

Quantifier la plus-value environnementale des convertisseurs de puissance à composants grand gap (SiC, GaN)

Suzanne Guillou^{1,2}, Charley Lanneluc¹, Laura Vauche¹, Benoit Sarrazin², Danièle Dargaud², Jean-Christophe Crebier²

¹ Univ. Grenoble Alpes, CEA, Leti, F-38000 Grenoble, FRANCE

² G2Elab, 21 rue des martyrs, CS 90624, 38031 Grenoble CEDEX 1, France

RESUME – L’objectif du travail présenté dans cet article est de comparer, d’un point de vue environnemental, les convertisseurs de puissance à base de composants grand gap (SiC, GaN) à ceux à base de composants Si. Les systèmes de conversion de puissance sont considérés et comparés dans leur ensemble, à unité fonctionnelle identique, pour un contexte applicatif donné et sur tout leur cycle de vie. Pour cela, il faut mettre en place une méthodologie de construction des données d’inventaire de cycle de vie fiables. L’Inventaire de Cycle de Vie est alimenté, entre autres, par le développement et la caractérisation d’un prototype permettant de mesurer les pertes, de qualifier les fonctionnements thermiques et la compatibilité électromagnétique (CEM) en vue de la comparaison et de valider la liste réelle des composants nécessaires au bon fonctionnement du système.

Mots-clés— Impacts environnementaux, Électronique de puissance, Semi-conducteur grand gap, Inventaire de Cycle de Vie, Comparaison de la plus value environnementale

1. INTRODUCTION

Les composants grand gap (WBG) utilisés pour la conversion de puissance sont basés sur les matériaux semi-conducteurs Nitrure de Gallium (GaN) et Carbure de Silicium (SiC). Ces matériaux permettent aux composants de fonctionner à des tensions, des densités de courant plus élevées que ceux à base de silicium. Les convertisseurs peuvent aussi fonctionner avec une fréquence de découpage plus élevée. Ils permettent également d’augmenter l’efficacité énergétique des convertisseurs, c’est à dire de réduire les pertes énergétiques à l’usage, donc de consommer moins d’énergie, la production de l’énergie électrique induisant des impacts environnementaux importants à l’usage en fonction du mix électrique [1, 2].

A ce jour, la littérature est constituée pour l’essentiel d’études exclusivement basées sur l’énergie et sur l’empreinte carbone des convertisseurs. Or, il est nécessaire de mener une analyse de cycle de vie (ACV) multicritère et de quantifier les impacts environnementaux des systèmes de conversion de puissance dans leur ensemble pour éviter tout risque de transfert d’impact d’une catégorie d’impact à une autre ou d’une phase du cycle de vie à une autre. De plus, il est essentiel d’utiliser des données d’inventaire précises et adéquates pour l’électronique de puissance. Il est également important de mener l’étude dans le contexte applicatif des convertisseurs et sur tout leur cycle de vie, pour identifier les transferts d’impacts potentiels liés à l’utilisation des WBG [2, 3, 4]. En particulier, la maturité technologique de ces composants, leur durée de vie, les stress qu’ils peuvent induire sur les autres composants, peuvent avoir

des conséquences importantes sur le bilan environnemental de la technologie. Ce constat amène la question suivante : Comment construire des données d’inventaire de cycle de vie fiables pour évaluer la plus-value environnementale des convertisseurs à base de composant grand gap, dans leur contexte applicatif et sur tout leur cycle de vie ?

2. METHODOLOGIE

La méthode proposée pour répondre à cette question comprend 3 étapes principales : le dimensionnement de convertisseurs de puissance dans un contexte applicatif donné, le prototypage pour alimenter l’Inventaire de Cycle de Vie (ICV) et l’Analyse de Cycle de Vie (ACV) à proprement parler. La figure 1 propose un schéma de synthèse de la méthodologie. L’apport du prototype est important pour la réalisation d’un inventaire sur cycle de vie le plus représentatif possible de la réalité et pour s’assurer que les comparaisons menées le sont à conditions de fonctionnement équivalentes, que cela soit au niveau des performances, de la thermique ou encore de la CEM. L’ACV est faite pour chaque sous-ensemble fonctionnel du prototype et les impacts environnementaux sont sommés théoriquement pour effectuer les comparaisons souhaitées, pour différents systèmes respectant la même unité fonctionnelle.

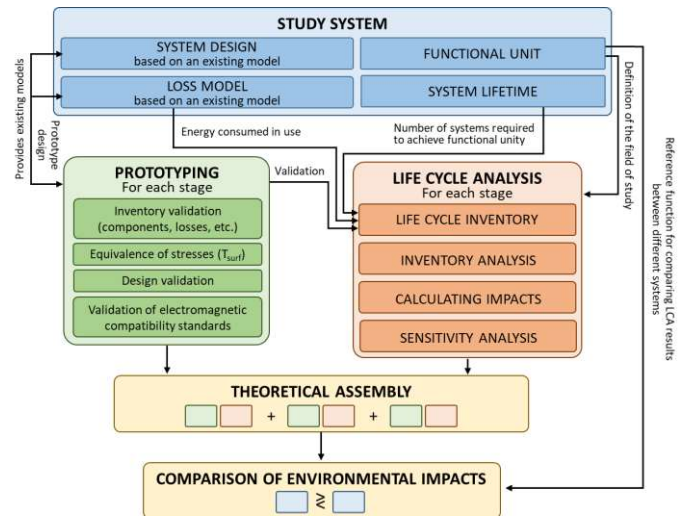


Figure 1 - Schéma de la méthode proposée pour évaluer et comparer les impacts environnementaux des convertisseurs de puissance

2.1. Choix du système d'étude

Le système d'étude choisi est un convertisseur AC/DC PFC totem-pole permettant l'adaptation d'une source alternative AC 230V monophasée vers une charge continue 380V DC. La figure 2 rappelle la topologie de ce convertisseur et présente les sous-ensembles fonctionnels tels que considérés dans ce travail (encadrés verts).

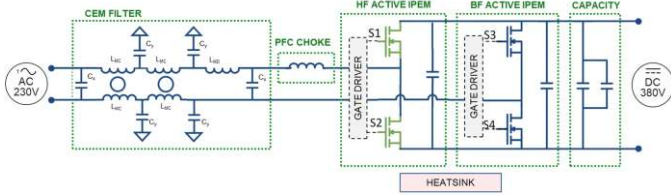


Figure 2 - Schéma électrique du prototype modulaire pour l'application choisie.

Cette topologie permet de comparer l'emploi de transistors HEMT GaN avec des MOSFET Si pour le domaine applicatif des convertisseurs DC/AC ou AC/DC pour lesquels la montée en fréquence de découpage est contrainte par la norme et certains éléments sont à dimensionner à la fréquence du réseau. C'est un cas d'étude représentatif d'un grand nombre d'applications en électronique de puissance. En revanche il ne permet pas de mener une comparaison satisfaisante au regard des applications de conversion DC/DC pour lesquelles il faudrait prendre en considération un autre type de convertisseur.

2.2. Pré-dimensionnement du système d'étude

Le pré-dimensionnement du convertisseur comprend le choix des paramètres électriques des composants et la fréquence de découpage. Pour l'application choisie où le transistor Si est en concurrence avec un transistor WBG, le dimensionnement est fait grâce à un modèle basé sur les données constructeurs pour les composants actifs et passifs, en suivant des critères d'efficacité, de niveau de température, de compacité et de compatibilité électromagnétique (CEM) les plus équivalents possible.

L'efficacité est évaluée à partir des modèles des composants (inductance, transistor, capacité du bus DC etc). Pour les critères de dimensionnement thermiques, la température de jonction nominale des composants actifs est fixée et la résistance thermique du dissipateur en est déduite. Les températures des composants passifs et du PCB doivent être compatibles avec les règles de dimensionnement et semblables d'un dimensionnement à l'autre pour assurer la comparaison. La température maximale de jonction des semi-conducteurs de puissance est généralement entre 130 et 175°C, selon la technologie. Pour le dimensionnement, le choix est fait de prendre une température de jonction fixée à 100°C pour trois raisons :

- Assurer une marge de sécurité par rapport à la température maximale acceptée au niveau de la jonction ;
- Réduire les plages de variations en température lors des cyclages thermiques et donc d'augmenter la durée de vie des systèmes. Des écarts de température importants favorisent la délamination des interfaces ;
- Limiter les pertes : limiter la montée en température permet de limiter l'augmentation du $R_{DS(on)}$ et donc des pertes.

La CEM est assurée par un pré-dimensionnement des filtres puis adaptation expérimentale de manière à respecter la norme conduite EN55022. Les méthodes de dimensionnement des filtres de mode commun (MC) et de mode différentiel (MD) sont dérivées de [5, 6]. Le filtre MC est constitué de deux étages : un premier étage dimensionné à partir du modèle et un deuxième

étage adapté expérimentalement car fortement dépendant de la conception réelle et de l'implantation des composants non pris en compte dans l'algorithme de conception. Sur la base des valeurs des dv/dt et des capacités parasites, le spectre harmonique du filtre MC est estimé, ce qui permet de déterminer la fréquence de coupure du premier étage du filtre. Les valeurs des capacités C_y et de l'inductance CM sont alors ajustées en veillant à limiter les valeurs des capacités C_y pour éviter le déclenchement des disjoncteurs différentiels. Le filtre MD n'a qu'un étage car l'inductance du PFC joue le rôle du deuxième étage. Le dimensionnement du filtre MD est basé sur le même principe que le filtre MC.

L'algorithme de dimensionnement global itère en fonction de la fréquence de découpage, des dimensions du noyau et du nombre de tours de l'inductance PFC. Pour un transistor donné, l'algorithme propose des valeurs pour les capacités C_x et C_y , les noyaux et le nombre de tours pour les inductances CM et DM, le noyau pour l'inductance PFC, la capacité de bus DC et les exigences pour le dissipateur thermique. L'algorithme calcule également les pertes dans les transistors et l'inductance PFC.

La tenue en tension des composants est imposée par l'application. Plusieurs dimensionnements sont faits pour chaque technologie en faisant varier le calibre en courant des composants actifs afin de trouver pour chaque technologie le meilleur compromis entre pertes par commutation et par conduction. Pour chaque technologie, le calibre en courant choisi est celui qui minimise les pertes au niveau système et permet le meilleur compromis entre efficacité énergétique et masse du système. Le choix optimal pour chaque technologie étant basé sur des estimations des pertes de manière théorique, la validation expérimentale sera conduite avec plusieurs calibres en courant pour chaque technologie de puissance pour valider le pré-dimensionnement et les choix faits.

Les Inventaires de Cycle de Vie (ICV) des convertisseurs à base de transistors WBG ou Si sont fait à partir de ces dimensionnements.

2.3. Inventaire de Cycle de Vie et prototypage

L'ACV est une méthode qui permet l'estimation multicritères des impacts environnementaux d'un produit sur l'ensemble de son cycle de vie, de l'extraction des matières premières à l'élimination. Le cycle de vie d'un produit implique des flux intrants (utilisés) et extrants (rejetés) qui peuvent être traduits en impacts environnementaux (IE). La collecte de la quantité et de la nature des intrants et extrants est appelée inventaire du cycle de vie (ICV). Les données collectées peuvent être primaires, c'est-à-dire directement mesurées sur le terrain, ou secondaires, c'est-à-dire des données génériques moyennes provenant de bases de données ACV.

2.3.1. Revue critique des bases de données

Trois bases de données ACV sont couramment utilisées pour l'électronique de puissance : Ecoinvent, CODDE et Sphera. Dans ces trois bases de données les systèmes sont modélisés suivant dans la même logique : l'utilisateur renseigne la quantité d'un produit qu'il utilise et cette quantité est répartie en différents flux intrants et extrants avec un ratio de répartition fixe. Par exemple pour une inductance, l'utilisateur renseigne la masse totale et l'inductance est modélisée avec des pourcentages de noyau et de cuivre fixés, quels que soient les paramètres électriques. De plus, les bases de données ne tiennent souvent pas compte de la diversité technologique d'un composant. Par exemple pour les inductances, les variations possibles sur la forme ou le matériau du noyau (ferrite, poudre, monocristallin)

ou la technologie de fil (fil plein, méplat, fil de Litz) ne sont pas considérées. Si ces imprécisions sont communes à toutes les bases de données, la transparence et donc l'utilisabilité des données diffèrent en fonction des bases. Egalement, ces limitations peuvent être un obstacle à une évaluation environnementale efficace en électronique de puissance.

La base de données Ecoinvent est la plus transparente : l'inventaire complet de chaque système ainsi que la contribution de chaque flux est accessible, avec la documentation associée.

Pour la base de données CODDE, l'inventaire matière est accessible pour un système, sans répartition entre les sous-produits. Par exemple, pour un convertisseur, la masse de cuivre est donnée mais pas le détail de la masse de cuivre contenu dans chaque composant. Cette agglomération rend difficile l'exploitation ou la critique de ces données d'inventaire. De plus, la modélisation des procédés de fabrication impliqués n'est pas accessible et les impacts environnementaux ne sont calculés qu'au niveau du système entier, il n'est pas possible de connaître la contribution de chaque matériau. Enfin, les données composants disponibles sont souvent trop génériques pour permettre une ACV précise et une utilisation dans un processus de conception. Pour les composants magnétiques par exemple, des données « Inductors » et « coils » sont proposées, sans précision sur la distinction entre les deux.

Enfin, la base de données Sphera fournit des données plus diversifiées mais basées sur des informations industrielles protégées et donc inaccessibles. Pour certains systèmes, des informations « Included datasets » sont disponibles. Il s'agit d'un inventaire matière partiel sans mention des quantités. Par exemple, pour les composants magnétiques, l'implication de cuivre dans la modélisation n'est quasiment jamais mentionnée. Si de telles données peuvent être utiles pour réaliser une ACV après la conception à des fins de certification ou de communication, elles ne sont adaptées ni pour un travail de recherche ni pour un travail d'éco-conception [7].

2.3.2. Approches choisies pour un inventaire fiable

Pour cette étude, la base de données Ecoinvent v.3.10 est utilisée. Pour l'inventaire à la fabrication, deux approches sont utilisées pour tenter de combler le manque de données et les imprécisions de modélisation associées : démonter et peser les différentes parties de chaque composant ou faire l'inventaire détaillé des composants à partir des données de fabrication. L'approche par démontage présente l'avantage de produire un inventaire matière précis mais ne permet pas de modéliser les procédés de fabrication. Cette approche est facilitée par le prototypage, les composants impliqués dans le convertisseur sont connus et disponibles, en particulier pour les filtres CEM pour lequel le dimensionnement ne suffit pas. L'approche par ICV de sous-système est la plus complète mais elle nécessite l'accès aux informations de fabrication. Cette approche est utilisée pour les semi-conducteurs de puissance, à partir des données de R&D des salles blanches du CEA-Leti [8].

Pour l'inventaire à l'usage, le prototypage a deux intérêts : collecter l'inventaire grâce à la mesure des pertes et vérifier l'équivalence des conditions de vieillissement. La mesure des températures de surface permet d'assurer que les stimuli thermiques sont comparables pour les composants actifs et passifs. Il en est de même pour la compatibilité électromagnétique.

En outre, l'estimation de la durée de vie des systèmes étudiés, c'est-à-dire le nombre de produits (ou composants dans un scénario de réparation) nécessaires pour répondre à la durée

d'usage telle que définie dans l'unité fonctionnelle, est un point clef de l'ACV. Pour estimer la durée de vie des transistors Si, le modèle proposé par Baudais pourra être utilisé [9]. Cependant, les transistors WBG ne sont pas assez matures pour être inclus dans ce modèle. Leur durée de vie est donc considérée comme paramètre variable de l'ACV. Ainsi, un objectif de durée de vie pourra être fixé pour garantir la plus-value environnementale des systèmes de conversion à base de WBG.

Pour faciliter la conception et la caractérisation expérimentale de chaque sous-ensemble, le prototype est modulaire. L'objectif de cette approche est de créer un outil d'ACV paramétré par bloc fonctionnel à partir de données expérimentales. Une fois l'inventaire affiné grâce au prototype, l'ACV peut être faite pour chaque bloc fonctionnel. Les impacts environnementaux des différents blocs peuvent alors être assemblés (sommés) théoriquement pour effectuer les comparaisons souhaitées, pour différents systèmes respectant la même unité fonctionnelle.

3. RESULTATS

L'unité fonctionnelle considérée pour cette étude est : Assurer l'alimentation électrique sans interruption d'un serveur de datacenter de 800W pendant 5 ans.

3.1. Dimensionnement du système d'étude

Dans cette partie, nous présentons les travaux d'inventaire mené sur quelques composants qui nous semblent importants et pour lesquels il a été décidé d'améliorer les données d'inventaire. Le tableau 1 présente les caractéristiques électriques et géométriques des différents noyaux étudiés pour l'inductance PFC. Le système est dimensionné pour 3 noyaux magnétiques avec un même composant actif HEMT GaN.

Tableau 1 – Caractéristiques géométriques et électriques des noyaux magnétiques étudiés pour l'inductance PFC

Ref	0076390A7	0076326A7	0076440A7
Technology	Magnetics Kool Hf Toroids		
A_L (nH/T ²)	53	24	59
Path length, L_e (mm)	95,1	89,8	107
Cross section A_c (mm ²)	153,7	67,8	199
Volume V_c (mm ³)	14617	6090	21300
External diam, OD (mm)	41,0	36,7	47,6
Internal diam, ID (mm)	21,3	21,5	23,3
Height, HT (mm)	17,9	11,4	18,9
Permeability μ	26	26	26

La figure 3 montre la répartition des masses du système et l'efficacité énergétique en fonction de la fréquence de commutation. Ce choix de représentation a été fait car l'aluminium et les composants magnétiques représentent la majeure partie du poids des convertisseurs de puissance et sont des éléments clés de l'impact environnemental des convertisseurs [4][10]. Le nombre de tours est choisi pour le meilleur compromis entre l'efficacité et la masse. Les trois noyaux magnétiques présentent des résultats avec une efficacité similaire (+/- 0,1%) mais des masses variant du simple au double. Le noyau magnétique 0076326A7 permet de minimiser la masse, c'est donc le noyau retenu.

La masse de cuivre de l'inductance PFC est la masse la plus importante du système et est constante. En effet, l'hypothèse a été faite que la fenêtre de bobinage soit remplie. Cette hypothèse conduit à une quantité de cuivre très importante dans le système. Or, le cuivre a un impact environnemental élevé [7], cette hypothèse, bien que couramment utilisée ne paraît pas favorable à l'écoconception. Elle pourra faire l'objet d'une remise en question dans les règles de conception produit.

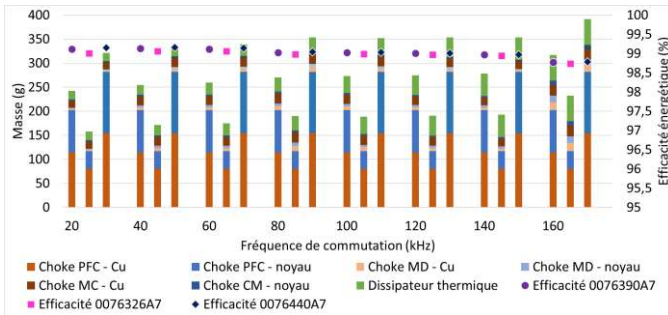


Figure 3 - Répartition des masses et efficacité énergétique du système en fonction de la fréquence pour 3 noyaux magnétiques pour l'inductance PFC différents

Le tableau 2 montre les paramètres électriques des différents HEMT GaN étudiés. Ces composants ont une tenue tension identique mais un calibre en courant différent.

Tableau 2 – Paramètres électriques des HEMTS GaN étudiés

Ref	GS-065-030-2-L	GS-065-018-2-L	GS-065-008-1-L
V_{DS}	650 V		
I_{DS}	30 A	18 A	8 A
$R_{DS(ON)}$	50 mΩ	78 mΩ	225 mΩ
Q_G	6.7 nC	4 nC	1.5 nC

La figure 4 montre la répartition des masses du systèmes et l'efficacité énergétique en fonction de la fréquence de commutation pour les 3 HEMT GaN, avec une inductance PFC identique. La somme des masses des composants a tendance à augmenter avec la fréquence, ce qui pourrait sembler surprenant, et l'efficacité à diminuer. Les composants GS-065-030-2-L et GS-065-018-2-L présentent des résultats similaires avec un écart de moins de 0,1% sur l'efficacité et de 11g sur la masse totale du système, quel que soit la fréquence de commutation. Le dimensionnement théorique ne permet pas de choisir entre ces deux composants, l'expérimentation devra donc être menée avec les deux.

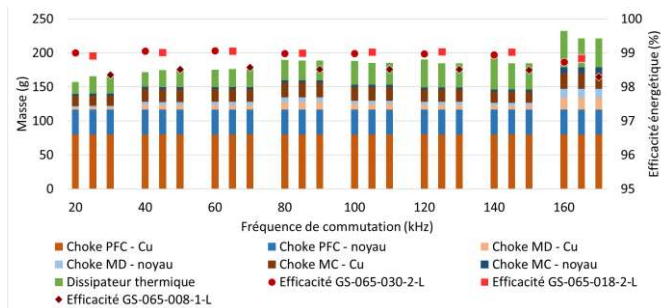


Figure 4 – Répartition des masses et efficacité énergétique du système en fonction de la fréquence pour 3 HEMT GaN de calibre en courant différents

D'autre part, le maximum d'efficacité et le minimum de masse est atteint entre 40 et 60 kHz. Un raffinement est effectué entre ces fréquences pour déterminer la fréquence de découpage optimale (Figure 5).

La figure 5 montre un rendement maximal et une masse minimale pour une fréquence de découpage de 48 kHz. Entre 48 et 50 kHz, une discontinuité est observée. À 50 kHz, la première harmonique entre dans la bande des émissions conduites, ce qui augmente significativement le besoin de filtrage pour maintenir les émissions conduites sous la norme. Par conséquent, la fréquence de coupure requise est modifiée et la masse de cuivre dans les inductances MC et MD augmente. Ainsi, pour un totem pole PFC de 800 W, les choix faits sont :

- l'inductance PFC est composée du noyau Magnetics Kool Mu Hf Toroids 0076390A7 et de 140 tours de fil de cuivre ;

- le HEMT GaN optimal à utiliser pour le composant à fréquence de découpage élevée est le GS-065-030-2-L ou le GS-065-018-2-L ;
- la fréquence de découpage de 48 kHz ;
- les valeurs des composants et les exigences en matière de dissipateur thermique sont données par l'outil (cf. tableau 3).

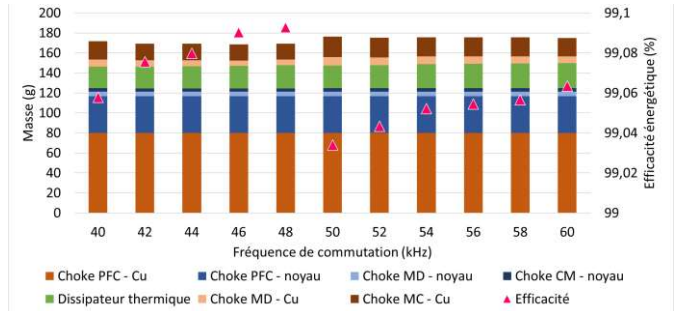


Figure 5 - Répartition des masses et efficacité énergétique du système en fonction de la fréquence

La même démarche n'a pas pu être utilisée pour dimensionner le PFC totem-pôle avec des MOSFET Si. En effet, l'outil de dimensionnement a été initialement développé pour des transistors WBG, transistors pour lesquels les énergies de commutation à l'ouverture et la fermeture sont données dans les datasheets. Ce n'est pas le cas pour les transistors Si, pour lesquels seuls des temps de commutation sur charge résistives sont donnés. Il est donc nécessaire de caractériser les pertes expérimentalement pour plusieurs MOSFET Si de $R_{DS(on)}$ différents pour pouvoir sélectionner lequel des transistor MOSFET offre le meilleur compromis.

Tout ce prédimensionnement théorique laisse entrevoir une forte incertitude compte tenu des faibles écarts sur les pertes mais aussi des modèles au premiers ordres qui peuvent conduire à de mauvaises conclusions. La réalisation d'un prototype est incontournable pour affiner toutes ces données et mener des tests sur les critères de dimensionnement clés (comme la fréquence de découpage).

3.2. Prototypage

La figure 6 présente la représentation schématique et des vues 3D du prototype modulaire. Le choix de la modularité a été fait pour faciliter la conception et la caractérisation expérimentale de chaque sous-ensemble.

Le prototype est constitué de :

- une carte filtre CEM ;
- une carte accueil avec l'inductance PFC et le filtrage DC
- un active IPEM HF, avec carte cde rapprochée et dissipateur ;
- un active IPEM BF, avec carte cde rapprochée et dissipateur ;
- un ventilateur ;
- une enveloppe en aluminium usinée.

La conception des active IPEM (Integrated Power Electronics Module) et de leur commande rapprochée s'inspirent du manuel technique de GaN Systems [11]. La hauteur du prototype est contrainte pour l'application rack de serveur, elle doit être égale à 1U, soit 44 mm. La profondeur et la largeur sont minimisées autant que possible pour réduire le volume total du prototype. Au final, la profondeur est de 412 mm et la hauteur est de 49 mm.

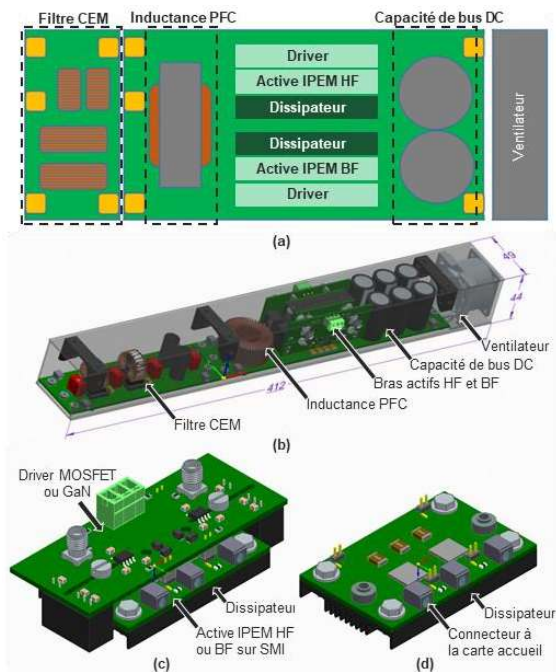


Figure 6 - Représentation schématique du prototype (a), vue de l'assemblage 3D sur SolidEdge (b), vue de l'ensemble d'un des deux Active IPEM sur SolidEdge (c), vue du BF Active IPEM sur SolidEdge (d)

3.3. Inventaire de cycle de vie

L'inventaire est effectué pour un PFC totem-pole tel que présenté fig. 2, avec S1 et S2 des HEMT GaN de référence GS-065-030-2-L et GS-065-018-2-L.

3.3.1. Inventaire à la fabrication

Deux types de composants ont été identifiés comme particulièrement impactant mais avec des données disponibles dans les bases disponibles peu précises : les composants magnétiques et les composants actifs.

Les composants magnétiques peuvent représenter une part importante du poids des convertisseurs de puissance et pourraient être des facteurs clés de l'impact environnemental des convertisseurs. D'après [4], les composants magnétiques représentent 18,2% de la masse totale d'un onduleur solaire et 17,4% de l'impact sur le réchauffement climatique, soit la contribution la plus importante. Pour les composants spécifiques et pré-dimensionnés, les masses respectives de chaque matériau sont déduites du pré-dimensionnement. Pour les composants magnétiques « disponibles sur étagère », l'approche par démontage a été choisie pour l'inventaire [7].

Les composants actifs peuvent représenter une faible proportion de la masse totale du convertisseur mais ont un impact environnemental élevé du fait des procédés de fabrication en salle blanche et de l'utilisation de matériaux rares et extrêmement purs [8]. La base de données Ecoinvent contient une donnée pour un transistor IGBT Si. Cette donnée est constituée majoritairement d'aluminium, de résine époxy et de polyéthylène et de cuivre, ce qui peut correspondre à un composant packagé de type module de puissance. Le silicium représente 7,8% des contributions en masse. Sur ces 7,8%, 92% sont du silicium de pureté électronique, autrement dit du silicium qui n'a pas subi le procédé de Czochralski, qui n'a pas été découpé en wafer et qui n'a subi aucune étape de fabrication en salle blanche, et 4% du silicium de pureté métallurgiquement, autrement dit du silicium qui n'a pas encore été purifié. Les consommations d'énergie et d'eau liées au procédé de

Czochralski, à la découpe de wafer, à l'infrastructure salle blanche ainsi que toutes les consommations et rejets de chimie, métaux, gaz et électricité, la centaine d'étapes nécessaires à la fabrication d'un transistor ne sont pas considérées dans l'inventaire de cette donnée. Utiliser cette donnée dans la modélisation ACV d'un convertisseur de puissance entraîne une sous-évaluation des impacts environnementaux dus aux transistors. Pour pallier à ce manque de données sur les composants actifs, l'approche par ICV des sous-systèmes a été choisie. Avec l'aide d'experts en conception de composants de puissance du CEA Leti, le travail de collecte de L. Vauche pour l'ACV du transistor latéral MOSc-HEMT GaN/Si [8] est en cours d'adaptation pour fournir une ACV quel que soit les calibres en courant et tension du transistor de puissance GaN utilisé, adapté selon la technologie et les paramètres électriques choisis. Pour ce faire, 8 briques ont été définies, contenant chacune plusieurs étapes de fabrication :

- L'épitaixie : brique spécifique à chaque technologie ;
- L'activation, la grille, les contacts, l'interconnexion, la passivation finale, l'amincissement et la métallisation en face arrière : briques génériques, car la majorité des étapes sont des étapes standard de fabrication microélectronique (photolithographie, dépôt diélectrique ou métal, gravure de diélectrique ou métal, retrait de résine par chimie humide ou par plasma, nettoyage par chimie humide, traitement thermique, planarisation).

Au sein de ces différentes briques génériques, après analyse de sensibilité, il a été décidé d'étudier de manière spécifique pour chaque technologie les étapes ayant le plus d'impact sur les impacts environnementaux :

- les étapes de gravure utilisant des gaz fluorés, qui ont un impact significatif sur le changement climatique ;
- les étapes de dépôt de matériaux à fort impact environnemental, tel que l'or.

La somme de l'ensemble de ces briques donne l'inventaire pour un wafer. Cet inventaire est ensuite adapté à la taille de la puce, dépendante des paramètres électriques du transistor.

L'inventaire à la fabrication des autres composants du système repose sur le travail d'inventaire paramétrique pour un onduleur de chaîne de traction à base de composants IGBT mené par A. Nordelöf [12, 13]. Le tableau 3 présente l'ensemble des composants du convertisseur étudié et les sources des données d'inventaire utilisées pour les modéliser. La notion de représentativité technologique de la donnée est inspirée du Data Quality Rating de la méthode PEF. Le qualificatif « élevée » signifie que la technologie utilisée dans l'étude est exactement la même que celle modélisée dans la base de données. Le qualificatif « moyenne » signifie que la technologie utilisée dans l'étude est semblable à celle modélisée dans la base de données. Le qualificatif « faible » signifie que la technologie utilisée dans l'étude est différente de celle modélisée dans la base de données.

Tableau 3 – Inventaire à la fabrication, sources et nom des données, informations connues grâce au prototype et représentativité technologique des données

Données d'inventaire à la fabrication	Sources des données	Nom de la donnée	Informations prototype	Représ. techno de la donnée
Enveloppe	A. Nordelöf et al (2019)	Aluminium casing production	Masse	Elevée
Driver GaN	A. Nordelöf et al (2019)	Driver board	Référence	Moyenne
Driver MOSFET Si	A. Nordelöf et al (2019)	Driver board	Référence	Moyenne
Ventilateur	Ecoinvent	Fan, for power supply unit,	Référence et masse	Moyenne

			desktop computer		
Assemblage		A. Nordelöf et al (2019)	Assembly and building services	Masse et surface	Moyenne
Dissipateur thermique		A. Nordelöf et al (2019)	Aluminium casing production	Volume	Elevée
PCB nu et assemblage		A. Nordelöf et al (2019)	Printed circuit board assembly	Surface	Moyenne
SMI		A. Nordelöf et al (2019)	Printed circuit board assembly	Surface	Faible
Filtre CEM	Capacités films C_x	Ecoinvent	Capacitor, film type, for through-hole mounting	Référence composant	Moyenne
	Inductances CM	Ecoinvent	Transformer, low voltage use	Référence noyau, volume de cuivre	Faible
	Inductances DM	Ecoinvent	Transformer, low voltage use	Référence noyau, volume de cuivre	Faible
	Capacités films C_y	Ecoinvent	Capacitor, film type, for through-hole mounting	Référence composant	Moyenne
Inductance PFC		Ecoinvent	Inductor, ring core choke type	Référence noyau, volume de cuivre	Faible
Active IPEM HF	Capacités céramiques	A. Nordelöf et al (2019)	Capacitor, for surface-mounting	Référence composant	Faible
	HEMT GaN	L. Vauche et al (2024)	GaN/Si MOSc-HEMT 650 V, 30 A	Référence composant	Elevée
Active IPEM BF	Capacités céramiques	A. Nordelöf et al (2019)	Capacitor, for surface-mounting	Référence composant	Moyenne
	MOSFET Si	Ecoinvent	Transistor, surface-mounted	Référence composant	Faible
Capacité de bus DC	Capacités électrolytiques	A. Nordelöf et al (2019)	DC-link capacitor	Nombre et référence	Elevée

Les connecteurs reliant les différents modules du convertisseur sont identiques pour le cas du GaN et du Si, ils ne sont pas considérés dans l'ICV. Cela permet en outre de se rapprocher d'un ICV « produit final » qui ne serait peut-être pas conçu à partir de sous-ensembles et donc sans connecteur.

Concernant la modélisation de la fin de vie du convertisseur et de ses sous-ensemble, le travail est en cours et n'est pas présenté dans cet article.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans ce travail, nous proposons une méthode pour mener une Analyse de Cycle de Vie multicritères comparant les systèmes de conversion de puissance dans leur ensemble, dans leur contexte applicatif et sur tout leur cycle de vie.

Trancher sur la plus-value environnementale des WBG nécessite un inventaire de cycle de vie suffisamment fiable et précis pour que les résultats d'ACV soient exploitables. C'est actuellement un défi car les modèles de dimensionnement des convertisseurs manquent encore de précision tout comme les données d'inventaire associées. Des approches complémentaires aux travaux [12, 13, 14, 15] sont proposés pour permettre de combler le manque de données spécifiques à l'électronique de puissance. Ces approches s'illustrent par un cas d'étude sur une topologie donnée mais ont vocation à être généralisées pour outiller le concepteur en électronique de puissance et lui permettre d'effectuer facilement la comparaison entre les transistors Si et WBG pour diverses topologies. En effet, ces approches sont trop chronophages pour être déployées à chaque conception, l'objectif est donc de modéliser des sous-systèmes paramétrés en fonction des données électriques et réutilisables pour différentes topologies. Ainsi, l'éco-concepteur peut réaliser des ACV précises à la bonne échelle.

Cette méthode permettra une comparaison mais ne prétend pas conclure quant à la soutenabilité absolue de ces technologies.

Pour cela, il faudrait prendre en compte le déploiement des technologies et les effets rebonds potentiels. En effet, l'électrification massive, nécessaire pour la décarbonation de l'énergie, induit la multiplication des convertisseurs, ce qui contribue à l'augmentation de la consommation d'électricité, à la raréfaction des ressources et à l'accumulation des déchets d'équipements électriques et électroniques [8, 9].

5. REFERENCES

- [1] M. Makoschitz et al. "Wide Band Gap Technology: Efficiency Potential and Application Readiness Map", Power Electronic Conversion Technology Annex (PECTA), 2020.
- [2] L.B. Spejo et al. "Estimation of Energy-Saving Potential Using Commercial SiC Power Converters", Energies 2024, 17, 4570. <https://doi.org/10.3390/en17184570>
- [3] L.B. Spejo et al. "Life-cycle energy demand comparison of medium voltage Silicon IGBT and Silicon Carbide MOSFET power semiconductor modules in railway traction applications", Power Electronic Devices and Components, Volume 6, 2023, 100050, ISSN 2772-3704, <https://doi.org/10.1016/j.pedc.2023.100050>.
- [4] F. Musil et al. "How Life Cycle Analyses are Influencing Power Electronics Converter Design", PCIM Europe 2023; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, Germany, 2023, pp. 1-9, doi: 10.30420/566091368.
- [5] A.Voldoire et al. "Experimental Validation of the Performances of an Inverter Sized with Optimization Methods", IEEE EPE 2020, September 7-10, 2020, Lyon, France (<https://hal.science/hal-03052128>)
- [6] J.-C. Créber et al. "PFC Full Bridge Rectifiers EMI Modelling and Analysis Common Mode Disturbance Reduction", IEEE-Transactions on Power Electronics, Vol.19 N°2, pages 378-387, Mars 2004
- [7] S. Guillou et al. "Recommendations for Life Cycle Inventory of magnetic components in Power Electronic", ECCE Europe 2025 Conference, Septembre 1-4 2025, Birmingham, UK.
- [8] L. Vauche et al. "Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment (LCA) of GaN Power Semiconductor Device", 2024, Sustainability (Switzerland), 16 (2), art. no. 901, doi: 10.3390/su16020901.
- [9] B. Baudais "Écoconception en électronique de puissance. Impacts du dimensionnement, de la modularité et de la diagnosticabilité", thèse de doctorat, 2024.
- [10] SMA. "Sunny Central 4600 UP, Life Cycle Assessment". Available online: <https://www.sma.de/en/sustainability/all-important-documents>
- [11] GaN Systems, "GSP65RxxHB-EVB 650V High Power IMS Evaluation Platform", Technical Manual, 2021.
- [12] Nordelöf, Anders & Alatalo, Mikael & Ljunggren, Maria. (2019). A scalable life cycle inventory of an automotive power electronic inverter unit—part I: design and composition. The International Journal of Life Cycle Assessment. 24. 78-92. 10.1007/s11367-018-1503-3.
- [13] Nordelöf, Anders. (2019). A scalable life cycle inventory of an automotive power electronic inverter unit—part II: manufacturing processes. The International Journal of Life Cycle Assessment. 24. 694–711. 10.1007/s11367-018-1491-3.
- [14] Mitsubishi Electric R&D Centre Europe, "PELCA, Power Electronics Life Cycle Assessment" <https://github.com/merce-fra/PELCA/tree/main>
- [15] Li Fang et al. "Parametric LCA model for power electronic ecodesign process: Addressing MOSFET-Si and HEMT-GaN technological issues" IET Power Electronics, Volume 18, Issue 1, January 2025, <https://doi.org/10.1049/pel2.12844>