

Opportunités de la modularité pour l'écoconception de convertisseurs de puissance

Boubakr RAHMANI^{1,2}, Maud RIO², Yves LEMBEYE¹, André ANDRETA¹, Jean-Christophe CREBIER¹

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2Elab 38000 Grenoble, France

²Univ. Grenoble Alpes, Grenoble INP, GSCOP 38000 Grenoble, France

RESUME – L'écoconception de convertisseurs statiques devient nécessaire pour appréhender non seulement la notion de performance mais aussi les coûts énergétiques de fabrication, d'usage et de fin de vie. Les convertisseurs de puissance multicellulaires apportent une opportunité vis-à-vis de l'optimisation de leur usage tout au long de leur cycle de vie. C'est l'objet de l'analyse présentée dans cet article. L'article présente, en premier lieu, une méthode de dimensionnement des convertisseurs fondée sur des critères de coûts énergétiques pendant le cycle de vie incluant des marqueurs de défaillance à l'usage. Une comparaison de plusieurs scénarios de fin de vie est proposée dans un cadre applicatif, technologique et géographique restreint, pour maîtriser la variabilité et la sensibilité des données utilisées.

Mots-clés— Réseaux de convertisseurs (PCA), Analyse du cycle de vie (ACV), Economie circulaire, écoconception, Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC), Mean Time Between Failure (MTBF).

1. INTRODUCTION

L'ÉCOCONCEPTION s'impose de plus en plus dans les méthodologies d'optimisation et de dimensionnement des convertisseurs statiques car il est maintenant clair qu'il est nécessaire de prendre en considération les impacts écologiques liés à leurs fabrications, usages et fins de vie [1].

Dans plusieurs domaines comme la téléphonie, l'automobile ainsi que l'aviation [2], les contraintes écologiques deviennent non seulement un paramètre important dans les rapports annuels des constructeurs mais aussi une obligation grâce à plusieurs plans gouvernementaux et européens [3] qui prônent une économie circulaire vertueuse.

Les ONG s'accordent toutes pour dire que le recyclage d'un produit est une action vertueuse et encouragée mais qu'elle doit être retardée au maximum durant la vie normale de ce produit [4]. Dans ce cadre, nous pensons que la modularité favorise et pourrait simplifier l'implémentation de nouveaux scénarios de fin de vie des convertisseurs d'électronique de puissance, autres ou complémentaires du recyclage : la réparation, la réutilisation voire la seconde vie.

Les convertisseurs statiques conçus et fabriqués par l'assemblage de Cellules Standards de Conversion (CSC) sous plusieurs configurations afin de répondre à divers cahiers des charges [5] ouvrent des perspectives en ce sens. Les

convertisseurs formés sont alors nommés selon l'acronyme anglais « Power Converter Array » (PCA) [6][7]. Dans ces convertisseurs statiques, les CSC peuvent être retirées si défectueuses pour être remplacées et être soit réparées puis réutilisées, soit décomposées pour récupérer les composants de valeur.

Comme illustré dans la figure 1, les flèches rouges forment le cycle de vie traditionnel d'un convertisseur statique classique. Avec des structures de conversion multicellulaires, de nouvelles flèches, représentées en vert, peuvent être introduites grâce à la modularité et la standardisation des modules (en fonction de la capacité à réparer et réutiliser une sous-partie du système ou la décomposer totalement facilement).

Dans notre étude, le carré orange, qui est la CSC, représente la pièce centrale favorisant cette circularité.

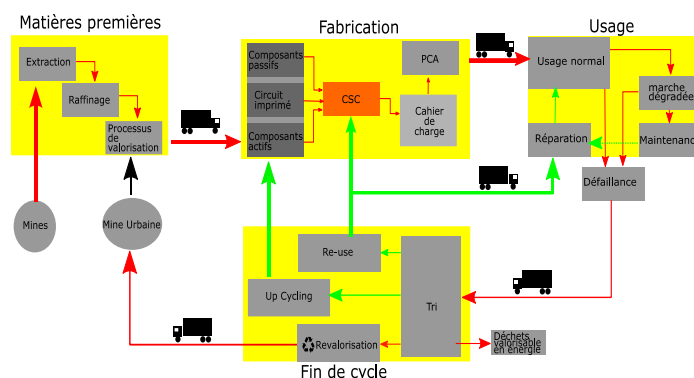


Fig. 1. Cycle de vie d'un convertisseur classique en rouge, cycle de vie d'un convertisseur multicellulaire représenté par les flèches rouges et vertes

Ces flèches vertes représentent non seulement des opportunités intéressantes envers la circularité comme par exemple l'utilisation des mêmes composants dans le PCA ce qui permet une éventuelle automatisation du désassemblage et de la réparation. Mais cela pose aussi de nouvelles problématiques de conception telles que la fiabilisation du réseau de convertisseurs ou l'invention de méthodes de conception maintenable.

Cet article introduit une première analyse des opportunités de la modularité en électronique de puissance dans quelques applications. Est entre autres introduit une méthodologie

générale d'écoconception dans le but de l'intégrer systématiquement dans la conception de convertisseurs.

2. APPROCHE DE LA MODULARITE EN ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

2.1. Le cadre de l'économie circulaire dans la modularité

La standardisation est l'une des solutions innovantes proposées par plusieurs gouvernements et organisations non gouvernementales [8][9] car elle rentre dans le cadre de l'économie circulaire redéfinie lors de la COP21 [10].

La stratégie principale de l'économie circulaire est d'optimiser « l'efficacité » des ressources en favorisant la réutilisation en boucles des produits, puis des composants et enfin des matériaux en les maintenant à leur niveau maximum de fonctionnalité (principe d'inertie) [11].

Cela passe par plusieurs actions rendues possibles par la modularité :

- Allongement de la durée de vie du système.
- Surcyclage (Upcycling) [12].
- Réemploi ou réaffectation.
- Réutilisation des composants du produit.

2.2. Approche classique et approche modulaire

La conception classique d'un convertisseur commence par le choix de la topologie, de sa loi de commande et le dimensionnement des composants passifs dont les composants magnétiques et les composants actifs selon un cahier des charges précis. La diversité des topologies de convertisseurs et l'hétérogénéité des composants rendent la traçabilité des métaux rares difficile et limite les scénarios de fin de vie au-delà du recyclage. En France le taux de collecte des DEEE (déchets électroniques et équipements électriques) est de 43% et avec la configuration actuelle des circuits imprimés, seulement 35% des métaux rares sont extraits en moyenne en 2014 [13]. La figure 2 montre cette hétérogénéité des composants et des matériaux et leurs taux de recyclabilité.

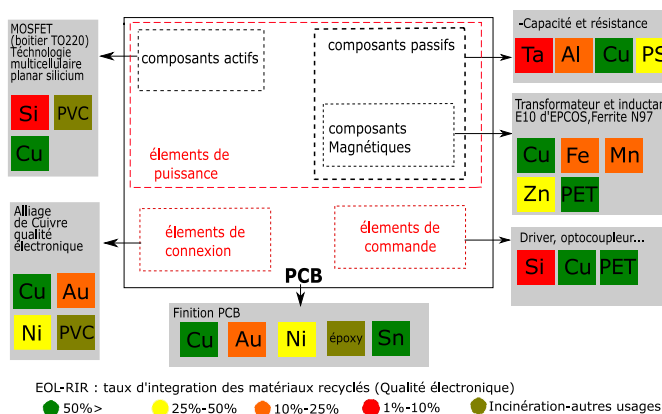


Fig. 2. Principaux éléments et matériaux d'un convertisseur classique et exemple de technologies de composants utilisés dans chaque sous ensemble

L'approche de conception type PCA permet de concevoir et produire divers convertisseurs par assemblages en grand nombre de CSC toutes identiques. La même CSC utilisée permet, par associations, de répondre à une pluralité de cahiers des charges. Cette approche limite fortement la diversité des composants utilisés et des technologies d'assemblage et d'interconnexion entre les composants et sous-ensembles. Elle est organisée sous la forme d'une plateforme technologique qui apporte un cadre et un formalisme pour la conception et la production [14]. Elle encadre totalement les techniques d'assemblage et la liste exhaustive des composants et des matériaux mis en œuvre. Il

devient dès lors possible et intéressant de tirer le meilleur parti de cette standardisation vis-à-vis du cycle de vie et de la circularité.

Les gains de cette approche modulaire résident non seulement dans la traçabilité des matériaux utilisés mais aussi dans la facilité à imaginer un flux circulaire des matériaux, composants et sous-systèmes constitutifs, comme cela est illustré figure 2. Cela permet également, d'augmenter la capacité de contrôler et de maîtriser, en conception et lors de l'usage, l'impact sur l'environnement généré pendant le cycle de vie (plusieurs dizaines d'années) de chaque convertisseur conçu, fabriqué et mis en œuvre par l'approche modulaire.

Une plateforme technologique contient un ensemble de cellules standards, que l'on peut associer sous contraintes, pour former un PCA. Parmi les cellules, la plus importante est la cellule standard de conversion (CSC). Toutes identiques, leur mise en œuvre systématise ainsi les matériaux et les composants mais aussi les techniques d'assemblage, ce qui peut simplifier fortement la maintenance et aussi la circularité en autorisant par exemple, la seconde vie pour certains composants et sous-systèmes.

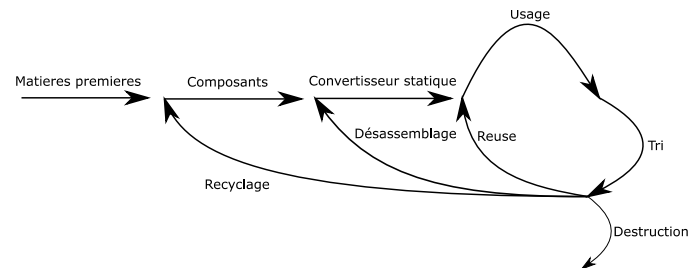


Fig. 3. Cycle de vie simplifié d'un convertisseur multicellulaire

Pour profiter de la granularité du PCA, il faut donc appréhender des techniques qui le rendent démontable « facilement » et efficacement. Comme cette contrainte peut amener un coût supplémentaire et avoir un impact sur les performances et les caractéristiques des PCA par rapport à l'état de l'art, il est important de bien comparer la valeur ajoutée apportée par la modularité et ses contraintes associées par rapport à l'état de l'art.

Avec cette méthode un modèle de prévision de fin de vie ou d'usage optimisé sur plusieurs cycles peut être conçu, en vue de récupérer les matériaux et/ou les composants d'une CSC, ou de la CSC complète, si son état le permet.

Ces valeurs et contraintes ajoutées doivent être quantifiées ou du moins estimées pour relever les tendances en comparant, dans un périmètre d'étude restreint, plusieurs scénarios de fin de vie d'un convertisseur sous la forme d'un PCA, utilisant, dans la mesure du possible, la même technologie ou des technologies assez comparables, pour la même application.

2.3. Les outils ACV et AMDEC

2.3.1. L'outil Analyse du cycle de vie (ACV)

L'analyse de cycle de vie est un outil pour quantifier l'impact environnemental des produits, introduit en 1997 et cadré par la norme ISO 14040 [15]. L'idée est de lier chaque action ou processus intervenant dans le cycle de vie du convertisseur à un impact sur l'écosphère. Ce cycle de vie peut être divisé en :

- Extraction des matières premières
- Production des matériaux constitutifs
- Production des composants et sous-systèmes

- Assemblage
- Utilisation
- Séparation des constituants, réutilisation, recyclage
- Divers transports

Une partie restante, à minimiser, correspond aux déchets non recyclables. Ils seront brûlés et/ou enfouie.

L'analyse du cycle de vie propose une approche complète qui reprend les impacts environnementaux du cycle de vie entier contrairement à une approche fragmentaire qui ne prend en considération qu'une partie du cycle de vie pour dimensionner le convertisseur. Cela est illustré dans la figure 4, avec les grandes différences de coût de consommation qui peuvent apparaître quand on considère seulement une partie du cycle de vie.

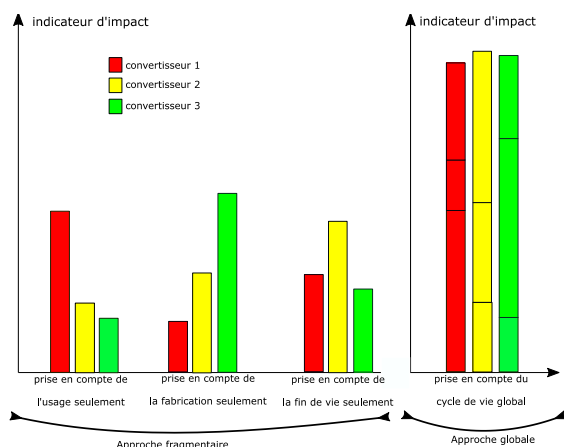


Fig. 4. Exemple de coûts énergétiques de chacune des phases du cycle de vie.

Une ACV complète est souvent difficile à mettre en œuvre car elle nécessite une connaissance fine et exhaustive du système étudié, des composants et des technologies de mise en œuvre. La figure 5 illustre bien la diversité des flux intrants et sortants (ressources élémentaires liées aux flux primaires de ressources, de matériaux, d'eau ; flux intermédiaires pouvant être des coproduits ; les flux énergétiques ; les coûts économiques, sociaux, etc. associés, voir figure 5) pouvant faire partie d'un processus de transformation.

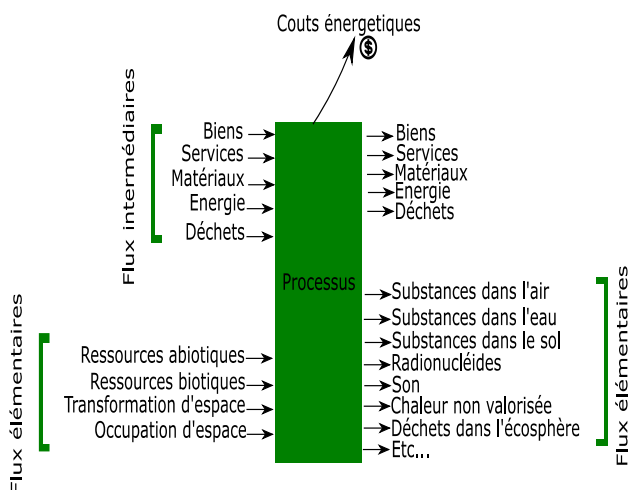


Fig. 5. Schéma explicatif des différents types de flux intrants et sortants

Les méthodes de calcul d'impact environnemental se fondent principalement sur les flux élémentaires (voir figure 5) et se divisent en 3 grandes familles d'impacts environnementaux :

- La santé humaine (toutes les perturbations créant un dommage sur la santé humaine)

- Les écosystèmes, l'environnement naturel (les perturbations sur la faune et la flore)
- Ressources naturelles (utilisation d'espace, coût énergétique et consommation de ressources minérales et biologiques). Enfin, l'ACV demande de porter une analyse critique des résultats établis. Une évaluation statistique de l'erreur et des analyses de sensibilités sont essentielles pour conclure sur la crédibilité des résultats et interpréter les scores obtenus par rapport aux objectifs et au périmètre de l'étude.

L'étude d'ACV à ce stade de nos recherches est simplifiée car les systèmes modulaires étudiés sont en cours d'élaboration (non mature). L'objectif est de faire varier différents scénarios de cycle de vie afin d'appréhender les différents coûts énergétiques mis en œuvre durant le cycle de vie.

2.3.2. L'outil AMDEC

L'outil AMDEC (Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité) a été développé pour déterminer théoriquement la fréquence et la gravité des défaillances.

C'est un outil très général qui peut être utilisé de plusieurs manières différentes (les chaînes de Markov, les arbres de défaillances, la matrice de notation de la criticité...). Comme il n'est pas possible de faire des tests accélérés pour les différents convertisseurs et type de conversion (topologie, cas d'usage, technologie, événements singuliers), nous pouvons donc envisager une évaluation avec les modèles de fiabilité par composant de « The Military Handbook 217F Notice 2 (MIL-HDBK-217F) ». [16]

Ce manuel permet de quantifier la durée de vie avant défaillance du produit mais aussi de ses composants, permettant ainsi d'approximer l'état de la CSC après une durée d'usage donnée. Les défaillances impactent directement en volume et en durée, chacune des phases de l'ACV.

3. COMPARAISON DES SCENARIOS DE CYCLE DE VIE D'UN CONVERTISSEUR DC /DC.

3.1. Méthode de comparaison

Dans cette partie nous nous intéressons seulement à la consommation énergétique comme un indicateur d'impact environnemental.

La méthode utilisée pour comparer l'impact environnemental d'un convertisseur utilise les outils ACV et AMDEC comme ceci :

Étape 1 : Quantifier le coût énergétique annuel des phases principales du cycle de vie grâce aux bases de données ACV [17] ou des ACV déjà réalisées [18] (Extraction des matières premières, production des matériaux constitutifs, productions des composants et sous-systèmes, assemblages, utilisations, séparations des constituants, réutilisation, recyclage)

Étape 2 : Définir les probabilités de défaillance ainsi que leurs criticités avec les outils AMDEC.

Étape 3 : Lancer un calcul sur une durée d'usage donnée de la part d'énergie en lien avec les performances types rendement en prenant en compte la probabilité d'occurrence de chaque scénario de fin de vie

3.1.1. Première étape

Le cycle de vie d'un convertisseur de puissance classique se divise en 3 étapes principales : la fabrication, les usages, et la fin de vie/cycle. Chaque étape est constituée de sous-étapes. Le but

est de quantifier l'énergie moyenne consommée dans chaque étape de ce cycle.

$$E_{acv} = \sum M_m E_{p,m} + \int_{utilisation} P_{fct} dt \quad (1)$$

L'équation 1 est constituée de 2 termes, le terme de gauche est lié au cout énergétique de la manufacture, du transport et de la fin d'usage, alors que le terme à droite est la perte énergétique liée à une certaine mission donnée donc le cout énergétique de l'usage.

Les $E_{p,m}$ sont les couts énergétiques de chaque processus de transformation ou de création d'un kg de matière donnée, ce dernier est obtenu à partir des données d'inventaires d'ACV, des bases de données de type Ecoinvent, ELCD – électroniques et électriques, associées aux logiciels d'ACV, de rapports de l'ADEME ou ceux de l'union européenne dans le rapport annuel d'EUROSTAT. P_{fct} sont les pertes du convertisseurs durant son usage.

Tableau 1. Source de données pour la quantification de l'énergie pour chaque phase du cycle de vie.

Ressources minières	Eurostat, Ecoinvent, [19], [20]
Transports	Eco Transit, datasheet MURATA,[21],[22]
Manufacture	EIME, Ecoinvent.
Usage-Maintenance	MIL-HDBK, EIME, [23], Base donnée MURATA
Recyclage-Réutilisation	Ecoinvent, Base impact ADEME, [24],[25]

Cout énergétique de l'usage :

Il est difficile de trouver un lien direct entre volumes et performances pour les convertisseurs statiques.

Dans le cas des technologies PCB, le refroidissement des cartes est directement lié aux dimensions de celles-ci et aux conditions de circulation de l'air sur les cartes.

Pour des cartes PCB en convection naturelle, des relations simples mettent en évidence cette relation de proportionnalité.

On faisant l'hypothèse que les convertisseurs sont dimensionnés et optimisés au niveau densités de puissance, pour une carte PCB, les pertes admissibles sont fortement liées aux surfaces de PCB. On peut dès lors relier les pertes aux surfaces des cartes et par extrapolation aux volumes. C'est ce que nous avons tenté de faire ici.

Nous avons choisi d'approximer les pertes énergétiques durant l'usage par un modèle statistique prenant en compte une base de données de convertisseurs DC /DC isolés ayant les mêmes types de technologie et d'application.

Murata Co propose des convertisseurs en briques standardisées, toutes en technologie PCB. Leur base de données de 450 convertisseurs nous a permis de trouver un lien entre le volume du convertisseur et ses pertes. Ce lien n'est pas généralisable et ne peut servir de loi, cependant il démontre une tendance notable.

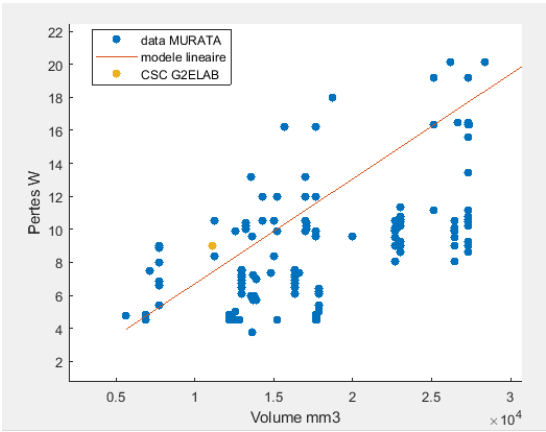


Fig. 6. Modèle linéaire des pertes selon le volume du convertisseur

$$Pertes = 0.74 + 4. \cdot 10^{-4} V - 4.83. \cdot 10^{-9} V^2 + 0.03. P \quad (2)$$

Dans l'équation 2, V est le volume du convertisseur et P sa puissance en sortie. Le modele lineaire 2 n'est pas unique mais arrive à expliquer 80% du nuage de points car son facteur R² (explication de 95% des données) est égal à 81%

Les modeles statistiques quadratiques sont communs dans les dimensionnements de transformateurs, souvent utilisé pour integrer l'équation obtenue dans des études plus générales [26]

Cout énergétique de fabrication et de fin de vie :

On divise la fabrication en 4 grandes étapes :

- Extraction de la matière première
- Fabrication des composants
- Assemblage des CSC
- Assemblage du PCA

On divise la fin de vie en plusieurs scénarios :

- Le recyclage (Broyage et revalorisation des matériaux)
- Upcycling (Réutilisation d'une partie de la CSC ou de quelques composants en bon état)
- Re-usage (Réutilisation de la CSC selon son état dans un nouveau systeme PCA)

Notez que la réutilisation et « l'Upcycling » ne sont possibles à grande échelle que, parce que les briques de conversion sont standardisées et que l'on suppose qu'elles conservent une valeur propre pour un nouvel usage.

Les couts énergétiques de chaque étape sont formulés de la façon suivante :

$$E_i = M_m E_{i,unitaire}$$

E_i est l'énergie au kg d'un processus de transformation d'un flux de matériaux de masse M_m .

Les matériaux extraits et utilisés dans la CSC sont inclus dans la figure 2, ils rentrent tous en compte dans la quantification du cout énergétique d'extraction de la matière première.

Concernant le cout énergétique de fabrication des composants (transformateurs, MOSFETs, inductances, condensateurs et connectiques), nous nous sommes inspirés de la thèse d'éco-dimensionnement d'un convertisseur DC/DC [18].

Les données sur l'assemblage des CSC en PCA sont issues de la thèse [18], ajouté à cela le cout additionnel de fabrication de la carte mère et des connectiques inter CSC qui vont venir lier l'ensemble [27]. L'assemblage à lieu en France avec une moyenne de 100km de transports.

Le reste des données pour caractériser la fin de vie des convertisseurs vient des rapports de l'ADEME sur la filière officielle des Petits Appareils en Mélange (PAM). Le recyclage se passe dans l'union européenne donc le déplacement couvre une distance moyenne approximée de 1000km.

Toutes ces données sont accompagnées d'une incertitude liée à la variabilité géographique, technologique ou tout simplement lié à la sensibilité des méthodes de calcul des bases de données par les industriels. Ces choix préliminaires présentent l'état d'avancement de nos travaux de recherche, suite à un an de travaux menés. La plupart des données retenues vont faire l'objet d'un travail récurrent pour en améliorer la pertinence.

Ci-dessous un exemple des couts énergétiques d'un PCA de 1kW avec dix CSC (20V, 5A) de 100W sur 1 an. C'est une estimation initiale partant des données disponibles.

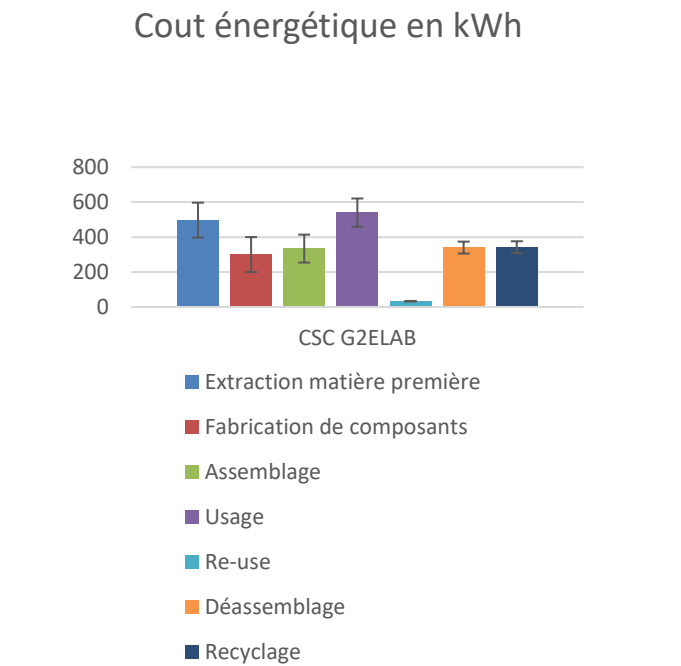


Fig. 7. Cout énergétique de chaque phase du cycle de vie d'un PCA de 1kW, le cout énergétique est annuel pour l'usage

3.1.2. Deuxième étape

Dans cette étape, nous déterminons la durée de vie d'une CSC et son état à la fin de cette durée.

L'indice le plus utilisé est le MTBF (Mean time between failure) exprimé en heures et est généralement calculé ainsi :

$$MTBF_{dc-dc\ convertier} = \frac{1}{\sum \lambda_{Mos} + \lambda_L + \lambda_{transfo} + \sum \lambda_{capa}}$$

Les λ_i sont les taux de fiabilité en h^{-1} . Pour simplifier l'étude, on peut considérer que la majorité des convertisseurs DC/DC isolés contiennent les composants principaux suivants, dont le taux de fiabilité peut être exprimé selon les expressions listées dans le tableau 2 :

MOSFET	$\lambda = \lambda_b \pi_T \pi_A \pi_Q \pi_E$
	$\pi_T = \exp\left(-1925\left(\frac{1}{T_j + 273} - \frac{1}{298}\right)\right)$
Condensateur	$\lambda = \lambda_b \pi_T \pi_Q \pi_C \pi_E \pi_V$
	$\pi_T = \exp\left(-\frac{0.35}{8.617 \times 10^{-5}}\left(\frac{1}{T_a + 273} - \frac{1}{298}\right)\right)$
inductance	$\lambda = \lambda_b \pi_T \pi_Q \pi_E$
	$\pi_T = \exp\left(-\frac{0.11}{8.617 \times 10^{-5}}\left(\frac{1}{T_{HS} + 273} - \frac{1}{298}\right)\right)$
Transformateur.	$\lambda = \lambda_b \pi_T \pi_Q \pi_E$
	$\pi_T = \exp\left(-\frac{0.11}{8.617 \times 10^{-5}}\left(\frac{1}{T_{HS} + 273} - \frac{1}{298}\right)\right)$

Tableau 2. Expression théorique de la fiabilité des grandes familles de composants d'un convertisseur DC/DC isolé.

Dans ces formules, λ_b est le taux de défectivité pour chaque composant qui represente une défaillance liée aux propriétés intrinseques de chaque composant. Viennent ensuite les facteurs de correction, π_A est le facteur d'application lié au champ applicatif du produit (militaire, médical, domestique...), π_Q est le facteur de qualité (la qualité est un facteur purement qualitatif on peut choisir de prendre la valeur par défaut proposée dans le manuel MIL-HDBK), π_E est le facteur environnemental (humidité moyenne annuelle, température ambiante, les cycles de froid et chaud ...).

Avec le calcul du MTBF, il est possible de construire la probabilité d'occurrence du défaut d'un composant ou de la CSC entière [28]. Cette probabilité suit une loi de poisson de facteur λ que l'on peut approximer par une loi normale de moyenne MTBF et d'écart type obtenu à partir de la loi de de Poisson [28].

La détermination de la criticité du défaut s'obtient grace à la superposition des gaussiennes de défectivité des principaux composants de la CSC. On introduit ainsi le principe de zone délimitée par les maximums des gaussiennes (le temps le plus probable pour avoir un défaut dans un composant donné) .

-La zone de re-use : Quand la probabilité d'apparition d'un défaut dans tous les composants est très faible voire nulle (Aucun défaut ou des risques minimales de défectivité donc la CSC peut etre réutilisée après une vérification de son état).

-La zone de désassemblage : Quand la probabilité d'apparition de défauts d'un ou plusieurs composants n'est plus negligeeable (un ou plusieurs composants sont probablement défectueux et on peut encore en désassembler quelques uns pour le « up-cycling »)

-La zone de recyclage : Quand la probabilité de défaillance du composant le plus fiable dans la CSC est à son maximum (tous les composants sont défectueux et on ne peut ni réutiliser la CSC ni ses composants)

Dans la figure 8.haut ci-dessous ont peut distinguer les differents scénarios de fin de vie de la CSC dependant des

probabilités d'occurrence des défauts au niveau des composants constitutants.

La figure de dessus illustre un cas où les composants tombent en panne plus rapidement ce qui limite la zone de réutilisation et de désassemblage par rapport au cas illustré dans la figure 8.bas en dessous de la précédente.

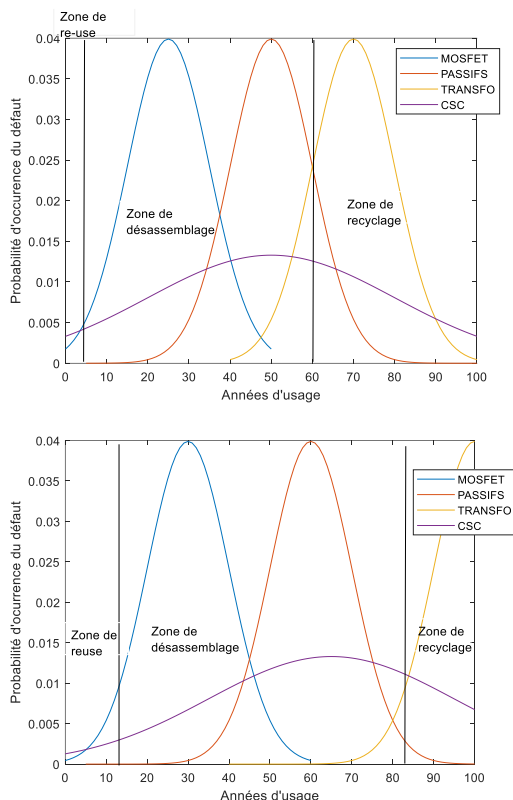


Fig. 8. 2 configuration de CSC offrant 2 jeux différents de probabilités d'occurrence des défauts au niveau composant, en haut les composants sont moins fiables que dans la figure plus bas

Avec ce diagnostic automatisé, il devient possible de lancer une simulation sur une durée de vie donnée avec des scénarios aléatoires de défaillance.

On peut aussi pour un but de comparaison théorique déplacer les gaussiennes de la figure 8 pour se placer dans un cadre de robustesse donnée de la CSC.

Plus la CSC sera robuste et fiable donc plus de matières initiales pour permettre cela, plus petite sera la zone de recyclage. Dans la troisième étape il est question de comparer ces scénarios possibles.

3.1.3. Troisième étape

Dans cette partie, nous réalisons un travail purement théorique dans le but d'utiliser les deux étapes précédentes pour comparer une CSC robuste, fabriquée avec donc plus de matières ajoutées à la fabrication et où la zone re-use est maximisée, et une autre CSC qui est gardée telle quelle et où la zone recyclage sera plus favorisée que la zone re-use (comme les deux configurations dans la figure 8).

On considère l'unité fonctionnelle suivante : un PCA de 1kW constitué de 10 CSC chacune de 100W fonctionnant pendant 50 ans, car au-delà de cette durée il faut prendre en compte des modèles de vieillissement des composants réutilisés, les modèles du manuel MIL-HDBK ne suffisent plus.

Nous calculons grâce à l'étape 1 les coûts énergétiques de chaque phase du cycle de vie du PCA pendant 1 an. Ensuite à l'étape 2 on génère d'une manière probabiliste le nombre de CSC défectueuses et la criticité de ces défauts. Les coûts énergétiques globaux sont cette fois-ci recalculés pour ces scénarios probabilistes chaque année. On obtient les résultats ci-dessous dans la figure 9.

Dans cet exemple généré aléatoirement il y'a eu par exemple 1 CSC défectueuse la 10^{ème} année et 3 CSC la 30^{ème} année. Le PCA favorisant les boucles rétroactives autre que le recyclage coûte moins énergétiquement que celui qui favorise le recyclage après à peu près la 30^{ème} année c'est-à-dire pour ce scénario probabiliste seulement, au-delà de 5 CSC défectueuses, il commence à être intéressant d'envisager de favoriser les boucles rétroactives.

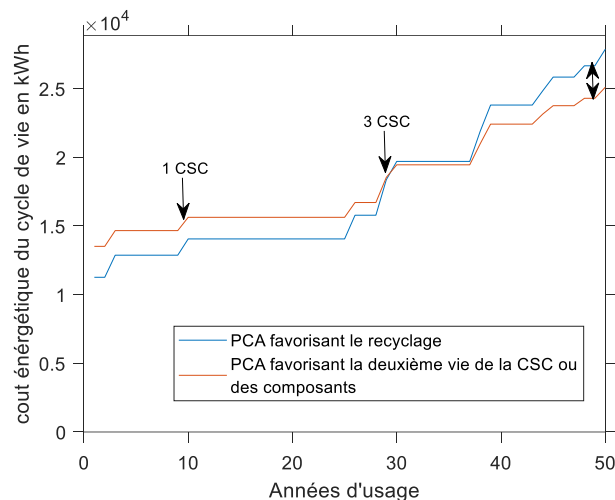


Fig. 9. Cout énergétique cumulé sur 50 ans de 2 scénarios de fin de vie liés à la nature des composants, CSC et du PCA

Bien évidemment ces courbes de comparaison entre deux types de PCA sont générées par un protocole probabiliste lié au diagnostic automatisé vu plus haut à l'étape 2. Cependant il existe d'autres scénarios où le PCA favorisant le recyclage coûte moins énergétiquement sur 50 ans que celui favorisant les autres boucles rétroactives. Il est donc, à ce stade impossible de conclure sur lequel des PCA proposés offre une meilleure sobriété énergétique. C'est pour cette raison que le chapitre suivant propose une méthode de Monte Carlo pour déceler une tendance favorisant l'un ou l'autre.

3.2. Comparaison générale avec la méthode Monte Carlo

Avec les trois étapes citées précédemment on effectue une étude de comparaison entre deux scénarios, celui où on maximise le recyclage et celui où on minimise le recyclage

On garde la même unité fonctionnelle utilisée figure 7, un PCA de 1kW constitué de 10 CSC pour un usage pendant 50 ans.

En faisant générer d'une manière probabiliste une centaine de cas particuliers de scénarios de fin de vie pour chaque type de PCA et en comparant ensuite le coût énergétique du PCA minimisant la part de recyclage avec celui du PCA maximisant cette part pour tous les scénarios générés on obtient cette multitude de courbes figure 10.

Nous appliquons ici la méthode de Monte Carlo qui permet de trouver une tendance à des scénarios probabilistes

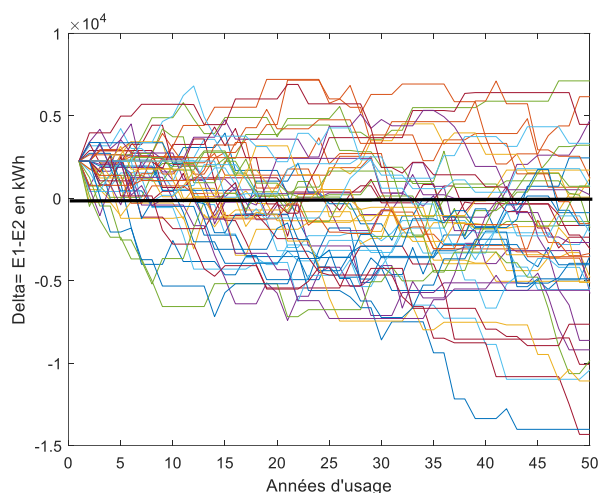


Fig. 10. Méthode de Monte Carlo de la comparaison entre le coût énergétique du PCA minimisant le recyclage et celui maximisant le recyclage pendant 50 ans

La figure 10 révèle des cas où le scénario favorisant le recyclage consomme moins d'énergie que celui qui favorise le re-use de la CSC et/ou des composants mais une tendance claire du différentiel se dirige vers le négatif. Ce qui veut dire que le PCA favorisant le recyclage est moins sobre énergétiquement sur son cycle de vie que le PCA minimisant cette part de recyclage au profit d'autres scénarios de fin de vie.

Malheureusement cette étude ne permet pas encore de trouver les raisons pour lesquelles dans certains cas un PCA est meilleur que l'autre. On ne peut que noter une tendance favorisant la multiplication des voies rétroactives en fin de vie, avéré avec l'état des données d'ACV et des modèles de défaillances disponibles. On peut cependant faire varier des paramètres pour retracer la source de chaque effet sur l'impact de la consommation énergétique.

Un travail important reste face à nous pour affiner les valeurs à préciser les tendances observées.

4. CONCLUSIONS

Le modèle d'économie circulaire est devenu très pertinent ces dernières années avec l'application du plan climat Français pour divers produits tel que les bouteilles en plastiques à usage unique ou les packagings pour les produits en supermarché. Mais il reste en effet plus difficile de l'implémenter sur des produits hétérogènes comme les produits électroniques car ils ont un cycle de vie complexe.

La modularité dans son aspect général peut être une solution durable à l'application de l'économie circulaire en électronique de puissance et aux 4 axes cités dans la seconde partie de l'article. Il reste maintenant à démontrer son intérêt et ses compromis dans le cas du domaine de la conversion d'énergie.

L'analyse précise de ces compromis et la création de solutions durables nécessitent des données sur les matériaux et les composants qui composent ces dispositifs. Ces informations sont rarement divulguées par les fabricants et n'existent que dans la littérature ouverte sous un format d'étude disparate.

Dans un contexte de données lacunaires dans le domaine de l'écoconception en électronique de puissance, il est nécessaire de former des hypothèses, d'approximer par des modèles déterministes ou probabilistes dans la mesure du possible.

Le but de ce travail est de proposer une méthode de détermination des opportunités de la modularité dans des cas

d'usages donnés avec des outils multidisciplinaires tel que l'AMDEC et l'ACV. On présente un état des lieux d'avancement de nos travaux bibliographiques au niveau des données intrants pour l'analyse de cycle de vie.

Cependant il faut recentrer les efforts sur la diminution de la sensibilité d'erreurs des données permettant la quantification des coûts énergétiques d'une manière précise, pour ainsi optimiser l'utilisation de cette méthode et en tirer des conclusions robustes liées au cadre d'usage choisi. Le diagnostic de défaillance automatisé cité plus haut peut aussi faire l'objet de précision en ajoutant tous les composants introduits dans la CSC et leur modèle de vieillissement post premier usage. Cette étude ne prend en compte que l'indicateur énergétique car le principe d'énergie est déjà utilisé en électronique de puissance et permet de garder un vocabulaire commun entre les deux disciplines. Cependant une étude plus exhaustive et plus descriptive de la réalité pour l'économie circulaire doit inclure d'autres indicateurs tel que les rejets de substances dans la biosphère ou aussi la raréfaction des métaux pour éviter l'effet rebonds d'un indicateur à un autre.

5. REFERENCES

- [1] V. Debusschere, « Contributions méthodologiques à l'éco-conception des convertisseurs électromagnétiques d'énergie », these.fr, 2009.
- [2] Ernst, R., Kamrad, B., 2000. Evaluation of supply chain structures through modularization and postponement *124*, p. 495-T.
- [3] Godard, O. (2005). Politique de l'effet de serre. Une évaluation du plan français de quotas de CO₂. *Revue française d'économie*, 19(4), 147-186.
- [4] Vargas-Gonzalez, M., & Hamon, L. (2014). *DONNEES DISPONIBLES POUR LA MODELISATION ACV DES FILIERES DE TRAITEMENT ET DE VALORISATION DES PRODUITS EN FIN DE VIE* (Doctoral dissertation, SCORE LCA).
- [5] A. Andreta " Automatic design for Manufacturing in Power Electronics based on power converter arrays, these.fr, 2019.
- [6] T. Lamorelle "Contribution à la conception et la production automatique en électronique de puissance via les réseaux de convertisseurs, these.fr, 2020
- [7] LAMORELLE, Théo, ANDRETA, André, LEMBEYE, Yves, *et al.* Design level power electronics building block: Industrial framework for DC-DC conversion. In : *2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. IEEE, 2018. p. 670-675.
- [8] Labbé, J. F. (2016). Les limites physiques de la contribution du recyclage à l'approvisionnement en métaux. In *Annales des Mines-Responsabilité et environnement* (No. 2, pp. 45-56). FFE.
- [9] Aggeri, F., & Cartel, M. (2017). Le changement climatique et les entreprises: enjeux, espaces d'action, régulations internationales. *Entreprises et histoire*, (1), 6-20.
- [10] Marcheix, A. (2016). Préparer la COP21. *I2D Information, données documents*, 53(1), 64-65.
- [11] A. VAZ et al., « l'économie circulaire une réponse aux enjeux environnementaux liés à la raréfaction des ressources », REEE N 5/2019, p. 56.
- [12] A. Jeanjean et al., « La seconde vie des smartphones en Europe », Recommerce REEE N 5/2019, p. 67.
- [13] Aguiar, F. C., Bentz, J., Silva, J. M., Fonseca, A. L., Swart, R., Santos, F. D., & Penha-Lopes, G. (2018). Adaptation to climate change at local level in Europe: An overview. *Environmental Science & Policy*, 86, 38-63.
- [14] Andreta, A., Derbey, A., Lembeye, Y., Villa, F. L. L., & Crebier, J. C. (2018, June). Characterization Platform for Modular Power Converters. In *PCIM Europe 2018; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management* (pp. 1-6). VDE.
- [15] Arvanitoyannis, I. S. (2008). ISO 14040: life cycle assessment (LCA)—principles and guidelines. *Waste management for the food industries*, 97-132.
- [16] McLeish, J. G. (2010, January). Enhancing MIL-HDBK-217 reliability predictions with physics of failure methods. In *2010 Proceedings-Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)* (pp. 1-6). Ieee.

- [17] Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1218-1230.
- [18] Jaouen, C. (2012). *Méthodologie de dimensionnement sur cycle de vie d'une distribution en courant continu dans le bâtiment: applications aux câbles et convertisseurs statiques DC/DC* (Doctoral dissertation).
- [19] Oguchi, M., Murakami, S., Sakanakura, H., Kida, A., & Kameya, T. (2011). A preliminary categorization of end-of-life electrical and electronic equipment as secondary metal resources. *Waste management*, 31(9-10), 2150-2160.
- [20] Reller, A. (2011). Criticality of metal resources for functional materials used in electronics and microelectronics. *physica status solidi (RRL)–Rapid Research Letters*, 5(9), 309-311
- [21] Ninlawan, C., Seksan, P., Tossapol, K., & Pilada, W. (2010, March). The implementation of green supply chain management practices in electronics industry. In *World Congress on Engineering 2012. July 4-6, 2012. London, UK*. (Vol. 2182, pp. 1563-1568). International Association of Engineers.
- [22] Berry, D., Towill, D. R., & Wadsley, N. (1994). Supply chain management in the electronics products industry. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*.
- [23] Hofrichter, K., Dara-Abrams, J. A., & Gaxiola, D. G. (2007). *U.S. Patent No. 7,260,597*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [24] Arenette AN, Brewer BL, Design for sustainability DFS J Clean Prod 2014
- [25] Go TF, Wahab DA, multiple generation life-cycles for product sustainability 2015
- [26] Cassoret Bertrand, Manata Jean-Paul, « bilans énergétique de la construction et de l'utilisation de moteurs asynchrones » Béthune 2014.
- [27] Musa, J. D., & Okumoto, K. (1984, March). A logarithmic Poisson execution time model for software reliability measurement. In *Proceedings of the 7th international conference on Software engineering* (pp. 230-238).
- [28] Presman, E. L. (1986). Approximation in variation of the distribution of a sum of independent Bernoulli variables with a Poisson law. *Theory of Probability & Its Applications*, 30(2), 417-422.