ; CN	1	Item(s)		
	Flat chip resistor, SMD, RoHS compliant ; production mix, at plant ; CN	4	Item(s)		
	Resistor, 5 - 20W; production mix, at plant; PT	1	Item(s)		
	Ceramic SMD capacitor, RoHS compliant; production mix, at plant; FR	1	Item(s)		
	Axial ferrite inductor; SMD; production mix, at plant; Singapore	1	Item(s)		

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 :

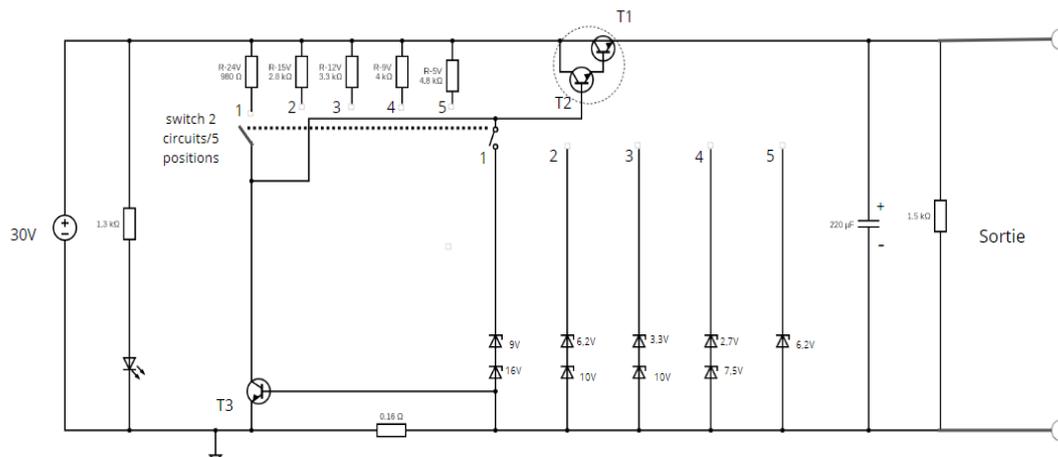


Figure 4 : Schéma structurel d'une alimentation stabilisée DC-DC de type "linéaire"

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 (qq 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 SO ₂ 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 (m ³)	1.04e+3	1.76e+1	0.00e+0	9.74e+2	9.76e+0	2.04e+3
EP for EN15804 (kg PO ₄ ³⁻ eq.)	1.56e-3	9.22e-5	0.00e+0	9.90e-3	1.67e-4	1.17e-2
GWP for EN15804 (kg CO ₂ eq.)	6.37e+0	1.69e-1	0.00e+0	2.92e+1	2.10e-1	3.60e+1
ODP for EN15804 (kg CCL ₃ F 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 (m ³)	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 :

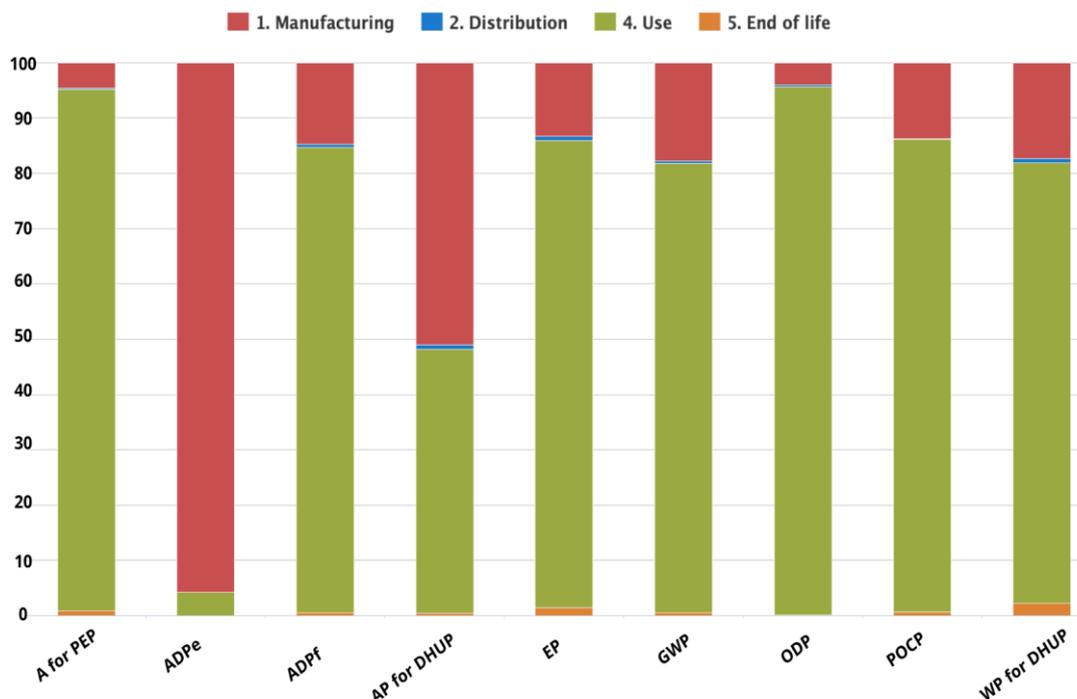


Figure 5-a : Bargraphe de l'alimentation linéaire pour 24V-5A en sortie (scénario 1)

	Manufacturing	Distribution	Use	End of life	Sum
A for PEP (kg SO2 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 (m³)	1.04e+3	1.76e+1	3.49e+3	9.76e+0	4.56e+3
EP for EN15804 (kg PO4³-eq.)	1.56e-3	9.22e-5	3.55e-2	1.67e-4	3.73e-2
GWP for EN15804 (kg CO2 eq.)	6.37e+0	1.69e-1	1.05e+2	2.10e-1	1.11e+2
ODP for EN15804 (kg CCL3F 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 (m³)	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 :

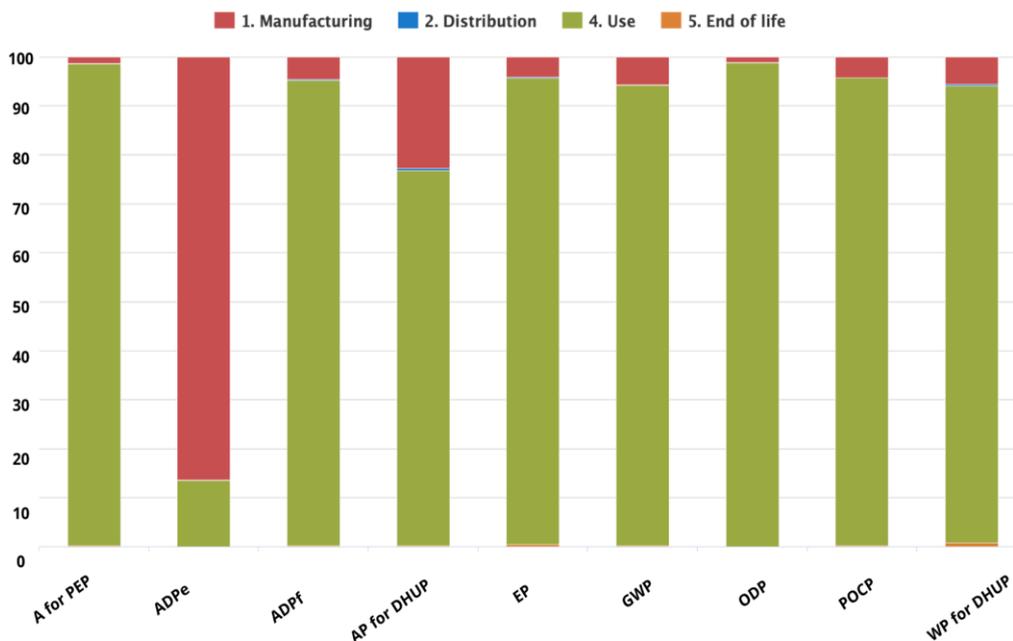


Figure 5-b : Bargraphe pour 5V-5A en sortie de l'alimentation linéaire (scénario 1)

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 :

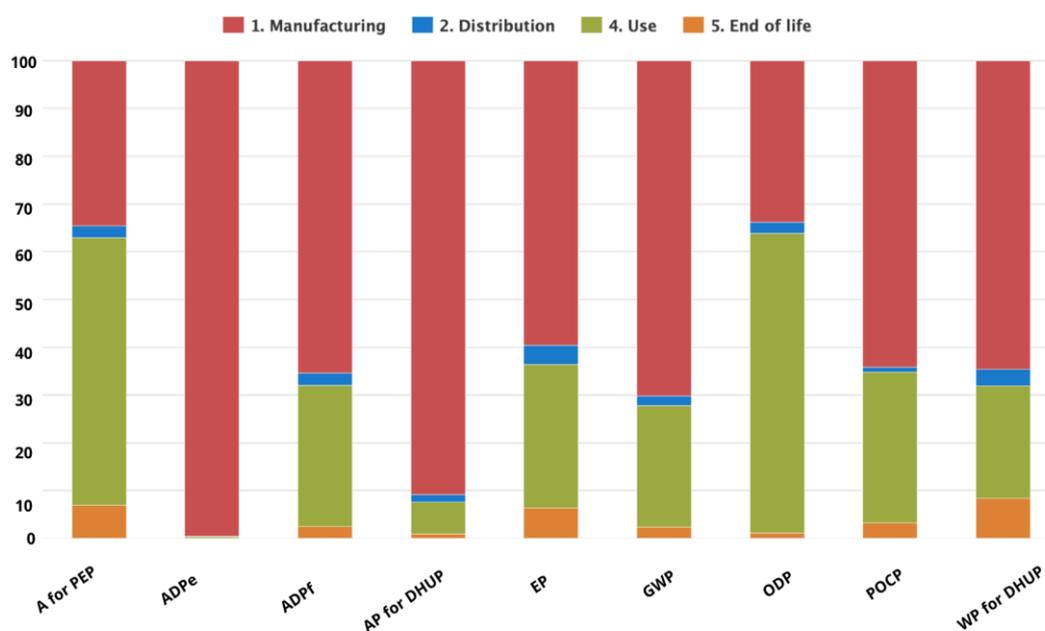


Figure 6-a : Bargraphe pour 24V-5A en sortie de l'alimentation linéaire (scénario 2)

	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
ADP _f for EN15804 (MJ)	5.88e+1	2.35e+0	6.09e+1	2.22e+0	1.24e+2
AP for DHUP (m ³)	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 (m ³)	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 :

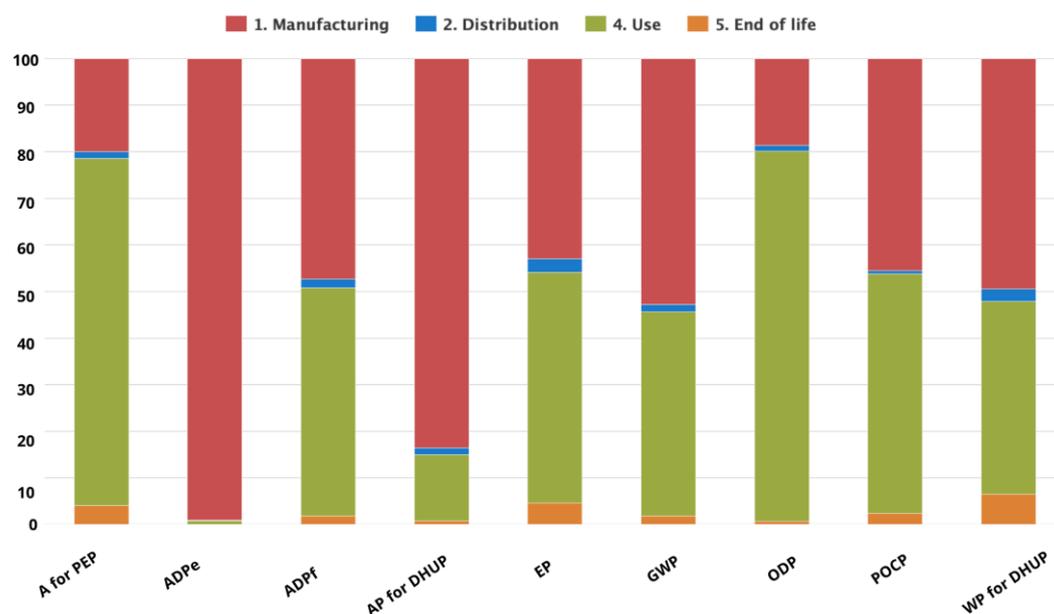


Figure 6-b : Bargraphe pour 5V-5A en sortie de l'alimentation linéaire (scénario 2)

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 :

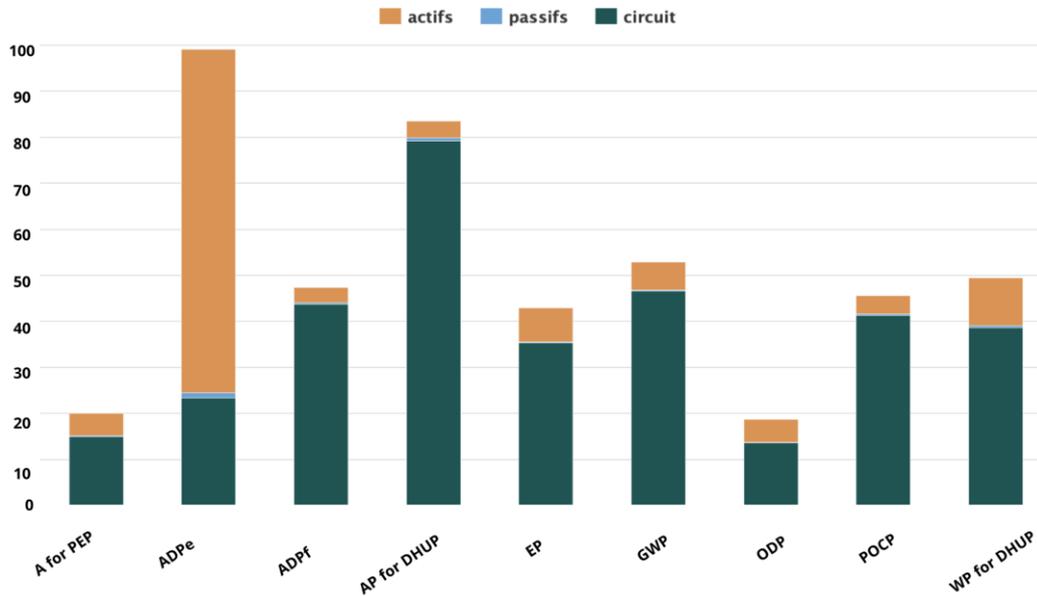


Figure 7 : Bargraphe de l'ACV de l'alimentation linéaire par sous-ensembles

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 :

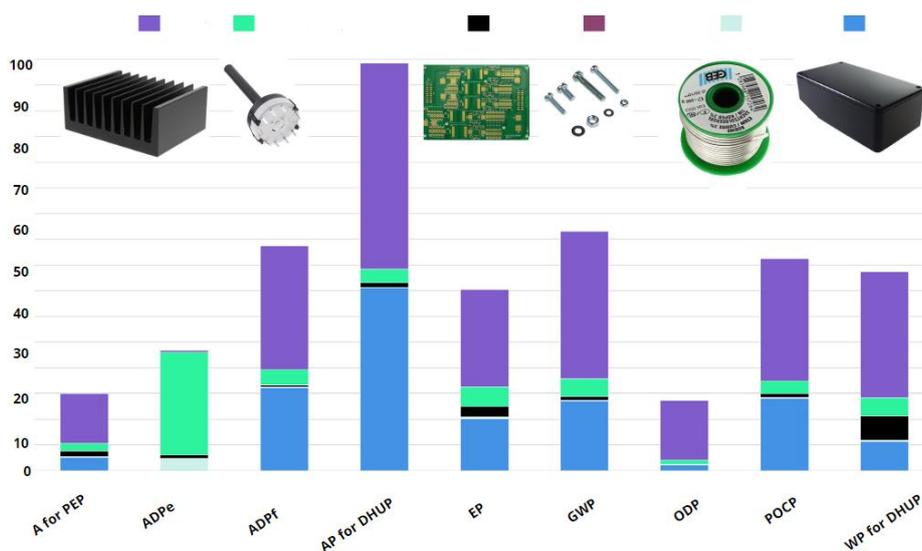


Figure 8 : Bargraphe de l'ACV par éléments de la partie “circuit” de l'alimentation linéaire

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 :

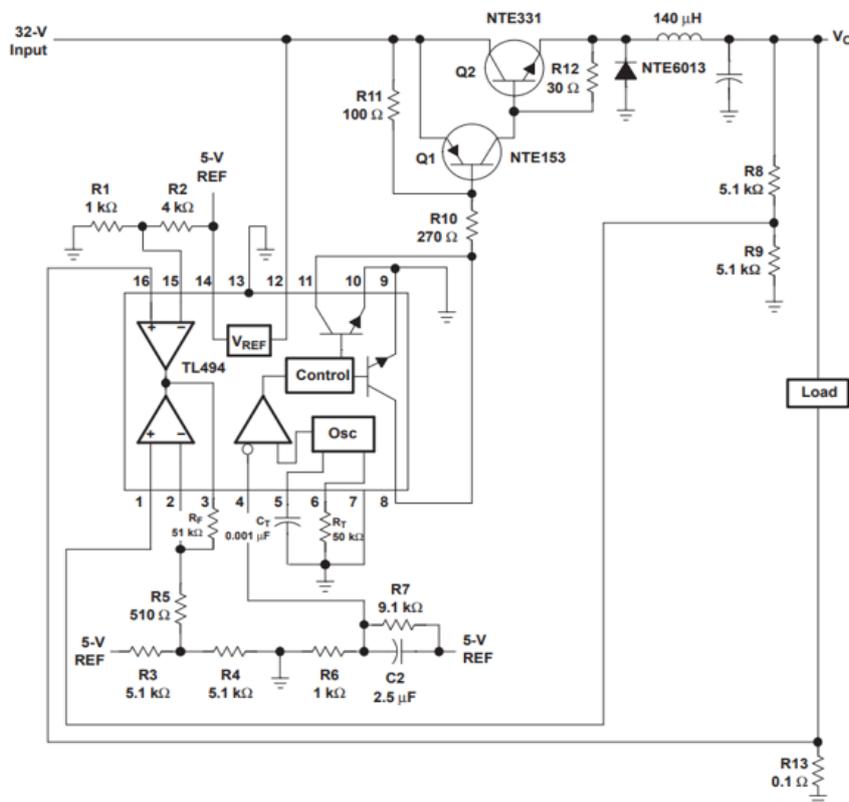


Figure 9 : Schéma structurel d'un convertisseur de type BUCK [5]

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 :

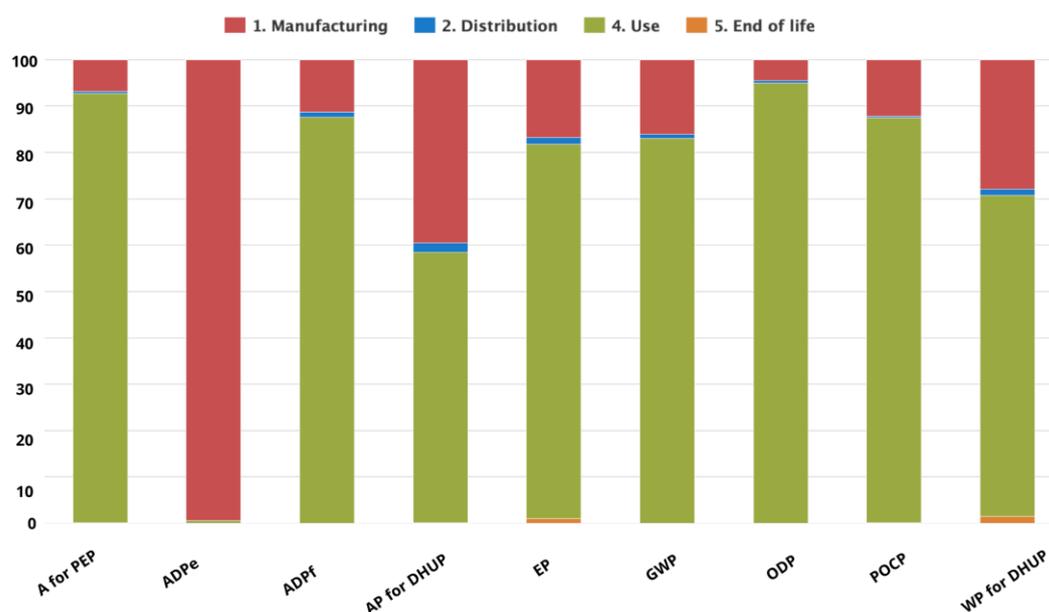


Figure 10-a : Bargraphe pour 24V-5A en sortie de l'alimentation "buck" (scénario 1)

	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 :

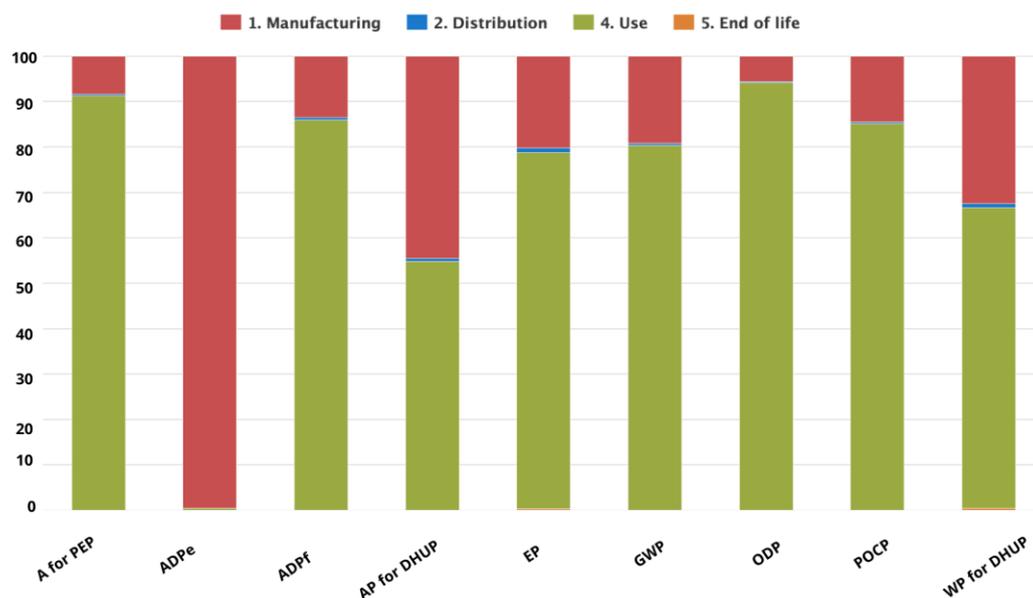


Figure 10-b : Bargraphe en sortie de l'alimentation "buck" 5V-5A (scénario 1)

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).

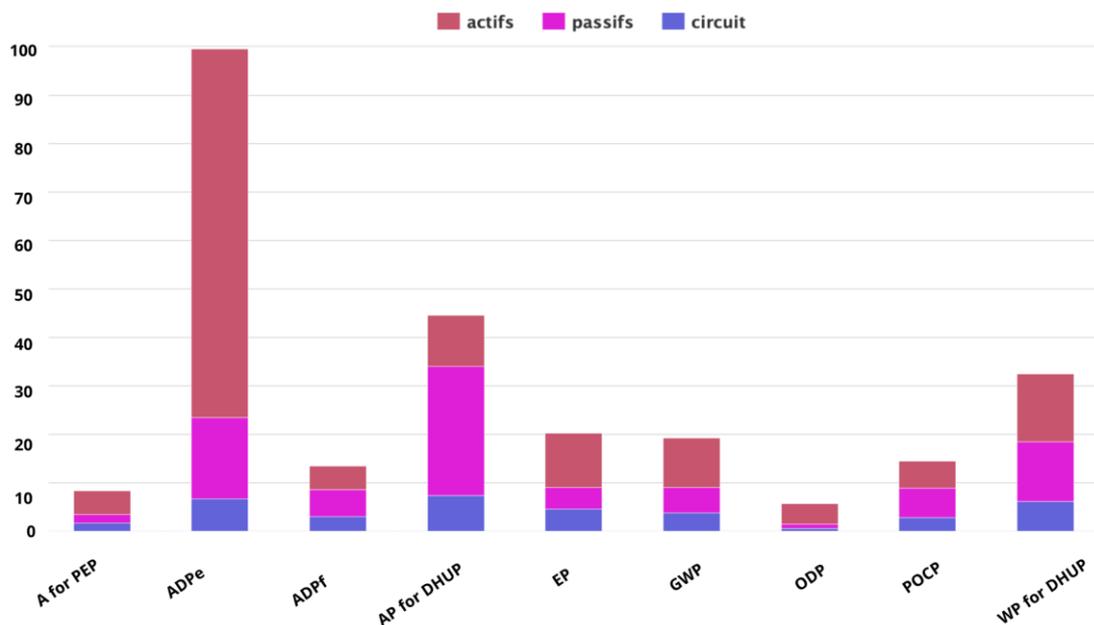


Figure 11 : Bargraphe de l’ACV par sous-ensembles de l’alimentation Buck

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].

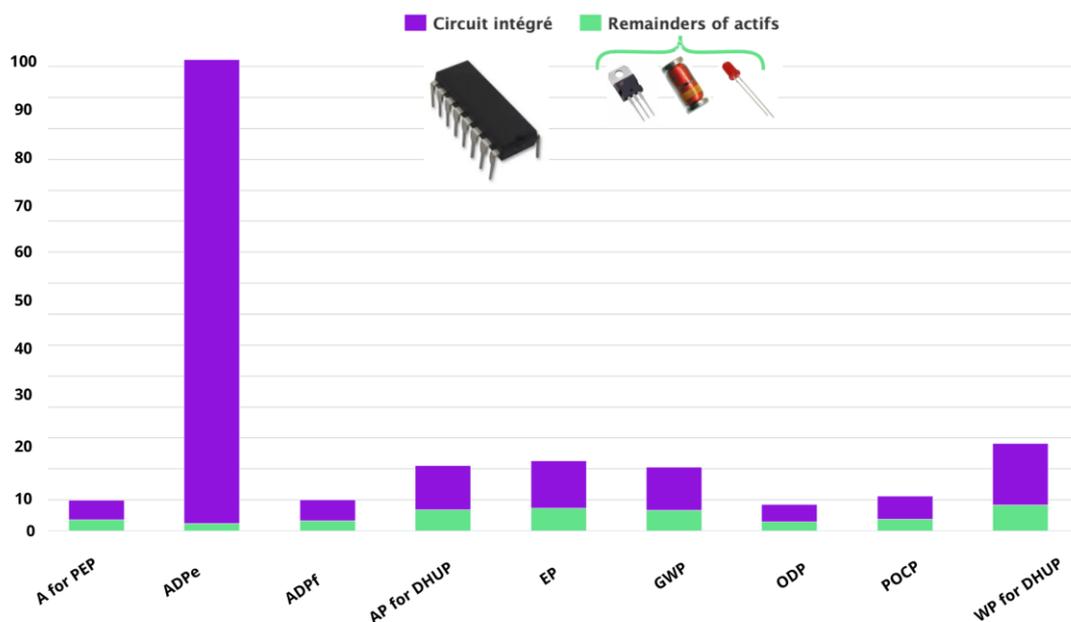


Figure 12 : Bargraphe de l’ACV par éléments de la partie composants “actifs” de l’alimentation Buck

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 (épuisement des ressources non fossiles), attribué au circuit intégré.

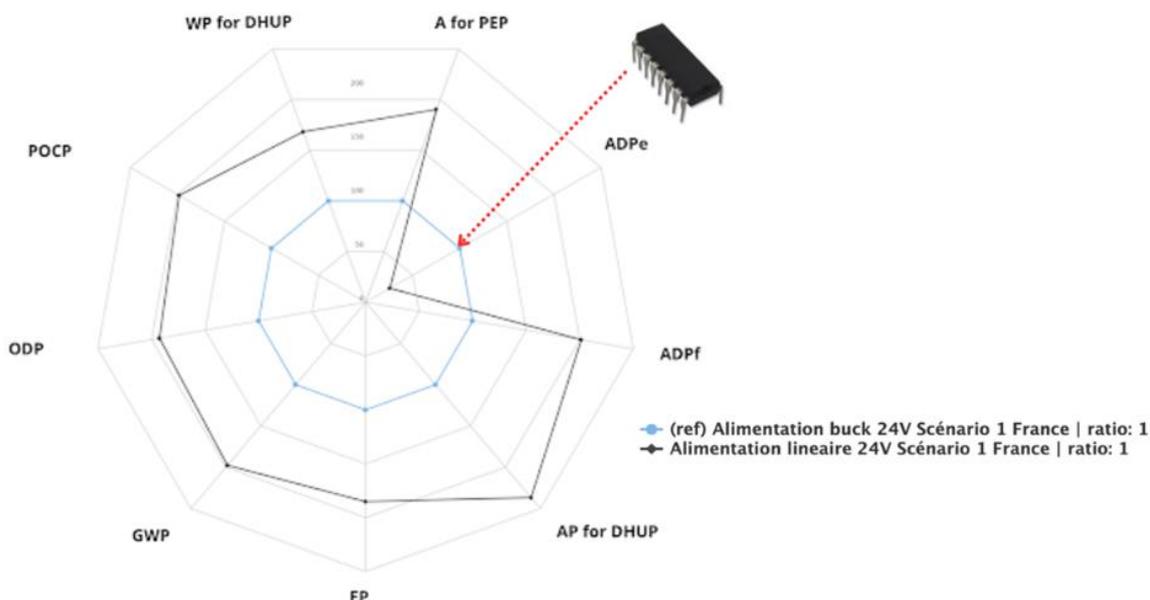


Figure 13 : Comparaison des deux alimentations pour une sortie de 24V-5A (scénario 1)

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.

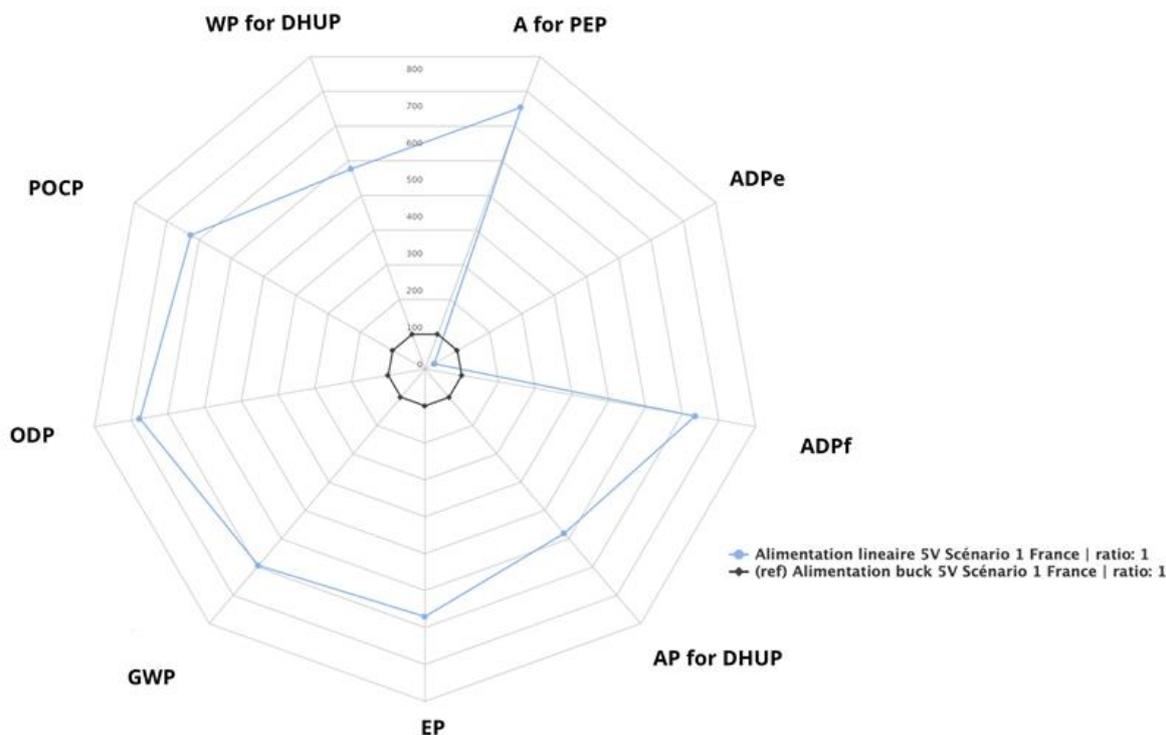


Figure 14 : Comparaison des deux alimentations pour une sortie de 5V-5A en sortie (scénario 1)

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.

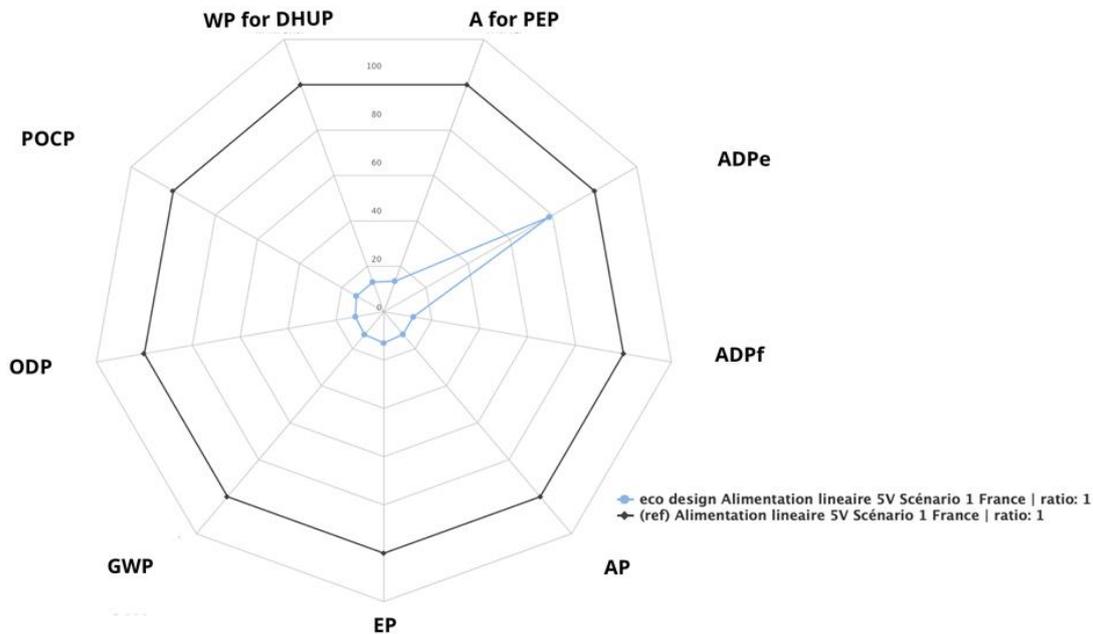


Figure 15 : Comparaison entre l'alimentation linéaire de base et la version éco-conçue 5V-5A (scénario 1)

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.

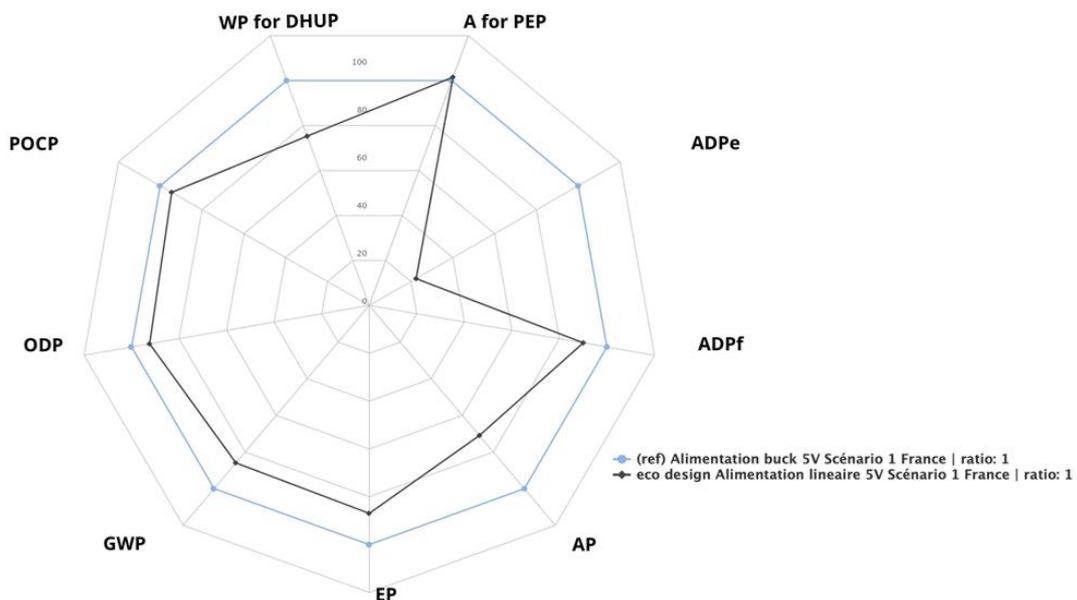


Figure 16 : Comparaison alimentation linéaire éco-conçue et "buck" pour 5V-5A en sortie (scénario 1)

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 : 18 juillet 2023. [En ligne]. 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

Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>
Partagé sous licence [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recyclage des Cartes Electroniques : Vers une Economie Circulaire

Alexandre CHAGNES¹

Édité le
12/09/2024

¹ Université de Lorraine, CNRS, GeoRessources, 54000 Nancy, France.

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

Ce document aborde l'économie circulaire appliquée aux cartes électroniques, un type de Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE). Il présente les enjeux environnementaux et économiques liés au recyclage de ces cartes, riches en métaux précieux. Le texte décrit les étapes du recyclage, impliquant des opérations de concentration physique et des opérations hydrométallurgiques pour récupérer ces métaux.

1 - Le principe de l'économie circulaire

L'économie circulaire est un modèle économique qui se distingue de l'économie linéaire par son approche systémique et régénérative des ressources. Alors que le modèle linéaire repose sur un cycle de "produire, consommer, jeter", l'économie circulaire vise à créer un système fermé où les ressources sont utilisées de manière optimale, minimisant ainsi les déchets et l'impact environnemental. Cette approche repose sur plusieurs piliers essentiels qui englobent des concepts tels que la réduction des déchets, la réutilisation, la réparation, la refabrication, et le recyclage, ainsi que la responsabilité accrue du producteur tout au long du cycle de vie d'un produit.

Les piliers de l'économie circulaire sont :

- **Réduction des déchets à la source** : Il s'agit d'une approche proactive visant à minimiser la quantité de matériaux et d'énergie utilisés dès la conception des produits. En repensant les processus de production et en intégrant des méthodes plus efficaces, les entreprises peuvent réduire significativement l'empreinte environnementale de leurs produits. Cela inclut l'utilisation de matières premières durables et renouvelables, ainsi que l'optimisation des procédés pour limiter les pertes de matériaux.
- **Réutilisation et la réparation** : Plutôt que de jeter un produit après son utilisation initiale, l'économie circulaire encourage la réutilisation et la réparation. Ces pratiques prolongent la durée de vie des produits, réduisant ainsi le besoin de nouvelles ressources. La réutilisation implique que les produits ou leurs composants soient utilisés à nouveau sans transformation majeure, tandis que la réparation permet de restaurer des objets endommagés ou défectueux. Cela nécessite non seulement une conception plus robuste des produits, une culture de la maintenance chez les consommateurs et les entreprises.
- **Éco-conception et innovation** : Cela consiste à intégrer des critères environnementaux dès la phase de conception des produits. Les entreprises doivent repenser leurs processus de conception pour créer des produits plus durables, réparables, et recyclables. L'innovation joue un rôle crucial en favorisant le développement de nouvelles technologies et de nouveaux matériaux qui permettent d'atteindre ces objectifs. L'éco-conception ne se limite

pas à la réduction des impacts négatifs, elle vise également à engendrer des impacts positifs pour l'environnement et la société.

- **Recyclage et valorisation des déchets** : Lorsque les produits atteignent la fin de leur vie utile, le recyclage joue un rôle clé dans l'économie circulaire. Ce pilier consiste à récupérer les matériaux des produits usagés pour les transformer en nouvelles matières premières. Le recyclage permet de réduire la dépendance aux ressources naturelles et de limiter l'accumulation de déchets dans l'environnement. En complément, la valorisation des déchets, telle que la valorisation énergétique ou le compostage, contribue également à minimiser l'impact environnemental en tirant parti des résidus qui ne peuvent pas être recyclés.

Au cœur de l'économie circulaire se trouve le concept de responsabilité élargie du producteur (REP). Ce principe stipule que les fabricants et les producteurs sont responsables non seulement de la production des biens, mais aussi de leur gestion en fin de vie. Cela inclut la prise en charge du recyclage, du traitement des déchets, et de la gestion des substances dangereuses. La REP incite les entreprises à concevoir des produits plus durables et faciles à recycler, et à développer des systèmes de collecte et de traitement des déchets efficaces. La responsabilité élargie du producteur se manifeste à travers divers mécanismes, tels que les taxes sur les produits, les systèmes de consigne, et les obligations de reprise des produits usagés. Ces mesures visent à internaliser les coûts environnementaux dans le prix des produits, incitant ainsi les entreprises à adopter des pratiques plus durables et à encourager les consommateurs à participer activement à l'économie circulaire.

Le principe de l'économie circulaire s'applique à tous les objets produits y compris les Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE) qui sont divisés en dix catégories :

- Équipements de gros électroménager (réfrigérateurs, congélateurs, machines à laver, lave-vaisselle, fours, plaques de cuisson, chauffe-eau, radiateurs électriques).
- Équipements de petit électroménager (Aspirateurs, fers à repasser, grille-pain, bouilloires, mixeurs, cafetières, sèche-cheveux, rasoirs électriques).
- Équipements Informatiques et de Télécommunication (ordinateurs, imprimantes, téléphones fixes et portables, routeurs, modems, claviers, souris).
- Équipements de consommation (téléviseurs, moniteurs, chaînes hi-fi, radios, lecteurs DVD, lecteurs Blu-ray, appareils photo, caméscopes).
- Équipements d'éclairage (ampoules fluorescentes, lampes à incandescence, lampes LED, néons).
- Outils électriques et électroniques (perceuses, scies électriques, ponceuses, rabots électriques, tondeuses à gazon électriques, soudeuses électriques).
- Jouets, équipements de loisirs et de sport (trains électriques, voitures télécommandées, consoles de jeux, manettes, équipements de fitness électroniques, appareils de sport connectés).
- Dispositifs Médicaux (moniteurs cardiaques, tensiomètres, thermomètres électroniques, appareils d'assistance respiratoire, équipements de diagnostic).
- Instruments de surveillance et de contrôle (thermostats, détecteurs de fumée, caméras de surveillance, alarmes, instruments de mesure).
- Distributeurs automatiques (distributeurs de boissons et de snacks, distributeurs de billets, distributeurs automatiques de billets de banque, machines de vente de produits divers)

Ces DEEE ont la croissance la plus rapide au monde parmi l'ensemble des déchets produits par l'homme avec une augmentation de 33,8 millions de tonnes à 50 millions de tonnes entre 2010 et 2018 dont 1,5 million de tonnes par an de déchets de cartes électroniques [1, 2]. La quantité de déchets électroniques générée en Europe augmente de 3 à 5% par an, soit trois fois plus que pour les déchets municipaux [3]. Parmi les DEEE définis dans la directive européenne récemment mise à jour [4], les déchets issus des technologies de l'informatique et des télécommunications représentent une source de métaux non négligeable. Considérant que les DEEE contiennent en moyenne environ 2,2% (en poids) de circuits imprimés (PCB), 4,6% de fraction minérale, 9,2% de résidus de broyage, 44,7% de métaux ferreux, 7,5% de métaux non ferreux, 18,3% de plastiques, 12,2% de verre et 1,3% d'autres types de matériaux [5], deux raisons principales expliquent la volonté de mettre en œuvre des procédés de recyclage des DEEE : les préoccupations environnementales, et les économies en énergie et en ressource (ainsi que l'indépendances vis-à-vis de ressources stratégiques).

Dans cet article, nous allons nous intéresser aux technologies de recyclage des cartes électroniques qui appartiennent à la catégorie des DEEE et qui inondent notre quotidien. Leur recyclage est un enjeu majeur puisque le taux de recyclage des cartes électroniques est encore faible et les procédés mis en œuvre sont très énergivores.

2 - Recyclage des cartes électroniques

Les cartes électroniques sont présentes partout dans notre quotidien et leur présence ne fera que de croître dans les années à venir avec la digitalisation de notre société conduisant à l'augmentation des objets connectés, ou encore le développement des véhicules électriques dans lesquels l'électronique joue un rôle central. Ces cartes électroniques contiennent des concentrations en métaux attractives comme le montre le Tableau 1 qui compare les concentrations moyennes en différents métaux contenus dans les minerais avec celles contenues dans les cartes électroniques d'ordinateur, de téléphones portables et d'autres équipements électroniques. Ces données montrent clairement l'intérêt de pouvoir récupérer les métaux contenus dans ce type de DEEE d'un point de vue économique, mais il démontre également la nécessité de développer des procédés hydrométallurgiques [6] dédiés capables d'extraire sélectivement ces métaux dans des matrices complexes dont la composition est très différente de celle que l'on peut retrouver dans les ressources primaires.

*Tableau 1 : Concentrations moyennes (%) en métaux contenus dans leurs minerais et dans les cartes électroniques d'ordinateurs, de téléphones portables et d'autres équipements électroniques [1]. *Indium contenu dans les écrans LCD.*

Éléments	Cu	Fe	Al	Zn	Ni	Sn	Pb	Sb	Au	Ag	Pd	In
Minerais	0,5	30	30	4	1	0,5	4	3	10 ⁻⁴	10 ⁻²	10 ⁻⁴	10 ⁻³
Cartes électroniques	10-20	1-5	2-6	0,5-6	1,1-2,5	1,5-8	0,3-5	0,2-1,8	0,002-0,03	0,03-0,02	0,001-0,02	0,02-0,04

Pour pouvoir valoriser ces métaux, il faut tout d'abord être capable de collecter des cartes électroniques. Cette collecte est organisée par des éco-organismes comme Ecosystem qui est une organisation à but non lucratif en France, agréée par l'État, spécialisée dans la gestion et le recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) [1]. L'objectif d'Ecosystem est de mettre en œuvre des solutions pour collecter, dépolluer, recycler et valoriser ces déchets tout en respectant les réglementations environnementales et en favorisant l'économie circulaire. L'organisation s'occupe de la collecte et du traitement des DEEE dont des lampes et des

équipements professionnels. Elle travaille en collaboration avec des collectivités locales, des entreprises, des distributeurs et des professionnels pour assurer une collecte efficace et un traitement respectueux de l'environnement. Les DEEE sont triés selon leur catégorie. Il est donc possible d'avoir un gisement relativement propre de cartes électroniques. Ces dernières ont des compositions complexes qui varient d'un gisement à un autre. Elles contiennent non seulement des métaux ferreux et des métaux non ferreux, mais aussi des plastiques. La première étape consiste à séparer les plastiques des métaux à valoriser. Pour cela, des procédés de concentration physique sont mis en œuvre. Ils impliquent les opérations suivantes qui sont décrites dans de nombreux ouvrages [1, 6] :

- Broyage des équipements en morceaux de faible taille ;
- Séparation granulométrique ou gravimétrique ;
- Séparation électromagnétique des éléments ferreux à l'aide d'aimants ;
- Tri optique qui permet de séparer les cartes électroniques des autres composants ;
- Séparation des éléments métalliques non ferreux (dont le cuivre) grâce à des courants de Foucault ;
- Séparation des plastiques par flottaison ;
- etc.

D'autres technologies ont été récemment développées avec succès pour produire des concentrés métalliques de qualité à partir de déchets électroniques comme la technologie de délamination, commercialisée par MOB-E-SCRAP, qui consiste à soumettre les cartes électroniques à des impacts (accélérations et décélérations) de forte intensité (jusqu'à 5000 G) avec une fréquence élevée (jusqu'à 6000 impacts par seconde). Cette opération est réalisée dans un Fractionator constitué d'un rotor cylindrique au centre entouré d'un stator également cylindrique. La matière tombe verticalement dans l'espace (environ 30 mm) entre le stator et le rotor, et elle est très fortement accélérée par les outils du rotor avant d'être stoppée par les outils du stator. Ces impacts créent au sein du matériau des forces de cisaillement. Les surfaces de liaison entre les couches ne résistent pas de la même manière du fait des différentes propriétés physiques des couches (densité, plasticité et ductilité). En sortie du Fractionator, les morceaux de plastique conservent à peu près leur forme initiale en raison de leur plasticité, les couches métalliques forment des petites billes (du fait de leur ductilité) et certaines matières minérales comme le verre sont pulvérisées. Cette différenciation facilite la séparation ultérieure par granulométrie, gravimétrie ou d'autres techniques de concentration physique.

Ces opérations de concentration physique judicieusement agencées permettent de produire un concentré de fer, un concentré de plastique et un concentré de cuivre contenant également les autres métaux d'intérêt comme le cuivre, l'or, l'argent, l'étain, le tantale, le gallium, etc. Ces concentrés sont actuellement traités principalement par pyrométallurgie même si l'hydrométallurgie prend une place de plus en plus importante. Les procédés pyrométallurgiques permettent de récupérer le cuivre, l'or, les platinoïdes, mais de nombreux métaux importants comme le gallium, l'indium, le tantale, etc., sont perdus car ils se concentrent dans les scories.

L'hydrométallurgie est une technique alternative à la pyrométallurgie qui permet de réduire les pertes de métaux, de valoriser davantage de métaux contenus dans les cartes électroniques, de réduire la consommation énergétique du processus de recyclage, et de produire des métaux de haute pureté pouvant être directement réinjectés dans la chaîne de valeur. Ces procédés hydrométallurgiques font intervenir différentes opérations unitaires qui ont été décrites dans de nombreux ouvrages [1, 7, 8]. Ce sont les mêmes opérations qui sont utilisées pour l'extraction et la séparation des métaux contenus dans les ressources primaires (mines).

Typiquement, les procédés hydrométallurgiques traitent les concentrés produits par des opérations de séparation physique en faisant intervenir des étapes de mise en solution (lixiviation), d'extraction-séparation (extraction liquide-liquide, extraction liquide-solide, précipitation sélective) et de production du produit semi-fini ou du produit fini (précipitation, cristallisation, électrométallurgie). Il existe de nombreux procédés décrits dans la littérature pour la plupart développés à l'échelle du laboratoire pour extraire les métaux contenus dans les cartes électroniques. Cet article n'a pas pour vocation de faire un état de l'art exhaustif des approches rapportées dans la littérature mais de présenter les principes mis en jeu en décrivant brièvement deux exemple de procédés hydrométallurgiques.

L'or, l'argent et les platinoïdes représentent 70% de la valeur de l'ensemble des métaux présents dans les cartes électroniques. Ainsi, la récupération de l'or est la première priorité suivie du cuivre, du palladium, de l'aluminium, de l'étain, du plomb, du platine, du nickel, du zinc et de l'argent [9]. À titre d'illustration, la lixiviation de l'or peut être réalisée à l'aide de cyanures, d'halogénures, de thiourée, d'eau régale [10]. Le cuivre peut être mis en solution à condition de travailler en milieu acide oxydant. Des acides inorganiques, des acides organiques, des liquides ioniques et même des bactéries ont été proposés pour dissoudre le cuivre des cartes de circuits imprimés [11-18]. Yazici et Deveci [19] ont étudié l'effet des sels de fer(III) sur la lixiviation du cuivre contenu dans les cartes électroniques. Cependant, la récupération du cuivre dans les jus de lixiviation obtenu par dissolution des cartes électroniques par le fer(III) n'est pour la plupart du temps pas abordée alors que le fer(III) est problématique dans les procédés d'extraction liquide-liquide et liquide-solide. Une voie permettant de traiter les jus de lixiviation des cartes électroniques consiste à réaliser une précipitation très sélective sous forme de sulfure métallique [20, 21]. Cette voie a été étudiée par Sethurajan et al. [22] qui ont proposé le schéma de procédé suivant pour traiter des concentrés de carte électronique par une lixiviation acide oxydante utilisant du fer(III) suivie d'une précipitation au sulfure de sodium (NaS) :

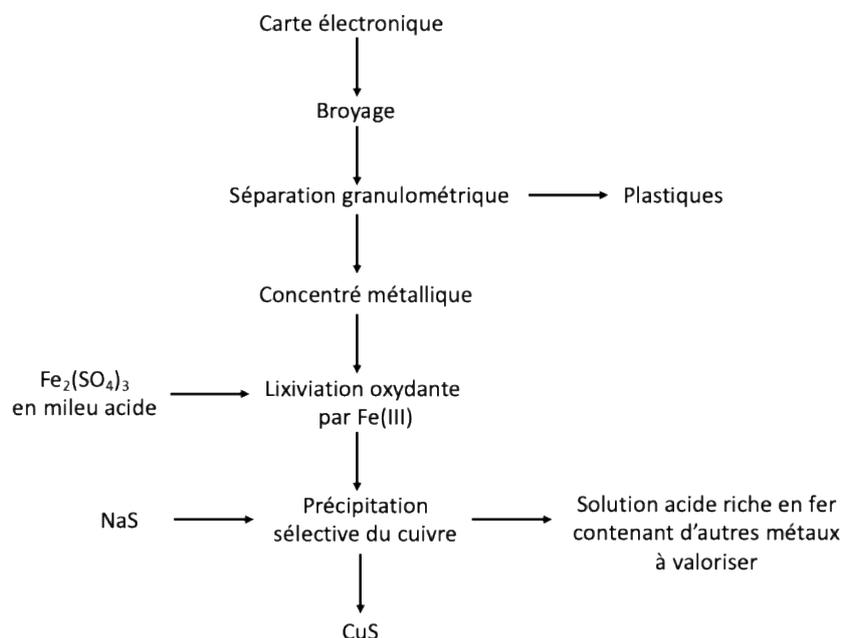


Figure 1 : Schéma de procédé pour la récupération du cuivre contenu dans les cartes électroniques

L'extraction liquide-liquide du cuivre contenu dans diverses matrices a fait l'objet de nombreuses études pour le traitement des minerais cuivrés. Moins d'études abordent la récupération du cuivre contenu dans les jus de lixiviation de cartes électroniques. Les oximes et les hydroxyoximes commercialisés sous le nom d'Acorga et de LIX sont les extractants les plus connus pour extraire le cuivre. À titre d'illustration, l'extraction du cuivre contenu dans les cartes électroniques peut être réalisée en mettant en œuvre un prétraitement physique conduisant à la production d'un concentré

qui est ensuite lixivié en milieu nitrique. Le jus de lixiviation est alors mis en contact avec un solvant d'extraction contenant du LIX 984N (mélange d'aldoxime et de kétoxime) afin de récupérer une solution de cuivre après une étape de dés extraction à l'acide sulfurique. La solution de cuivre obtenue a une pureté suffisante pour envisager une étape d'électrometallurgie par électrodéposition du cuivre (electrowinning) ou la réduction sous hydrogène en cuivre métallique :

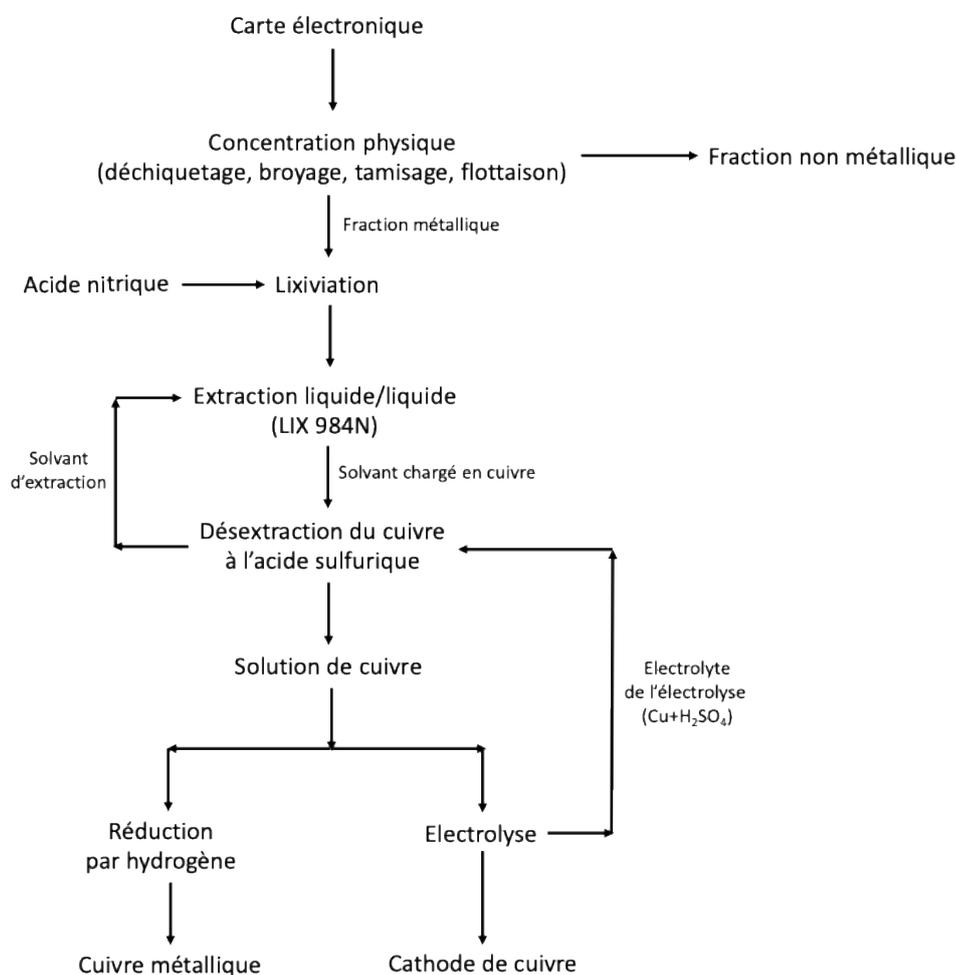


Figure 2 : Schéma de procédé pour la récupération du cuivre contenu dans les cartes électroniques mettant en œuvre une étape d'extraction liquide-liquide

L'électrometallurgie est une opération classique de l'industrie du cuivre. Elle se divise en deux techniques : l'électrodéposition qui a pour but de déposer du cuivre par voie électrochimique sur une cathode à partir d'une solution de lixiviation contenant très peu d'impuretés, et l'électroraffinage qui consiste à augmenter la pureté du cuivre par dissolution-déposition. Au cours de l'opération d'électroraffinage, l'anode produit par un procédé pyrometallurgique contient généralement entre 98.2% et 99.8% de cuivre. Le cuivre contenu dans l'anode est oxydé par voie électrochimique en appliquant un courant et se dissout en solution avant de se déposer sur la cathode par réduction électrochimique. Les impuretés, dont les métaux précieux, se concentrent alors dans le résidu anodique au fond de la cellule d'électroraffinage. La cathode de cuivre ainsi produite atteint une pureté en cuivre de 99.95% tandis que les métaux précieux concentrés dans le résidu anodique peuvent être valorisés soit par pyrometallurgie soit par hydrometallurgie (pour ce dernier cas, les procédés ne sont actuellement pas mis en œuvre à l'échelle industrielle).

3 - Conclusion

L'économie circulaire propose une approche systémique et régénérative des ressources, contrastant avec l'économie linéaire traditionnelle. Le recyclage des cartes électroniques nécessite de développer des procédés de plus en plus sophistiqués pour extraire les métaux précieux contenus dans des déchets dont la composition change au fur et à mesure que les technologies évoluent tout en minimisant l'empreinte environnementale. La combinaison de technologies de séparation physique et de procédés hydrométallurgiques permettent d'extraire et de séparer les métaux contenus dans les cartes électroniques. Toutefois, il reste des défis à relever, notamment la gestion des plastiques et la nécessité d'intégrer des technologies intelligentes et automatisées pour rendre le processus de recyclage plus efficace et économiquement viables. La transition vers une économie circulaire dans ce secteur peut non seulement contribuer à la préservation des ressources naturelles, mais aussi créer de nouvelles opportunités économiques et industrielles, tout en répondant aux enjeux environnementaux globaux.

Références :

- [1]: A. Chagnes, G. Cote, C. Ekberg, M. Nilson, T. Retegan, "Recycling of Waste Electrical and Electronic Equipment: Research, Development and Policies", Elsevier, 2016, 212 pages (ISBN : 9780128033630).
- [2]: B. Ghosh, M.K. Ghosh, P. Parhi, P.S. Mukherjee, B.K. Mishra, Journal of Cleaner Production 94, 5-19 (2015).
- [3]: R. Hischer, P. Wäger, J. Gauglhofer J. Does, Environment Impact Assessment 25(5), 525-539 (2005).
- [4]: Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE). Official Journal of the European Union, 24 July 2012.
- [5]: ADEME. Electric and Electronic Equipment - Annual Report, <https://librairie.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/6662-electrical-and-electronic-equipment-data-2021.html> (17/08/2024).
- [6]: A. Chagnes, "Métallurgie extractive - Hydrométallurgie", Les Techniques de l'Ingénieur, M2235 v4, 21 pages (2022).
- [7]: A. Chagnes, J. Swiatowska (Editeurs), "Lithium Process Chemistry : Resources, Extractions, Batteries and Recycling", Elsevier, 2015, 313 pages (ISBN: 978-0-12-801417-2).
- [8]: A. Chagnes, Chap. 4 : Recyclage des matériaux de la transition énergétique par voie hydrométallurgique, p. 69-93 dans : M. Cathelineau (Ed.), "Le recyclage, enjeu pour l'économie circulaire", ISTE Editions (London), 2023, 333 pages (ISBN 9781789481624).
- [9]: X. Wang, G. Gaustad, Waste Management 32(10), 1903-1913 (2012).
- [10]: Z. Wu, W. Yuan, J. Li, X. Wang, L. Liu, J. Wang, Front. Environ. Sci. Eng. 11(5), 8 (2017).
- [11]: M. Kaya, Waste. Manag. 57, 64-90 (2016).
- [12]: C.J. Oh, S.O. Lee, H.S. Yang, T.J. Ha, M.J. Kim, J. Air Waste Manag. 53, 897-902 (2003).
- [13]: J. Cui, L. Zhang, J. Hazard. Mater. 158, 228-256 (2008).
- [14]: H. Yang, J. Liu, J. Yang, J. Hazard. Mater. 187, 393-400 (2011).
- [15]: E.Y. Yazici, H. Deveci, Hydrometallurgy 139, 30-38 (2013).
- [16]: M. Chen, J. Huang, O.A. Ogunseitan, N. Zhu, Y.M. Wang, Waste Manag. 41, 142-147 (2015).
- [17]: A. Isildar, J. van de Vossenberg, E.R. Rene, E.D. van Hullebusch, P.N.L. Lens, Waste Manag. 57, 149-157 (2016).
- [18]: A. Marra, A. Cesaro, V. Belgiorno, J. Clean. Prod. 186, 490-498 (2018).
- [19]: E.Y. Yazici, H. Deveci, Int. J. Miner. Process. 133, 39-45 (2014).

- [20]: M. Sethurajan, P.N.L. Lens, H.A. Horn, L.H. Figueiredo, L.H., E.D. van Hullebusch, Leaching and recovery of metals. In Sustainable Heavy Metal Remediation, 1st ed.; Rene, E.R., Sahinkaya, E., Lewis, A., Lens, P.N.L., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2017; Volume 2, pp. 161-206.
- [21]: M. Sethurajan, M., E.D. van Hullebusch, D. Fontana, A. Akcil, H. Deveci, B. Batinic, J.P. Leal, T.A. Gasche, M.A. Kucuker, K. Kuchta, Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. 49, 212-275 (2019).
- [22]: M Sethurajan, E. D. van Hullebusch, Metals 9, 1034 (2019).

Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>

Gabin GUILLEMAUD - Laura VAUCHE
João-Carlos LOPES BARBOSA - Véronique SOUSA
Léa DI CIOCCIO

Édité le
13/09/2024

école normale supérieure paris-saclay

CEA-Leti, Univ. Grenoble Alpes, F- 38000 Grenoble, France

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

Le contenu est issu d'une publication à la conférence SGE 2023, 5-7 juillet 2023, Lille.

1 - Résumé

Les composants de puissance à base de semiconducteurs à large bande interdite "Wide Band Gap (WBG)" sont intéressants pour augmenter l'efficacité énergétique des convertisseurs de puissance, par rapport aux composants conventionnels à base de silicium (Si). Alors que le potentiel gain en efficacité énergétique est connu, le coût énergétique et les autres impacts environnementaux à la fabrication restent peu documentés. En effet, à notre connaissance, il n'y a pas ou peu de données d'analyse de cycle de vie (ACV) disponibles pour les composants de puissance à base de nitrure de gallium (GaN ou GaN/Si) et carbure de silicium (SiC).

Dans cet article, nous présentons une analyse de cycle de vie du berceau à la porte pour un composant de puissance GaN/Si, permettant d'identifier les postes les plus impactants et de proposer des pistes d'éco-conception.

2 - Introduction

Les composants de puissance à base de semiconducteurs à large bande interdite semblent prometteurs par rapport au Si pour économiser l'énergie durant les phases d'usage dans de nombreuses applications telles que les onduleurs pour le photovoltaïque, l'alimentation des téléphones et PC portables, les alimentations sans interruption pour les data centers, ainsi que la motorisation et l'infrastructure de chargement pour les véhicules électriques [1], [2] ainsi que pour réaliser des convertisseurs d'énergie pour de nouvelles applications. Cependant les impacts environnementaux sur toute la phase du cycle de vie (au-delà de la phase d'usage) restent peu connus. En particulier, la fabrication de composants à base de semiconducteurs nécessite de nombreuses étapes, avec une consommation importante d'énergie, de produits chimiques et de matériaux. Dans cet article, nous évaluons les impacts environnementaux à la fabrication d'une technologie de transistors GaN/Si, de spécifications 650V 30A [3], pour une plaque de 200mm de diamètre et pour un transistor de puissance (Fig. 1a et 1b), au moyen de la méthodologie analyse de cycle de vie (ACV).

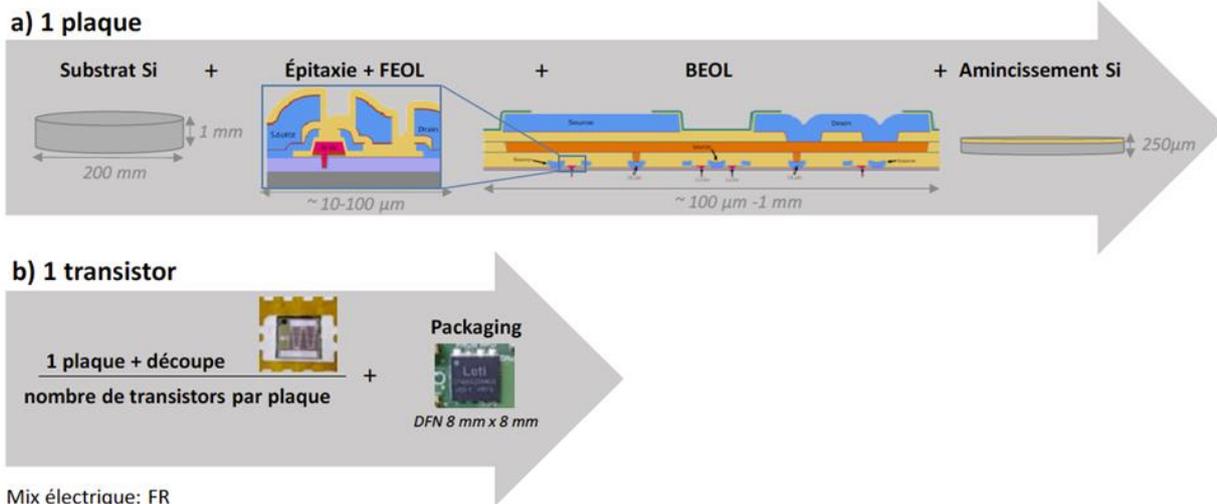


Figure 1 : Évaluation des impacts pour 2 périmètres étudiés :
a) une plaque de 200 mm de diamètre et b) un transistor.

3 - Inventaire sur cycle de vie

L'inventaire du cycle de vie est réalisé en se basant sur la fabrication au CEA-Leti, dans des salles blanches micro-électroniques de R&D, compatibles avec une ligne de production CMOS. Dans cette étude, le procédé de fabrication R&D requiert 17 niveaux de photolithographie : 10 pour le FEOL (Front End Of Line correspondant aux parties actives du transistor), 6 pour le BEOL (Back End Of Line correspondant aux connexions métalliques), et 1 pour l'amincissement du substrat. On comptabilise les entrants et les sortants depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fabrication des composants. Il s'agit alors d'une ACV du berceau à la porte. La fabrication de plaques de semiconducteurs requiert de nombreuses étapes, pour lesquelles on répertorie la consommation en produits chimiques, gaz, métaux, eau. D'autre part, le fonctionnement de l'infrastructure salle blanche nécessite une consommation importante en électricité, gaz naturel, eau adoucie et eau de refroidissement pour maintenir une atmosphère contrôlée. Le fonctionnement des équipements requiert également un raccordement aux réseaux d'eau ultra pure, de vide, et d'alimentation de différents gaz comme l'azote et l'oxygène. Des méthodologies spécifiques sont utilisées afin d'allouer ces consommations et les émissions aux différents procédés [4]-[6]. La consommation de plaques de silicium pour la qualification et le suivi des procédés ainsi qu'en tant que support mécanique pour le collage ; la fabrication des équipements ne sont pas prises en compte.

Pour une plaque de 200mm, après fabrication des transistors et amincissement du substrat Si (Fig. 1a), on calcule que la quantité de matière qui a été utilisée lors de la fabrication est 6 à 69 fois plus importante que la quantité de matière présente sur la plaque, comme reporté dans le Tableau 1.

Élément	Quantité présente sur la plaque (g)	Quantité utilisée pour la fabrication (g)	Facteur
Si	12.066	77.650	6
Ga	0.411	2.860	7
Al	0.277	4.057	15
Ni	0.098	1.047	11
Cu	0.793	27.534	35
Au	0.061	0.591	10
Ti	0.053	3.671	69
W	0.022	0.573	26

Tableau 1 : Inventaire du cycle de vie (ICV). Quantité de matière présente sur la plaque de 200mm après amincissement, comparaison avec les quantités de matière utilisées pendant la fabrication, par consommation de cibles métalliques pour les dépôts physiques par phase vapeur (PVD), et de précurseurs pour l'épitaxie et les dépôts ALD, CVD, ECD, LPCVD et PECVD.

Pour le cuivre, titane et tungstène, une quantité importante de matière a été utilisée par rapport à la quantité présente sur la plaque car une part importante des couches déposées a été retirée par CMP.

Environ 700kWh d'électricité, 15m³ d'eau de refroidissement, 0.6m³ d'eau dé-ionisée et 61kg de produits chimiques ont été utilisés pour la production d'une plaque (Fig. 1a). Les principaux produits chimiques sont l'azote, des acides tels que l'acide nitrique, l'acide chlorhydrique, l'acide sulfurique, de l'eau oxygénée, des chimies de polissage, de l'isopropanol. Ces quantités sont plus élevées que les 329kWh, 3.1 m³ d'eau et 3.6kg de produits chimiques reportés par plaque en industrie en 2011[4].

L'évaluation des impacts est réalisée en utilisant le logiciel SimaPro et la base de données ecoinvent v3.8, en suivant la méthode EF3.0 recommandée par la Commission Européenne. 16 catégories d'impacts environnementaux sont évaluées. Lorsque les données n'étaient pas disponibles dans la base de données (par exemple des précurseurs organométalliques tels que le TMGa, des résines, des chimies), elles ont été modélisées en se basant sur des méthodologies décrites dans la littérature [7], [8] ou remplacées par des données génériques présentes dans la base de données ecoinvent. Les impacts environnementaux pour la production d'une plaque (Fig. 1a), dans des salles blanches micro-électroniques de R&D sont ainsi évalués. Les 4 catégories d'impacts environnementaux prépondérantes sont l'épuisement des ressources minérales et métalliques (0.0406 kg Sb éq), l'épuisement des ressources fossiles (11820 MJ), le changement climatique (434 kg CO₂ éq) et l'écotoxicité en eaux douces (1.66 x10⁴ CTUe), contribuant à 80% du score environnemental unique (102 mPt). La répartition des contributions à ces 4 indicateurs est décrite en Figure 2.

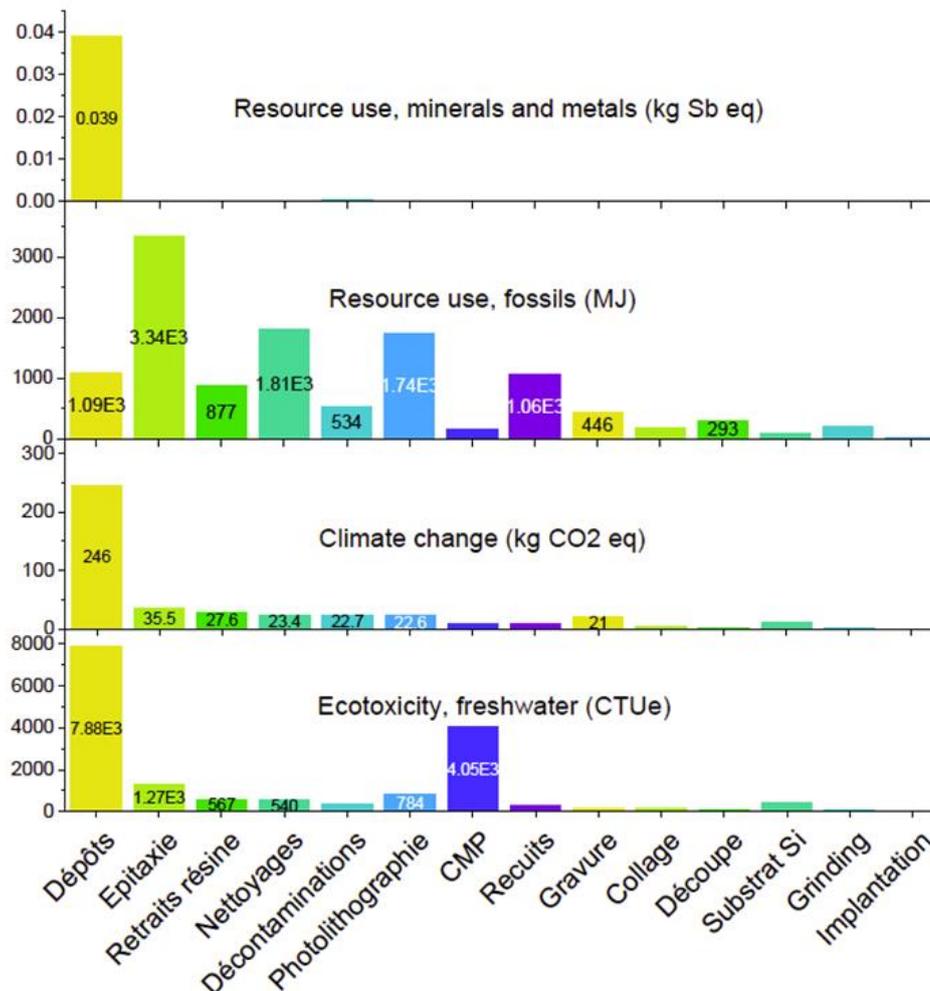


Figure 2 : Contributions des différents ateliers pour une plaque. Les contributions de fonctionnement de l'infrastructure salle blanche sont incluses dans les procédés. - R&D

Une partie importante de ces impacts est liée à une seule étape, un dépôt physique en phase vapeur (PVD) d'or en face arrière. En effet, la consommation de 0.591g d'or (donnée ecoinvent "Gold {GLO}| market for | Cut-off, U") contribue pour 95% de l'indicateur épuisement des ressources minérales et métalliques avec 0.0384 kg Sb eq. Cette donnée est également prépondérante (46% des impacts) sur l'indicateur écotoxicité en eaux douces avec 7.48×10^3 CTUe, à cause des résidus sulfurés liés à l'extraction minière de l'or. L'or fait partie des métaux ayant les impacts environnementaux les plus élevés (par kg) [9]. Pour la production d'une plaque, l'or ne représente que 3% des impacts sur l'épuisement des ressources fossiles avec 375MJ et 6% des impacts sur le changement climatique avec 28.9 kg CO₂ eq. Il est à noter que seulement 61mg d'or ont été déposés sur la plaque et que la consommation de 591 mg a été estimée sur la base de données internes et non mesurée directement. D'autre part, une partie de l'or consommée et non déposée sur la plaque est en fait récupérée, affinée et réutilisée, ce qui permettrait de réduire les impacts, mais n'a pas été pris en compte dans l'ACV par manque de données.

L'étape d'épitaxie ressort comme très impactante sur l'épuisement des ressources fossiles (Fig. 2) de par sa consommation d'électricité directement pour le procédé, et pour le fonctionnement de l'infrastructure salle blanche pendant plusieurs heures. Le substrat Si contribue peu, avec seulement 98 MJ.

Les émissions de gaz fluorés (notamment C₂F₆, CF₄, NF₃, CHF₃) pendant les étapes de nettoyage de la chambre de PECVD ressortent comme très impactantes sur le changement climatique (jusqu'à

58kg CO₂ eq pour une seule étape), de par l'absence de système d'abattement sur un des équipements utilisés. Les équipements de gravure avec consommation de chimies fluorées et chlorées sont munis de systèmes d'abattement efficaces et donc ne contribuent pas significativement au changement climatique par rapport aux autres étapes dans cette étude.

La potasse (KOH) utilisée dans les chimies de polissage (CMP) contribue significativement à l'écotoxicité en eau douce (3.68 x10³ CTUe). La composition des chimies propriétaires a été soit modélisée à partir de fiches de sécurité, publications et brevets, soit modélisée avec des données génériques présentes dans la base de données ecoinvent. Ici, une des chimies de polissage a été modélisée avec la donnée générique « Silica Slurry {GLO}| market for | Cut-off, U » contenant du KOH. Ces résultats montrent l'importance de données fiables dans les bases de données et d'avoir accès aux informations détaillées sur la composition des chimies utilisées.

Une autre manière de représenter ces résultats est de séparer les contributions liées aux consommations de l'infrastructure salle blanche des procédés.

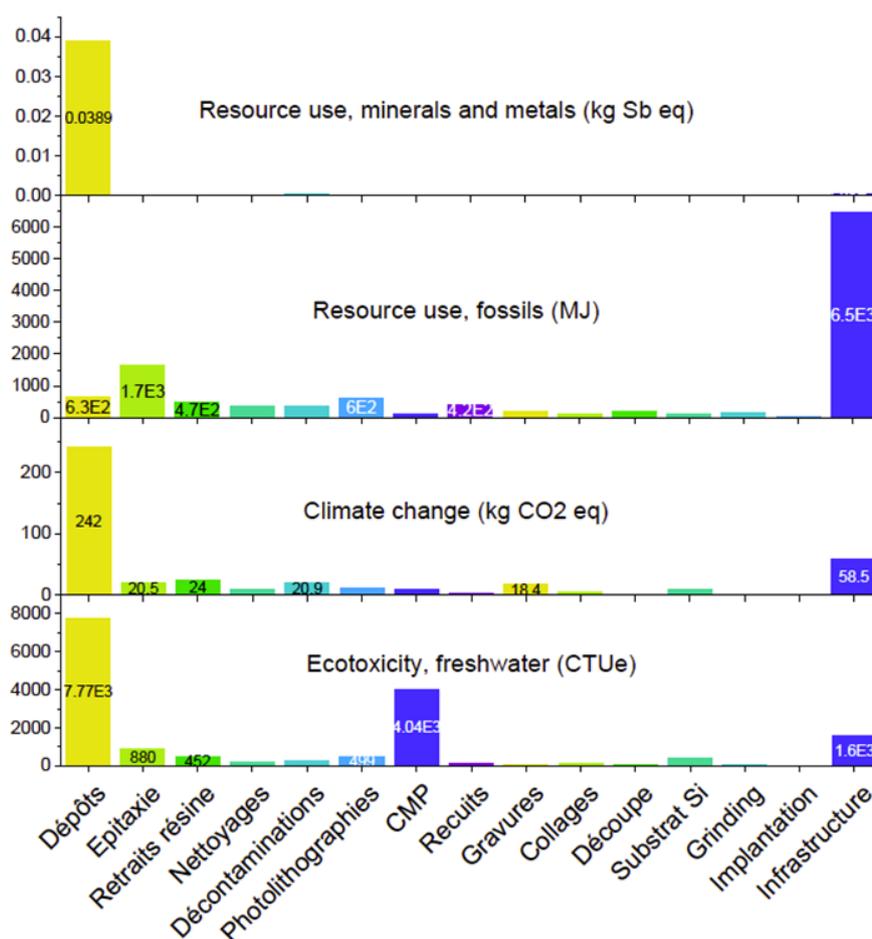


Figure 3 : Contributions des différents ateliers pour une plaque. Les contributions de fonctionnement de l'infrastructure salle blanche sont affichées séparément. - R&D

La Figure 3 nous montre que les impacts proviennent majoritairement des procédés pour les indicateurs épuisement des ressources minérales et fossiles, changement climatique et écotoxicité. L'impact de l'infrastructure salle blanche est prépondérant pour l'épuisement des ressources fossiles, à cause de la consommation d'électricité et de gaz naturel.

Avec un scénario plus « industriel » ou « optimisé » (avec un système d'abattement des gaz fluorés pour les dépôts, sans les décontaminations liées aux contraintes du centre de R&D, remplacement de l'or en face arrière par de l'argent), les 6 catégories prépondérantes sont

l'épuisement des ressources fossiles (11093 MJ), les radiations ionisantes (453 kBq U-235 eq), le changement climatique (195 kg CO₂ eq), l'écotoxicité en eaux douces (8890 CTUe), l'eutrophisation de l'eau douce (0.217 kg P eq) et l'épuisement des ressources minérales et métalliques (0.00238 kg Sb eq), contribuant à 84% du score environnemental unique (42 mPt). La répartition des contributions à ces 6 indicateurs est décrite en Figure 4.

L'identification des postes les plus impactants permet de proposer des pistes d'éco-conception sur lesquelles travailler en priorité pour réduire les impacts, que ce soit au niveau intégration (choix des métaux, nombre d'étapes), procédés (choix des chimies, diminution des consommations, recettes de nettoyage) et infrastructure (installation d'un système de traitement des rejets atmosphériques, amélioration de la performance énergétique).

Pour l'instant, le packaging pour les composants GaN est souvent effectué avec les mêmes boîtiers que pour les composants Si, bien que des packagings plus adaptés (notamment en termes de dissipation thermique) existent. Dans cette étude, on considère qu'après découpe de la plaque, les différentes puces sont mises en boîtier DFN et connectées avec des fils de bonding en or (Fig. 1b). La quantité de matière présente dans un boîtier de 8x8mm² (sans la puce) est décrite dans le Tableau 2.

Élément	Quantité présente dans le packaging (mg)
Cu	37.4
Ni	0.03
Au	12.1
Polymère epoxy	103

Tableau 2 : Inventaire de cycle de vie (ICV). Quantité de matière présente dans le packaging

Pour un transistor de spécifications 650V 30A, on estime qu'on peut extraire environ 2000 puces d'une plaque de 200mm de diamètre, mais ce chiffre peut varier en fonction des performances électriques telles que le R_{ON}, et les rendements de production. Pour un boîtier (sans la puce, sans l'inventaire complet des procédés de fabrication, uniquement pour les matériaux listés dans le Tableau 2), la catégorie prépondérante d'impact est l'épuisement des ressources minérales et métalliques (kg Sb eq), contribuant à 85% du score environnemental unique (1.09 mPt), principalement de par l'utilisation de fils d'or. Comme les fils d'or sont très impactants, il a déjà été suggéré de les remplacer par des fils en Cu, permettant une réduction significative des impacts environnementaux [10]. Bien que le back-end n'ait pas été pris en compte dans des études précédentes de par une contribution plus faible à l'indicateur énergie grise (énergie consommée pour fabriquer les produits), l'impact élevé de l'or montre qu'il est nécessaire d'inclure le back-end dans l'analyse des impacts environnementaux [2].

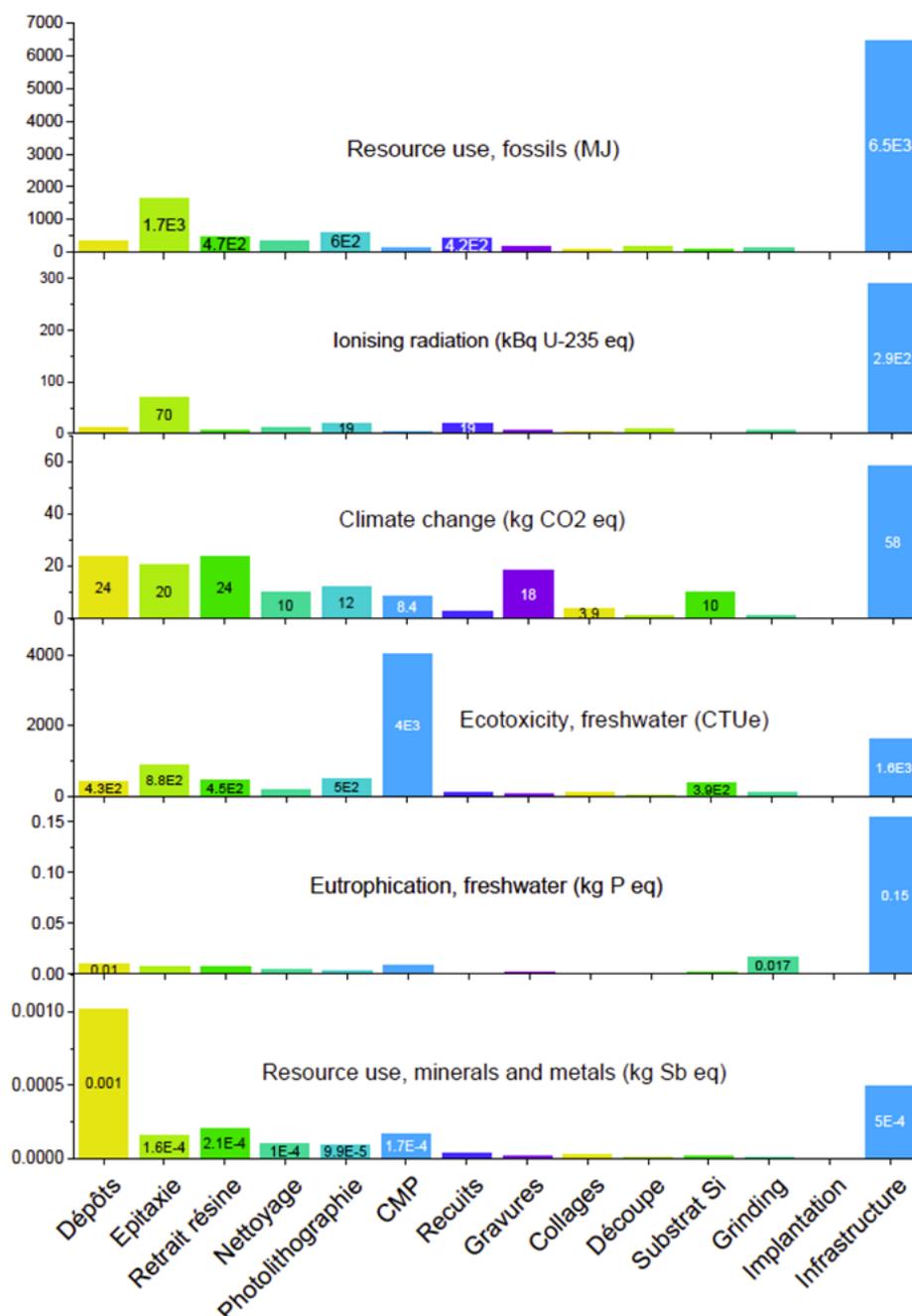


Figure 4 : Contributions des différents ateliers pour une plaque. Les contributions de fonctionnement de l'infrastructure salle blanche sont affichées séparément. - scénario « industriel » (avec un système d'abattement des gaz fluorés pour les dépôts, sans les décontaminations liées aux contraintes du centre de R&D, remplacement de l'or en face arrière par de l'argent)

4 - Conclusion

En résumé, dans cette publication l'empreinte carbone à la fabrication d'un transistor GaN/Si 650V 30A est estimé entre 0.12 à 0.81 kg CO₂ eq suivant les options retenues. On considère 0.12 à 0.22 kg CO₂ eq par puce, suivant le scénario (« industriel » ou R&D), pour une hypothèse de production de 2000 composants par plaque, plus 0.004 à 0.59 kg CO₂ eq par boîtier DFN (suivant le métal utilisé pour les fils de bonding). Ces chiffres pour la fabrication de composants sont comparés à ceux communiqués dans la littérature, les bases de données, et dans les communications des fabricants de produits microélectroniques dans le Tableau 3.

Composant	kg CO ₂ eq
GaN/Si (puce seule) Boîtier DFN	0.12 à 0.22
GaN/Si (puce + boîtier DFN, ~0.24g) - cette étude	0.004 à 0.59 0.12 à 0.81
GaNFast power IC 2020 - Navitas Semiconductor [11]	0.18
Wafer production, fabricated, for IC, 1.35g - ecoinvent*	0.015
Si FET 2020 - Navitas Semiconductor [11]	0.66
Si P2PAK, 1.35g - CODDE, France	1.13
Si P2PAK, 1.35g - CODDE, Chine	2.37
Si TRIAC - ST Microelectronics [13]	7.8
Si IGBT (puce 1.26g, modélisée par Si + électricité), Chine [14]	16.7
SiC MOSFET - ST Microelectronics [15]	<0.206

Tableau 3 : Comparaison de l’empreinte carbone (kg CO₂ eq) à la fabrication du transistor GaN/Si de cette étude avec d’autres composants de puissance. *Cette donnée est utilisée pour l’inventaire de cycle de vie d’un IGBT par Nordelöf et al.[12].

On remarque que les valeurs peuvent varier fortement d’une étude à l’autre, rendant la comparaison difficile. En effet, la dimension (épaisseur, surface) et le poids des composants peuvent varier suivant les spécifications électriques, le type de packaging, et les applications, et ne sont pas toujours mentionnés. Le périmètre de l’étude tel que le mix électrique du pays dans lequel est fabriqué le composant peut aussi impacter significativement les résultats (x2 pour le P2PAK entre France et Chine). Sans ces informations, il n’est pas possible de comparer les composants entre eux. A noter également que le changement climatique n’est pas le seul impact environnemental prépondérant et qu’il serait intéressant de pouvoir comparer les impacts sur plusieurs indicateurs communs (par exemple par une méthodologie multicritère comme l’ACV), afin de s’assurer qu’il n’y ait pas de transfert d’impacts.

Dans le domaine de l’électronique de puissance, contrairement au numérique, comme la consommation énergétique est plus importante pendant la phase d’usage que pendant la fabrication [2], [13], [15], [16], il sera important de prendre en compte la totalité du cycle de vie (extraction des matières premières, fabrication, usage, transport, fin de vie). Finalement, il faudra également considérer le convertisseur complet pour une application donnée (intensité d’usage, durée de vie) afin de pouvoir conclure sur les potentiels bénéfiques environnementaux par rapport aux composants classiques à base de Si et aux composants à base de SiC.

Les auteurs et autrices remercient le réseau des Carnot pour le financement du projet ainsi que les équipes du LAPS et éco-innovation pour leurs contributions.

5 - Références bibliographiques

- [1] M. Makoschitz, K. Krischan, P. Bergmann, A. Díaz, and R. Brueniger, “Wide Band Gap Technology: Efficiency Potential and Application Readiness Map,” IEA Technology Collaboration Programme on Energy Efficient End-Use Equipment (4E) - Power Electronic Conversion Technology Annex (PECTA), May 2020.

- [2] J. A. Warren *et al.*, “Energy Impacts of Wide Band Gap Semiconductors in U.S. Light-Duty Electric Vehicle Fleet,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 49, no. 17, pp. 10294-10302, Sep. 2015, doi: 10.1021/acs.est.5b01627.
- [3] C. Le Royer *et al.*, “Normally-OFF 650V GaN-on-Si MOSc- HEMT Transistor: Benefits of the Fully Recessed Gate Architecture,” in *2022 IEEE 34th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)*, 2022, p. 3.
- [4] A. Villard, “Développement de méthodologies d’Eco- conception pour le secteur microélectronique,” PhD thesis, Université de Grenoble, 2012.
- [5] J. C. Lopes Barbosa, V. Enyedi, L. Di Cioccio, P. Zwolinski, and C. LARGERON, “Développement d’une méthodologie de collecte de données pour l’Analyse du Cycle de Vie (ACV) dans l’environnement de la recherche,” presented at the AXELERA, Oct. 13, 2022.
- [6] Laurie Beu and Sebastien Raoux, “Chapter 6: Electronics Industry Emissions,” in *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, vol. Volume 3: Industrial Processes and Product Use, .
- [7] S. B. Boyd, *Life-Cycle Assessment of Semiconductors*. New York, NY: Springer New York, 2012.
- [8] E. Huber, V. Bach, P. Holzapfel, D. Blizniukova, and M. Finkbeiner, “An Approach to Determine Missing Life Cycle Inventory Data for Chemicals (RREM),” *Sustainability*, vol. 14, no. 6, p. 3161, Mar. 2022, doi: 10.3390/su14063161.
- [9] P. Nuss and M. J. Eckelman, “Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis,” *PLoS ONE*, vol. 9, no. 7, p. e101298, Jul. 2014, doi: 10.1371/journal.pone.0101298.
- [10] C.-H. Kuo, A. H. Hu, L. H. Hung, K.-T. Yang, and C.-H. Wu, “Life cycle impact assessment of semiconductor packaging technologies with emphasis on ball grid array,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 276, p. 124301, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124301.
- [11] A. Schiro and L. Vaughan-Edmunds, “GaN ICs Drive Sustainability and Deliver CarbonNeutral Status,” *Power Electronics News*, Oct. 17, 2022.
- [12] A. Nordelöf and M. Alatalo, “A Scalable Life Cycle Inventory of an Automotive Power Electronic Inverter Unit,” CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Gothenburg, Sweden, Technical and Methodological Description, version 1.01 2016:5 (1.01), 2018.
- [13] “Footprint of a TRIAC Power Switch,” *ST - About ST - Sustainability - Sustainable Priorities - Sustainable Technology - Product development*. https://www.st.com/content/st_com/en/about/st_approach_to_sustainability/sustainability-priorities/sustainable-technology/eco-design/footprint-of-a-triac-power-switch.html (accessed Aug. 24, 2022).
- [14] J. Li, C. Wang, and B. Zhang, “Life Cycle Assessment of Typical Electric Vehicle IGBT Module,” *MSF*, vol. 847, pp. 398-402, Mar. 2016, doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.847.398.
- [15] “Footprint of a SiC MOSFET.” https://www.st.com/content/st_com/en/about/st_approach_to_sustainability/sustainability-priorities/sustainable-technology/eco-design/footprint-of-a-sic-mosfet.html (accessed May 04, 2023)
- [16] A. Díaz Triana, S. Schmidt, S. Glaser, and M. Makoschitz, “A ‘life cycle thinking’ approach to assess differences in the energy use of SiC- vs. Si power semiconductors,” in *e.nova 2021 Conference “Green Deal, Energy - Building - Environment”*, 2022, p. 10.

Adéquation des véhicules faibles consommations énergétiques électriques (Xdefi ADEME)

Arnaud SIVERT¹, Gabriel PLASSAT², Franck BETIN¹

Édité le
16/09/2024

¹ I.U.T de l'Aisne Département Génie Electrique SOISSONS FRANCE
Laboratoire pour l'Innovation Technologique (L.T.I)

² chargé de mission mobilité ADEME

Cette ressource fait partie du N° 113 de La Revue 3EI du troisième trimestre 2024.

De nombreux véhicules intermédiaires faibles consommations sont en train de voir le jour avec la raréfaction de l'énergie bon marché et la décarbonations de la mobilité. Cet article présente les conditions d'adéquation entre le prix, la masse, la consommation, l'autonomie, le volume utile et la fiabilité pour qu'un véhicule intermédiaire puisse trouver un marché porteur.

1 - Introduction

Le déclin de la production de pétrole et la stagnation du nombre de centrale électrique vont faire que l'énergie va peser de plus en plus lourd sur le budget des ménages. Le coût de l'énergie contraindra la consommation nécessaire à la mobilité et la gestion des ressources. Dans un monde aux ressources limitées (matière, revenus, temps, consommation d'énergies caloriques et électriques, obsolescence), la question du choix du véhicule adapté à l'usage devient de plus en plus pertinente.

Entre le vélo électrique (25kg, 14W.h/km à 25km/h) et la voiture (1500kg, 150W.h/km à 45km/h) [1], un marché du véhicule intermédiaire est en train de voir le jour [2] en passant par le vélo cargo 40kg, le scooter de 90kg et les voitures sans permis qui font 450kg. La figure 1 illustre la consommation des véhicules en fonction de la masse et du volume transportable.

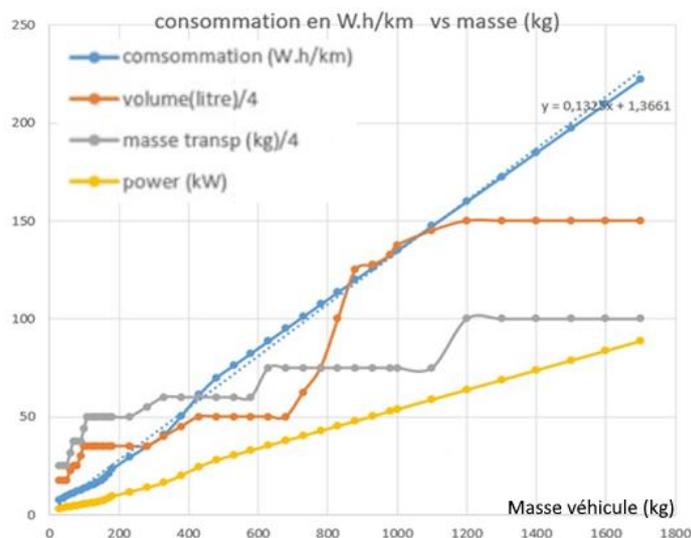


Figure 1 : Consommation d'un véhicule en fonction de sa masse et de son volume transportable

On peut observer l'absurdité de l'utilisation d'un véhicule de 1500kg pour le transport d'une personne seule mais qu'en revanche, ce véhicule devient pertinent pour les usages du quotidien qui nécessitent le transport de volumes ou de masses importants.

Depuis 2021, l'ADEME a mis en place un challenge appelé « Extrême défi » pour aider des constructeurs à réaliser des véhicules du futurs suffisamment adaptés au public pour créer un marché [3, 4]. En effet, par le passé, de nombreuses sociétés qui réalisaient des prototypes faibles consommations d'énergies se sont confrontées à cette absence de marché et ont dû arrêter leurs productions (le [Bio-Hybrid de Schaeffler](#), le DryCycle, Le Padillo, le Cabriovelo, le Begorett, l'Organic Transit's Elf, [Evovelo](#), Velocity (B'Twin), Aerorider, [BMW C1](#) [6], ...).

« L'Extrême défi » consiste donc à réaliser un véhicule permettant de transporter une personne de 80kg et une charge de 80kg en essayant de consommer 10 fois moins qu'une voiture standard [8, 9].

Par ailleurs, pour obtenir l'adhésion des consommateurs, de nombreux points de blocages sont à analyser :

- Ergonomie et confort (pour un vélo, selle, poignée, hauteur du guidon qui provoque problème fesse, poignée, mains, dos, nuque), complexité de l'amortissement des tricycles et quadricycles.
- Effort de pédalage (masse, coefficient résistif des pneus, aérodynamique, changement de braquet),
- Sécurité d'utilisation (étrier de freins, plaquettes), partage de la route, casque, ...
- Météo (habit spécialisé pour l'hiver, l'été, entre deux saisons), carénage
- Limitation de la bagagerie (volume, masse à emporter...),
- Vol (antivol, trackers), assurance,
- Eclairage (pour se faire voir de jour et voir de nuit)
- Législation, vitesse et puissance limitées,
- Autonomie, prix, rayon d'action....

2 - La consommation

Pour répondre au défi posé par l'ADEME, il faut en premier lieu s'intéresser à la consommation du véhicule. Dans le domaine des véhicules routiers, la norme WLTC fait référence. Pour cette étude, nous prenons l'exemple d'un vélo couché. Son profil WLTC (classe 1 [7]) est tracé sur la figure 2. On peut observer que la valeur moyenne de la vitesse est de 29,3km/h sur 16 minutes sur une distance de 8,1km sans pente.

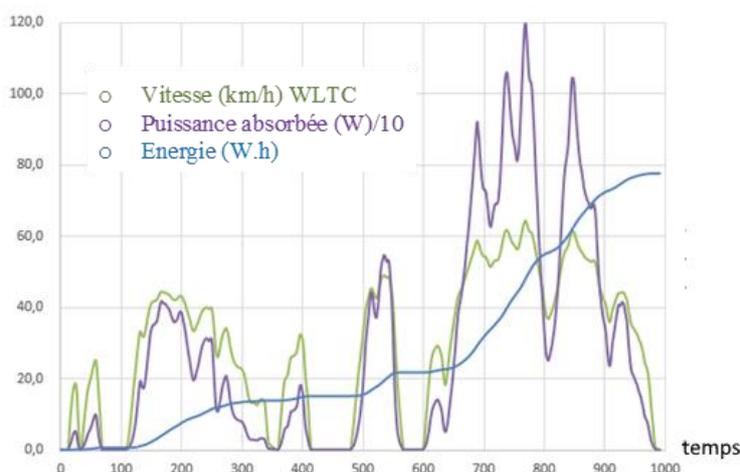


Figure 2 : Profil de vitesse procédure de test consommation d'un véhicule WLTC pour un vélo couché elec

La consommation du véhicule calculée à partir des tests WLTC pour un trajet ne donnera pas l'autonomie réelle de l'utilisation d'une voiture. En effet, la vitesse moyenne ne sera pas la même et le dénivelé [5, 10] ainsi que la consommation des accessoires de chauffage ou de climatisation ne sont pas pris en compte. Par conséquent, les consommateurs constatent en général une plus faible autonomie que celle annoncée dans ce test.

Cependant, il existe des planificateurs de trajet pour voitures électriques qui permettent d'estimer la consommation en fonction du dénivelé, du trafic (vitesse moyenne, nombre d'accélération) et de la température extérieure, déterminant ainsi le SOC de la batterie et proposant la position géographique des bornes de recharge...

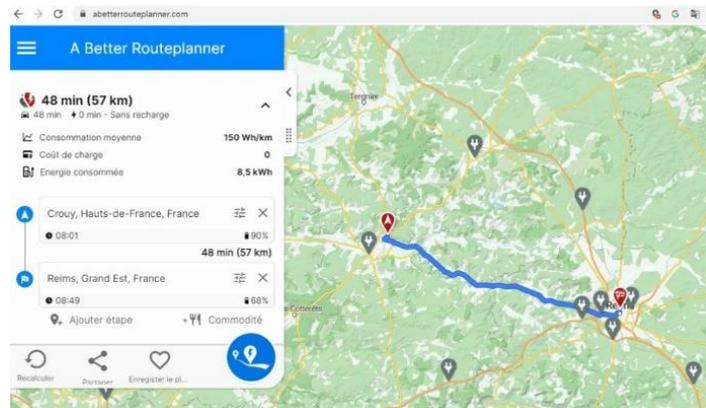


Figure 3 : Planificateur ABRP [13] de trajet avec consommation moyenne et énergie consommée pour voiture électrique

À ce jour, l'estimateur de consommation ABRP ne prend pas en compte le chauffage ou la climatisation qui utilise environ 10% en plus de la batterie [13] et il n'est pas possible de rentrer les coefficients de son propre véhicule (coefficient aérodynamisme et roulement)

Pour les vélos à assistance électrique, dans le trip simulateur ebikes.ca, il est possible de personnaliser les paramètres de son véhicule et d'estimer la consommation énergétique mais aussi la température du moteur (permettant ainsi de ne pas dépasser la température d'émaillages des bobines environ 120°C [16]).



Figure 4 : Estimateur de consommation et de température moteur d'un vélo couché à une vitesse moyenne de 37km/h.

La consommation va dépendre de sa masse et de son confort. En effet, plus un véhicule aura de roues (2, 3 ou 4), plus il sera stable pourra transporter de choses mais plus il sera lourd et moins il

aura un bon aérodynamisme. La flexibilité du véhicule et la sécurité fonctionnelle (remorque, sacoche facilement détachable...) permettront une meilleure adhésion du public en fonction de leurs besoins.

Dans le cahier des charges du Xdefi, la simplicité de fabrication, la mutualisation de composants et les choix de type de matériaux doivent permettre une production de masse ainsi qu'une maintenance aisée afin de baisser les coûts et d'augmenter la durée de vie du véhicule.

De nombreux véhicules de l'extrême défi utilisent la puissance humaine avec une hybridation parallèle ou série [9, 10]. Mais à partir de quelle masse de véhicule le pédalage est-il encore pertinent ? Comment faire le choix de la puissance en fonction de la masse, l'aérodynamisme du véhicule ? Quelles seront les variations de la consommation en fonction de la masse, vitesse limite, performance du moteur ?

3 - Couple de charge demandé par le véhicule

Les performances des moteurs électriques brushless dépendent du couple résistant du véhicule. Donc, la puissance du véhicule dépendra de la résultante du couple et de la vitesse maximale désirée. En effet, le rendement dépend du couple résistant qui peut être mis sous l'équation suivante pour un véhicule (1) :

$$T_{load}(N.m) = \left[k_{Aero} \cdot Vit^2 + \left(Cr + \frac{pente(\%)}{100} \right) \cdot \frac{M \cdot g}{3,6} - \frac{P_{humaine}(W)}{Vit(km/h)} \right] \left[\frac{D_{roue}}{2} \cdot \frac{2,54}{100} \cdot 3,6 \right] \quad (1)$$

Dans laquelle on trouve :

- k_{Aero} : coefficient aérodynamique $W/(km.h)^3$,
- M (kg) : masse totale (véhicule, conducteur, passager, charge utile),
- g (m/s^2) : constante de gravitation,
- Cr : coefficient de roulement des pneus, (sans unité)
- $pente$: pente moyenne de la route sur un trajet (sans unité)
- D_{roue} : diamètre de la roue (en pouce)

Le coefficient aérodynamique et de roulement du véhicule se déterminent en traçant la courbe de la puissance en fonction de la vitesse avec les différentes options d'utilisation (figure 5).

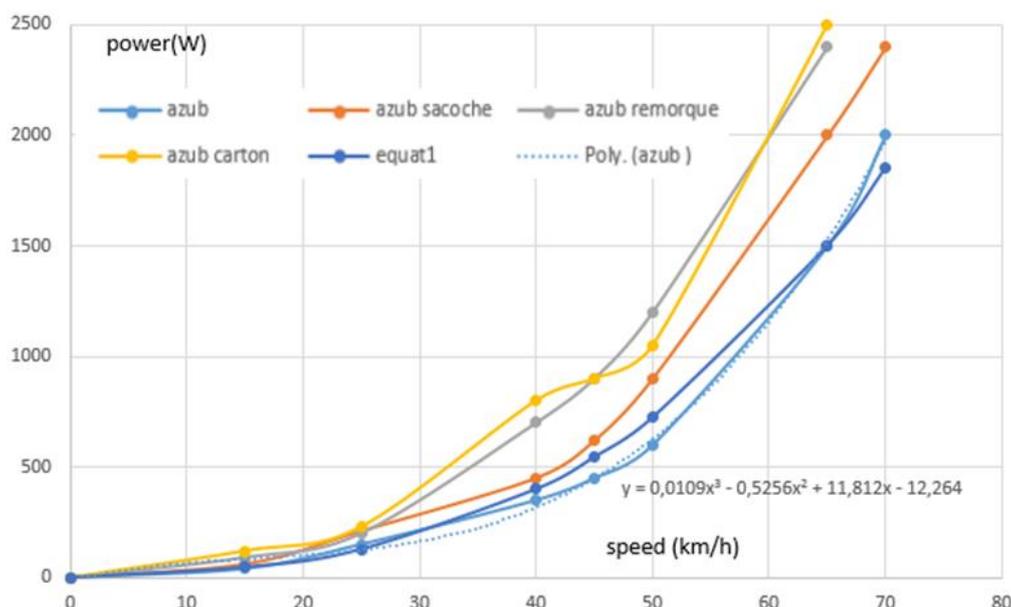


Figure 5 : Puissance absorbée d'un vélo couché en fonction de la vitesse avec sacoche et remorque [9]

Quel diamètre de roue choisir ?

Le choix d'une roue de 20 pouces permet d'avoir un couple de charge plus faible par rapport à un 26 pouces. Donc en petite roue, le courant appelé par le moteur est plus faible et le rendement meilleur. En revanche, avec une roue de 20 pouces, le véhicule aura une vitesse de pointe plus faible qu'en 26 pouces, pour une certaine tension de batterie. Plus le diamètre d'une roue est important plus les petites dégradations de la route sont minimisées. De plus, le volume d'air que doit contenir un pneumatique est proportionnel à la masse qu'il porte, l'amortissement est d'autant meilleur que le volume d'air est grand.

Le diamètre de roues de 20 pouces est le plus petit disponible si l'on souhaite utiliser un dérailleur classique car celui-ci toucherait le sol avec un diamètre de roue de 16 pouces. Le choix pour le diamètre de la jante est donc restreint.

Critères de choix du moteur :

Par simplification, on considère que le moteur brushless se comporte comme un moteur DC avec une résistance équivalente R_m dont le courant moteur aura l'équation suivante avec k_m correspondant à la constante de couple du moteur :

$$I_{m\ motor}(A) = T_{load}/k_m \quad (2)$$

On négligera toutes les pertes électriques du moteur sauf celle des pertes joules du moteur :

$$Perte (W) = R_{m\ equivalent} \cdot I^2 \quad (3)$$

Par conséquent, la puissance absorbée est déterminée par la relation suivante :

$$P_m(W) = \left[k_{Aero} \cdot Vit^3 + \left(Cr + \frac{pente(\%)}{100} \right) \cdot \frac{M \cdot g \cdot Vit(km/h)}{3,6} - P_{humaine} \right] + R_m \cdot I^2 \quad (4)$$

Evidemment, le moteur idéal devrait posséder une résistance très faible mais cela surdimensionne la masse de cuivre des bobines et la taille des aimants du moteur synchrone. Le tableau suivant présente les caractéristiques de quelques moteurs roues commercialisées.

Tableau 1 : Coefficient de moteur roue

Type de moteur	K_m N.m/A	R_m Ω	Masse kg	I_{max} (A)	Prix €
Moteur 9CRH212	0,84	0,522	5,5	30	300
HT3525 crystalte	1,31	0,56	7	30	420
HS3540 crystalte	0,94	0,3	7	40	420
Mxus 4505	1,21	0,12	8,5	50	150

La puissance et la masse du moteur doivent être optimisées par rapport au véhicule pour avoir une dynamique appropriée au trafic. Avec un moteur surdimensionné, il est possible lors de la réalisation de prototypes de limiter la vitesse, la puissance, de régler des correcteurs proportionnel intégral pour le « cruise control ».....

Mais quelle sera la performance du moteur en fonction de la vitesse et quelle sera la consommation ?

4 - Performance moteur et consommation véhicule

Sur la figure suivante, on peut observer le rendement en fonction de la vitesse pour différentes pentes d'un vélo couché avec les coefficients de véhicule du tableau suivant et pour le moteur 9C RH212.

Tableau 2 : Coefficient du véhicule

Type de cycle	k_{aero} W/(km/h) ³	$C_{roulement}$	Masse totale Kg (véhicule+ cycliste+ bagages, accessoires...)
Vélo couché	0,0035	0,004	123

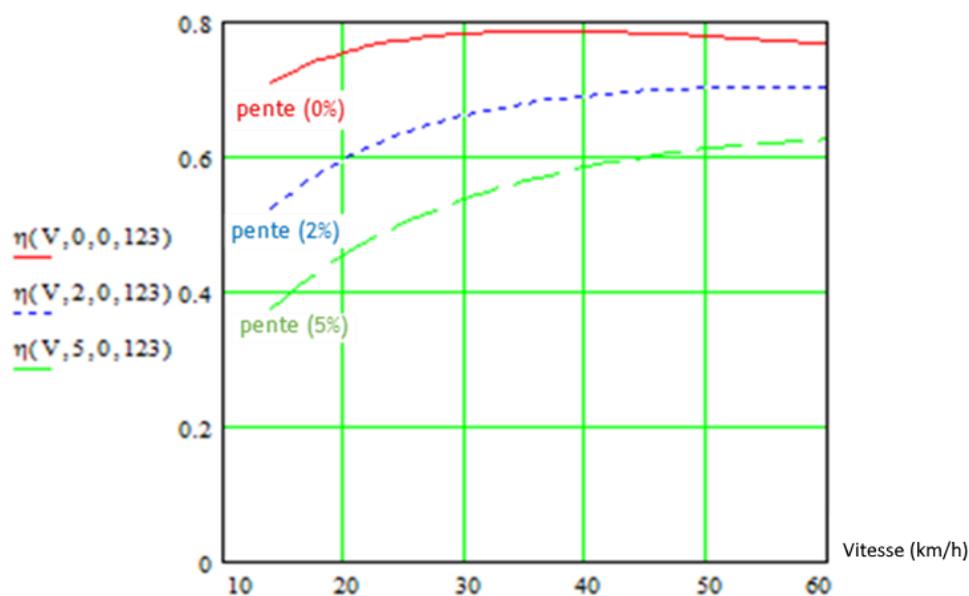


Figure 6 : Rendement d'un vélo couché en fonction de la vitesse et de la pente (masse de 123kg)

On peut observer que le rendement est dégradé pour les basses vitesses et pour les pentes importantes car le courant du moteur est important. Ce courant provoque des pertes en chaleur dans le bobinage du moteur. Par conséquent, la consommation du véhicule va dépendre de la masse, de l'aérodynamisme, de la vitesse et des performances du moteur. La performance d'un véhicule sur un parcours est associée à sa consommation énergétique en W.h/km qui est déterminée par l'équation suivante (5) :

$$C_{ons}(W.h / km) = P_m(W) / Vit(km / h)$$

$$C_{ons} = \left[k_{Aero} \cdot Vit^2 + \left(C r + \frac{pente(\%)}{100} \right) \cdot \frac{M \cdot g}{3,6} - \frac{P_{humaine}}{Vit(km/h)} \right] + \frac{Rm}{Vit(km/h)} \cdot I^2 \quad (5)$$

Pour une puissance musculaire nulle, on peut observer que pour les moteurs roues, il y a une inflexion minimale de consommation en fonction de la vitesse pour différentes pentes.

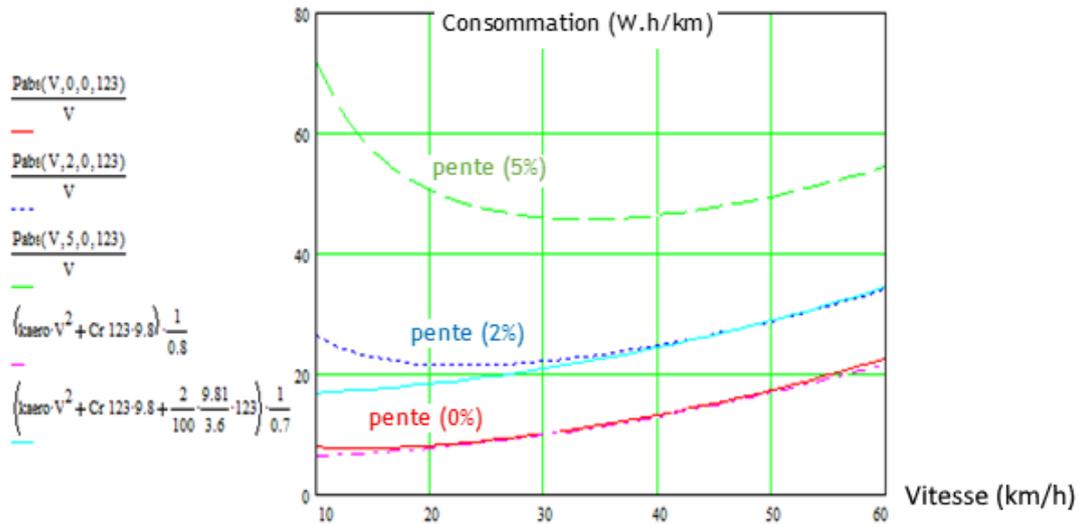


Figure 7 : Consommation d'un vélo couché en fonction de la vitesse et de la pente pour une masse de 123kg

Pour améliorer les performances du moteur dans les basses vitesses, on pourrait envisager l'utilisation d'une boîte de vitesses mais cette solution est exclue du fait de la masse rajoutée mais surtout de son prix. Toutefois, les moteurs pédaliers utilisent le dérailleur pour améliorer le rendement du moteur et certains moteurs pédaliers possèdent une boîte interne tel que le moteur cyclee Valeo Effigear proposé à ce jour au prix de 1200€.

Lorsqu'on ajoute une puissance musculaire de pédalage supérieure à 100W, celle-ci aide le moteur dans les basses vitesses, donc il n'y a plus d'inflexion minimale de la consommation comme on peut l'observer sur la courbe suivante toujours pour 3 pentes différentes de 0%, 2%, 5%.

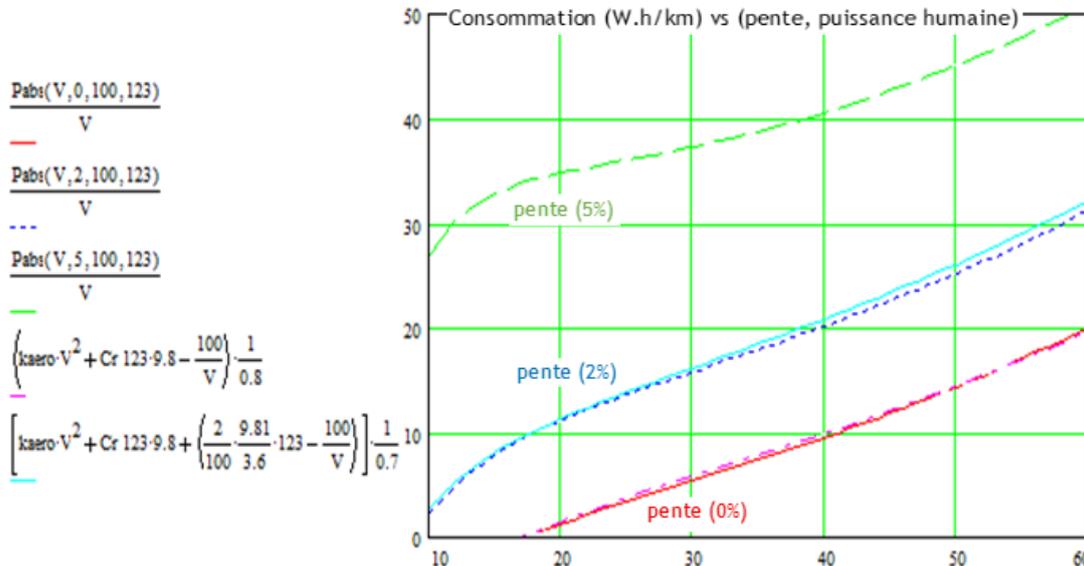


Figure 8 : Consommation d'un vélo couché en fonction de la vitesse avec une puissance humaine de 100W

En ville où il y a de nombreux arrêts, la consommation des démarrages ne peut pas être négligée. A chaque démarrage, la consommation est donnée par la relation suivante :

$$C_{onsdemarrage}(Wh) \approx \frac{Masse}{2 \cdot 3600} \cdot \frac{Vit}{3.6} \left[\frac{Vit}{3.6} + \frac{Rm}{k_m} \cdot I_d \cdot \frac{Droue \cdot 2.54}{100} \right] nbr_{demarrage} \quad (6)$$

Avec un courant de démarrage I_d correspondant à la limitation du courant du variateur qui est de 100 à 180A en fonction des transistors utilisés.

Par ailleurs, dans le cas d'un velo couché de 123kg, pour atteindre 45km/h alors il faut ajouter à la consommation 11,43W.h pour chaque démarrage alors que l'énergie cinétique de l'accélération n'est que de 2,6W.h. S'il y a un arrêt tous les kilomètres, il faut rajouter à la consommation du véhicule 11,43W.h/km.

Par conséquent, plus la vitesse moyenne du véhicule est grande et plus il consomme. De même pour la pente moyenne, plus elle est importante et plus le véhicule consomme. Mais, quelle sera la sensibilité de la consommation du vehicule en fonction des paramètres précédents ?

5 - Sensibilité de la consommation du véhicule

En faisant la dérivée partielle de l'équation de la consommation du vehicule (6) en fonction de la vitesse moyenne, de la pente moyenne, de la puissance humaine, il est possible de connaître la sensibilité de la consommation à tous ces paramètres comme le montre la relation (7) :

$$C_{ons} = \int \frac{\partial C_{ons}}{\partial Vit} \cdot dVit + \int \frac{\partial C_{ons}}{\partial pente} \cdot dpente + \int \frac{\partial C_{ons}}{\partial P_{humaine}} \cdot dP_{humaine} \dots \quad (7)$$

L'équation de la dérivée de la consommation par rapport à la vitesse peut être simplifiée par (8) :

$$\frac{\partial C_{ons}}{\partial Vit} \approx 2 \cdot k_{aero} \cdot Vit + \left(\frac{3,6}{100} \cdot 2,54 \cdot k_{aero} \cdot \frac{Rm}{km} \cdot D_{roue} \cdot Vit \right)^2 \quad (8)$$

Sur la figure 9, la consommation due à la vitesse est représentée par la courbe bleue, celle du roulement des pneus par la courbe verte et la consommation totale avec le rendement du moteur par la courbe rouge.

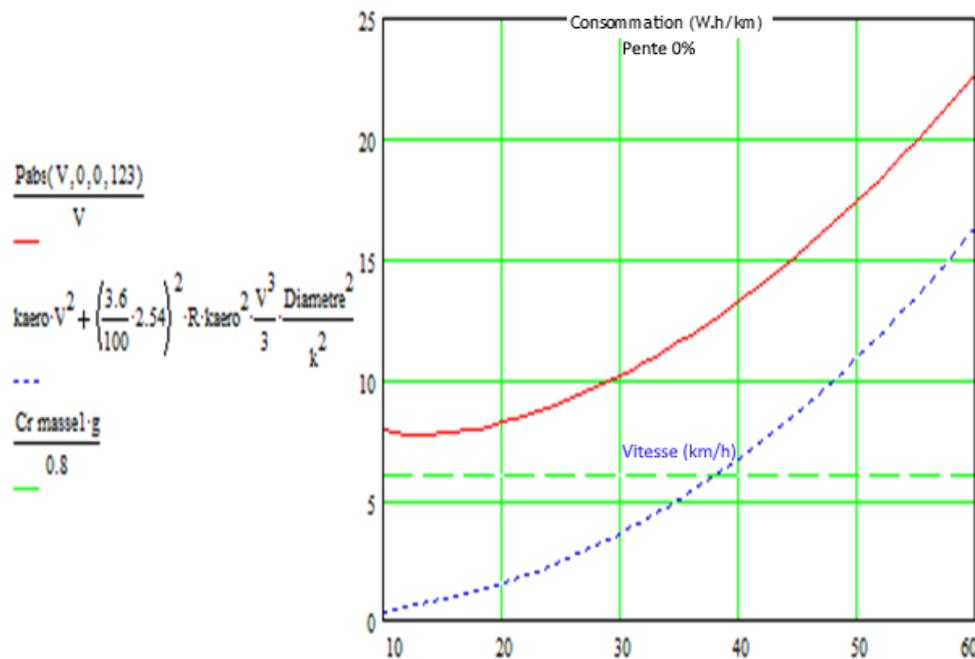


Figure 9 : Consommation d'un vélo couché en fonction de la vitesse (km/h) et sa sensibilité

Pour les véhicules de la micromobilité inférieures à la vitesse de 25km/h, l'aérodynamisme peut être négligée sauf pour les territoires venteux. Par contre, pour les véhicules roulant à 45km/h, le design pour minimiser l'aérodynamisme est pertinent pour avoir une consommation faible malgré l'ajout d'un carénage.

La sensibilité de la consommation vis-à-vis de la pente moyenne est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{\partial C_{onc}}{\partial pente} \cong \frac{1}{100} \cdot \frac{M \cdot g}{3.6} \cdot \frac{1}{\eta_{moteur}} \quad (9)$$

avec

$$pente_{moy}(\%) = \frac{D_{denivelé}^+(m)}{Distance(km) \cdot 10} / km \quad (10)$$

La pente moyenne est donnée par tous les outils de cartographie et d'itinéraires sur un trajet défini par le dénivelé positif.

Pour la sensibilité de la consommation par rapport à la puissance humaine, celle-ci correspond à une hyperbole fonction de la vitesse, avec une puissance humaine moyenne, en général comprise entre 75W à 150W en fonction de la condition physique du cycliste.

$$\frac{\partial C_{ons}}{\partial P_{humaine}} = \frac{-1}{Vit} \quad (11)$$

Par conséquent dans le cas du vélo couché, les variations des différents paramètres ont les conséquences suivantes sur la consommation :

- Une augmentation de la pente moyenne de 1%, accroît la consommation de 4,1W.h/km ;
- Une augmentation de la masse de 1%, accroît la consommation de 0,014W.h/km ;
- Une augmentation de la vitesse moyenne de 1% autour de 35km/h majorera la consommation de 0,6W.h/km ;
- Par contre, chaque augmentation de 1%, de la puissance humaine autour de 35km/h diminuera la consommation de 0,023W.h/km.

Sachant que le moteur électrique, la batterie, le carénage pour s'affranchir de la météo et améliorer l'aérodynamisme va rajouter de la masse. Donc une optimisation de la consommation doit être effectuée.

6 - Optimisation du véhicule

L'existence d'un marché économique pérenne nécessite l'optimisation du véhicule sur sa masse et son prix.

Intéressons-nous tout d'abord à l'étude de la masse.

La masse du châssis aluminium d'un véhicule 2 roues nécessaire pour supporter une personne de 80kg ainsi qu'une charge utile peut être estimée à l'aide de la relation suivante :

$$M_{chassis}(kg) \approx (M_{utile} \cdot 0,125 + 5) \approx 20 \quad (12)$$

Si le véhicule passe à 4 roues, la masse de châssis est doublée.

Le moteur nécessaire à l'entraînement à 45km/h d'une charge de 160kg dans une pente de 5% sans compter la masse du véhicule devra avoir la puissance suivante (13) :

$$P_m(W) = \frac{pente(\%)}{100} \cdot \frac{M \cdot g \cdot Vit(km/h)}{3.6} = \frac{5}{100} \cdot \frac{(160 + M_{vide}) \cdot 9,8 \cdot 45}{3.6} = 980 \quad (13)$$

On peut ensuite déduire la masse du moteur connaissant l'équation empirique suivante :

$$M_{moteur}(kg) = P_{moteur} \cdot 0,003 + 1,5 \quad (14)$$

A titre d'exemple, cette masse est de 6 kg pour un moteur de 1,5 kW.

Une autonomie de 100 km avec une consommation d'environ 17 à 20Wh/km nécessite une batterie de 2000W.h, c'est-à-dire, avec une densité d'énergie de la batterie de 200Wh/kg, une masse de 10kg en technologie LFP et 7kg en NCM.

Remarque : La capacité énergétique de la batterie est choisie de façon à avoir un taux de décharge inférieur à 1C. Cette limite est déterminée pour les pentes ou à l'accélération avec une tension choisie à 72V (vitesse d'environ à 45 km/h) pour ne pas impacter sa durée de vie. Par ailleurs, il est nécessaire de respecter la puissance maximale fournie par la batterie donnée par l'équation suivante :

$$P_{maxbatterie} = capacité_{batterie} \cdot taux_{decharge} = 2000W \cdot h \cdot 1C = 2000W \quad (15)$$

La masse de l'hybridation parallèle pour un pédalage est de 3 kg (pédalier, chaîne dérailleur) ce qui est négligeable par rapport à la motorisation électrique, la batterie et le contrôleur (16kg).

Le rapport entre la puissance musculaire et la puissance de la motorisation électrique permet de savoir si le pédalage est pertinent ou pas sur un véhicule. On peut considérer arbitrairement qu'en dessous de 20% la complexité du pédalage, son prix, sa masse rendent inutile son utilisation.

Pour une puissance humaine moyenne de 100 W et la valeur de 20%, on obtient une motorisation limite de 500 W, soit un total de 600 W. Si le véhicule nécessite une puissance supérieure à ces 600 W, on pourra considérer que le pédalage n'est pas pertinent.

Ces ordres de grandeurs des puissances humaine et électrique se traduisent en termes de masse utile du véhicule. Par exemple, pour un vélo non électrique en considérant que 50% de la puissance humaine permet de compenser les pertes aérodynamiques on peut en déduire une vitesse moyenne d'un vélo couché de l'équation 4 de la puissance utile du véhicule.

$$Vit_{imposée} = \left(\frac{P_{humaine} \cdot K_{pourcentage}}{k_{aero}} \right)^{1/3} = \left(\frac{100 \cdot 0,5}{0,0035} \right)^{1/3} = 25km/h \quad (16)$$

Cette vitesse moyenne correspond à la valeur de la législation sur les vélos électriques et permet de s'insérer dans le flux des voitures en secteur urbain.

Les coefficients et la vitesse imposée une fois fixés, permettent de déterminer la masse totale du véhicule et de sa charge utile pour une valeur de pente de 1% choisie arbitrairement (17) :

$$Masse_{vehicule+utile} = \frac{P_{humaine}(1 - K_{pourcentage}) \cdot 3,6}{g \cdot Vit_{imposé} \cdot (Cr + pente(\%))} = \frac{100 \cdot (1 - 0,5) \cdot 3,6}{9,8 \cdot 25 \cdot (0,004 + 0,01)} = 82kg \quad (17)$$

Pour un vélo couché, si le véhicule et son cycliste dépassent les 82 kg, il est nécessaire d'utiliser une motorisation électrique en complément du pédalage pour maintenir une vitesse de 25 km/h sur des pentes à 1%.

Pour les vélos cargos, les longs tails, les véhicules intermédiaires qui peuvent peser 140 kg à vide et transporter 100 kg, le pédalage peut devenir inutile à moins que la vitesse moyenne ne soit fortement réduite.

De plus, différentes options peuvent alourdir le véhicule.

- Le carénage d'un vélomobile en fibre demande environ 10 kg mais permet de diminuer le coefficient aérodynamique par 2.
- La bagagerie d'un vélo demande 4 kg pour un volume utilitaire de 85 litres.
- Les panneaux photovoltaïques demandent 5 kg avec support pour 150Wcrete (0,8m²) [7].

Par conséquent, la masse totale d'un véhicule faible consommation peut être déduite de l'addition suivante :

$$\begin{aligned} Masse_{Tàvide} &= M_{chassis} + M_{moteur} + M_{batterie} + M_{carrenage} + M_{photovolt} = 20 + 7 + 10 + 10 + 5 \\ &= 37 \text{ à } 52kg \end{aligned}$$

Cette masse reste faible par rapport à la masse transportable mais doit rentrer dans l'itération pour obtenir la consommation finale.

Analyse du prix :

Les choix des options sont souvent fonction du prix final du véhicule.

Les prix des éléments du véhicules peuvent être analysés de la manière suivante :

- Châssis : prix fixe,
- Moteur : prix fixe,
- Carénage : prix fixe,
- Panneaux photovoltaïques : prix fixe.
- Batterie : dépend de la consommation selon la relation suivante :

$$Pr i x_{batterie} \approx 0.8(\text{€/W.h}) \cdot Autonomie(km) \cdot consommation(Wh/km) \quad (18)$$

Dans notre cas, avec une autonomie désirée de 100 km :

$$Pr i x_{batterie} = 0,8(\text{€/W.h}) \cdot 100(km) \cdot 20(Wh/km) = 1600\text{€}$$

- Chargeur 2300W (2,5kg) pouvant être branché sur une prise classique pour recharger la batterie en 1 heure : 200€

Remarque : En France, les bornes publiques faibles puissances sont peu nombreuses avec un business modèle qui est basé sur le temps de charge et non sur l'énergie. Ce choix est non adapté au véhicule faible consommation et à la « micromobilité » (<25km/h). A ce jour, il est préférable d'avoir une double batterie swappable lors de grande distance. Toutefois, des prises pour la micromobilité pourraient augmenter le rayon d'utilisation du véhicule faible consommation ainsi pour celle de la milli-mobilité (45 km/h). De plus à ce jour, des batteries sodium-ion acceptent un taux de charge de 3C avec des temps de charges faibles.

Finalement, le prix brut total des véhicules faibles consommations produits artisanalement correspond à la somme suivante :

$$Pr i x_T = P_{chassis} + P_{moteur} + P_{batterie} + P_{carrenage} + P_{photovolt} \quad (19)$$

$$Pr i x_T \approx 2000 + 400 + 1600 + 4000 + 1000 \approx 4000 \text{ à } 9000\text{€}$$

- Le confort des véhicules (amortissement, siège) a un coût non négligeable environ 15% sur le véhicule. Ce prix brut artisanal est relativement important par rapport à des véhicules produits massivement et ne prend pas en compte la marge, le marketing...

Dans le prix, il faut aussi considérer la possibilité d'ajouter des accessoires (sacoche, vide poche, éclairage supplémentaire, bagagerie, ...) qui jouent un rôle important dans l'approbation de l'utilisation d'un véhicule.

7 - Cycle de vie du véhicule, maker faire, réparabilité

La batterie et le variateur ont une durée de vie de 8 à 9 ans. Le cycle de vie d'un vélo couché est estimé à 120 000km, distance au bout de laquelle il y aura trop de réparations à faire (tous les roulements et tous les accessoires seront à changer). Il est à noter que la maintenance demande un changement de plaquettes de frein tous les 5000 km, de pneus tous les 10 000 km, de chaîne tous les 10 000 km, de fourche avant et d'amortisseur tous les 25 000 km, de pédalier et pignon tous les 30 000 km.

Ces maintenances augmentent le coût final total du véhicule mais peut être facilement réalisée par les particuliers sans intervention d'un spécialiste.

Pour réduire les coûts de l'acquisition, il existe des prototypes à monter en kit avec un squelette de tube carré droit à visser en aluminium comme le v'hélio, XYZ [14], ev4. Enfin, il existe des stages pour apprendre à monter des kits électriques open sources soi-même [17] et ne pas dépendre d'installation de motorisation propriétaire qui ne répondent pas aux besoins des utilisateurs.

8 - Conclusion

Dans cet article nous avons étudié les paramètres qui sont à prendre en compte pour amorcer un réel marché des véhicules intermédiaires et particulièrement des vélos couchés avec carénage. Ces véhicules peuvent jouer un rôle important dans le changement de paradigme du marché des véhicules des particuliers.

En effet, la forte diminution de la consommation d'énergie et de matériaux sera vraisemblablement de plus en plus contraignante dans l'avenir. Le transport de personne seule dans des véhicules de 1,5 tonnes paraîtra de plus en plus insoutenable économiquement et écologiquement. Le choix de véhicules sobres et réellement adaptés aux usages sera de plus en plus nécessaire [15].

9 - Bibliographies

[1] Frédéric Héran, Arnaud Sivert « L'amélioration de l'efficacité Energétique des véhicules individuels » « L'intermodalité transports publics / vélo pliant », Revue transport urbain, à paraître 2022

<https://www.cairn.info/revue-transports-urbains-2022-1-page-9.htm>

<https://www.cairn.info/revue-transports-urbains-2022-1.htm>

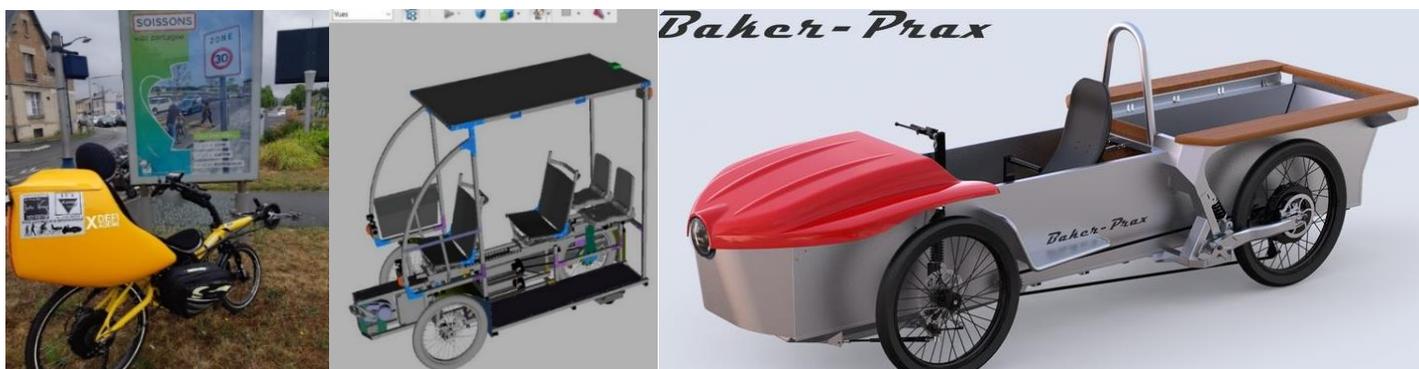
[2] https://fr.wikipedia.org/wiki/V%C3%A9hicule_intermodal

[3] Sivert Arnaud, Vacossin Bruno, Plassat Gabriel, Betin Franck, 2021, « Challenge Extrême défi : véhicule faible impact (ADEME) », *La Revue 3EI juin 2022*, n° 109

<https://www.fichier-pdf.fr/2022/09/12/challenge-extreme-defi--vehicule-faible-impact--iut-geii-soisson/>

[4] <https://xd.ademe.fr/participer>

- [5] A.Sivert, J.Claudon, F.Betin, B.Vacossin, J.Accart "Étude des pneus pour tricycles carénés à faible consommation " Revue Technologie janvier 2016
<http://www.fichier-pdf.fr/2016/09/30/etude-pneu-de-velo-faible-consommation/>
- [6] <https://envelomobile.wordpress.com/2012/06/11/gagnant-du-concours-velomobile-btwin/>
- [7] https://fr.wikipedia.org/wiki/Proc%C3%A9dure_d%27essai_mondiale_harmonis%C3%A9e_pour_les_v%C3%A9hicules_l%C3%A9gers
<https://unece.org/DAM/trans/doc/2012/wp29grpe/WLTP-DHC-12-07e.xls>
- [8] A.Sivert, B. Cauquil, E. Morel, F. Bailly « Véhicules à faible consommation énergétique (exemple du challenge SUNTRIP) » Revue 3EI N° 85, juillet 2016.<http://www.fichier-pdf.fr/2016/12/19/velo-electrique-solaire-suntrip-bilan-tech-2015/>
- [9] [https://wiki.lafabriquedesmobilites.fr/wiki/Equipe_HPULHV_\(Human_powered_Ultra_light_hybrid_vehicle\)](https://wiki.lafabriquedesmobilites.fr/wiki/Equipe_HPULHV_(Human_powered_Ultra_light_hybrid_vehicle))
<https://velorizontale.1fr1.net/t26508-engin-electric-de-l-iut-de-l-aisne-2021-2024-reflexions-sur-la-mobilite>
- [10] <https://wiki.lafabriquedesmobilites.fr/wiki/Baker-Prax>
- [11] A.Sivert, F.Betin, T. Lequeu, B. Vacossin « Optimisation de la masse en fonction de la vitesse, puissance, autonomie, prix, centre de gravité, frein, d'un Véhicule électrique à faible consommation (vélo, vélo-mobile, voiture électrique) Estimateur de consommation sur un parcours » Revue 3EI N° 80, Avril 2015, page 47 à 57
<https://www.fichier-pdf.fr/2015/05/05/optimisation-masse-vehicule-faible-estimateur-consommation/>
- [12] D.Herrera « Simulation d'un véhicule électrique et son environnement pour étudier la consommation d'énergie sous différentes conditions climatiques » <https://theses.hal.science/tel-03580302/document>
- [13]<https://abetterrouteplanner.com/>
- [14]<http://www.xyzcargo.com/cycles/>, <https://www.ev4.fr/>
- [15]https://wiki.lafabriquedesmobilites.fr/index.php?title=Questionnaire_socio techno econo_sur_l%27E2%80%99approbation_d%27E2%80%99un_v%C3%A9hicule_interm%C3%A9diaire_faible_consommation_d%27E2%80%99C3%A9nergie&action=formedit
- [16] Sivert.A, Vacossin.B, Betin.F, « Protection numérique pour moto-variateur de véhicule électrique », *La Revue 3EI juin 2020*,
<https://www.fichier-pdf.fr/2023/08/08/protection-numerique-vehicule-electrique--sivert/>
- [17] « reprend ta main sur ta mobilité.... » <https://easka.org/>



De gauche à droite :

- Cycle couché (35kg à vide, 45km/h, 10W.h/km) [9],
- <https://vhelio.org/> (25km/h),
- Véhicule baker prax [10] (140kg à vide, 45km/h, 25W.h/km)

Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>

En tant que membre de la SEE, ✓ vous bénéficiez de nombreux avantages



1 **Élargir son réseau professionnel par la participation à des structures de réflexion adaptées**

- **6 Clubs techniques**
 - Cybersécurité et Réseaux Intelligents (CRI)
 - Capteurs et Systèmes ElectroMagnétiques (CSEM)
 - Eco-conception en Génie Electrique (EGE)
 - Ingénierie des Systèmes d'Information et de Communication (ISIC)
 - Systèmes Electriques (SE)
 - Stockage et Moyens de Production (SMP)
- **6 Groupes régionaux**

2 **Participer et bénéficier de tarifs préférentiels pour les Conférences et Journées d'études SEE**

- Conférences nationales et internationales
- Journées d'études thématiques
- Conférences-débats
- Congrès internationaux, en partenariat ou non avec d'autres sociétés scientifiques

3 **Consulter et télécharger gratuitement les publications (REE et 3EI) en version numérique et s'abonner aux publications papier à tarif préférentiel**

- **La Revue de l'électricité et de l'électronique (REE)** est destinée aux ingénieurs, chercheurs, enseignants, décideurs techniques et économiques intéressés par les secteurs de l'électricité, de l'électronique, de l'information et de la communication. Paraissant cinq fois par an, la revue s'articule autour de dossiers techniques, flash-Infos, articles invités, entretiens avec des personnalités du monde de la recherche et de l'industrie.
- **La revue 3EI** est une publication trimestrielle destinée aux professeurs, universitaires et industriels concernés par l'enseignement de l'électricité et de l'électronique industrielle.

4 **S'engager dans une association qui reconnaît les talents et crée une émulation parmi ses membres**

- Grades senior et émérite SEE
- Remise de prix et trophées pour les professionnels confirmés, jeunes actifs et étudiants (Brillouin-Glavieux, général Ferrié, André Blanc Lapierre...)
- Remise de médailles (Ampère, Blondel...)

Pour rejoindre la SEE, deux modes d'adhésion :



Adhésion individuelle :
via le site www.see.asso.fr
ou le bulletin d'adhésion



Adhésion collective :
partenariat d'entreprise ou
d'école via des conventions

NOUS CONTACTER :

SEE - Service adhésions - 17 rue de l'amiral Hamelin - 75116 Paris - France
+33 (0)1 56 90 37 17 - adhesion@see.asso.fr - www.see.asso.fr

