

Évaluation de la démontabilité des convertisseurs électroniques de puissance pour une circularité améliorée

Tugce TURKBAY ROMANO^{a,b,*}, Li FANG^{a,c,*}, Maud RIO^c, Thecle ALIX^b, Julien MELOT^d, Fabrice SERRANO^d, Alexandre DRAY^d, Pierre LEFRANC^a, Yves LEMBEYE^a, Nicolas PERRY^b, Jean-Christophe CREBIER^a

^aUniv. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2ELAB, 38000 Grenoble, France

^bArts et Métiers Institut de Technologie, Université de Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, INRAE, I2M Bordeaux, F-33400 Talence, France

^cUniv. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP, 38000 Grenoble, France

^dEaton Industries France, Grenoble 38330 Montbonnot St Martin, France

* Ces auteurs ont également contribué à ce travail.

RÉSUMÉ - Les convertisseurs d'électroniques de puissance (CEP) jouent un rôle crucial dans le fonctionnement de nombreux systèmes et appareils électriques modernes. Malgré leur utilisation répandue, l'absence d'un processus de démontage efficace et rentable pour ces dispositifs peut limiter leur réutilisation, leur réparabilité, leur refabrication et, en fin de compte, leur recyclabilité, entravant ainsi la circularité des produits. Afin de comprendre la circularité de ces produits, il est important d'évaluer la difficulté du désassemblage. Par conséquent, cet article étudie l'applicabilité de la facilité de désassemblage (eDiM), qui est référencée dans la norme EN 45554, pour analyser le désassemblage des produits électroniques à base de circuits imprimés (PCB). Après avoir identifié les limites de la méthode eDiM, nous avons affiné et adapté la méthode pour la rendre plus appropriée pour les CEP basés sur les PCB, et ainsi proposer une méthode d'évaluation de la démontabilité spécifique aux CEP basés sur les PCBs permettant la mise en œuvre d'exigences quantifiables pour les produits soutenant l'économie circulaire. Par cette approche normalisée pour évaluer la facilité de démontage au niveau des PCB, facilitant ainsi l'identification des améliorations de conception susceptibles d'améliorer leur circularité, les décideurs politiques et les concepteurs peuvent contribuer plus efficacement à la transition vers une économie circulaire dans l'électronique des PCB et plus particulièrement dans l'électronique de puissance.

Mots-clés — *circularité, démontabilité, mesures de facilité de désassemblage, convertisseur électronique de puissance, réparation, carte de circuit imprimé*.

1. INTRODUCTION

Les Convertisseurs d'Electroniques de Puissance (CEP) jouent un rôle crucial dans la conversion et le contrôle efficaces de l'énergie électrique dans diverses applications telles que les systèmes d'énergie renouvelable, les data-centers, les véhicules électriques et les réseaux de transport et de distribution d'énergie [1]. L'utilisation des CEP augmente et, par conséquent, un nombre de plus en plus grand de CEP est éliminé et contribue au flux de déchets électroniques. Cela souligne l'importance de gérer correctement ces produits. Beaucoup d'entre eux sont des systèmes électroniques de faible à moyenne puissance, principalement réalisés sur circuit imprimé (PCB) pour leur assemblage et leurs interconnexions. Les PCB représentent un problème croissant en raison de leur grande hétérogénéité et de

leur haut niveau d'intégration, ce qui rend difficile toute tentative d'économie circulaire.

Les déchets électroniques (e-déchets) sont l'un des flux de déchets qui connaissent la croissance la plus rapide [2]. En 2019, le monde a généré 53,6 Mt de e-déchets, et ce nombre devrait atteindre 74,7 Mt d'ici 2030 [3]. L'Union Européenne (UE) a adopté en 2015 un Plan d'Action pour l'Economie Circulaire (PAEC), mettant l'accent sur la conception des produits en tant que pilier clé, avec des stratégies visant à accroître l'efficacité des matériaux, à prolonger la durée de vie des produits et à améliorer l'efficacité du recyclage [2]. La législation est de plus en plus axée sur l'allongement de la durée de vie des produits afin de réduire la production de e-déchets et la dégradation de l'environnement [4]. Cet objectif peut être atteint en permettant plusieurs cycles de vie aux produits en tenant compte des scénarios de circularité (également appelés scénarios R), tels que la réutilisation, la réparation, le reconditionnement et la refabrication [5], nécessitant un accès au boîtier, aux sous-assemblages et aux composants du produit [6].

La démontabilité est défini comme le degré de démontage facile [7] afin d'évaluer la démontabilité, il est essentiel de décider quelles stratégies de circularité seront à mettre mises en œuvre une fois que le produit ne sera plus utilisé et ce quel que soit l'appareil seront. Par conséquent, il est nécessaire de hiérarchiser les pièces et la priorisation des parties sera différente dans le contexte de différents scénarios de circularité [8]. Ainsi, le scénario de circularité doit être choisi avant d'évaluer la démontabilité afin d'identifier les composants cibles et le niveau acceptable de dommages fonctionnels générés pendant le désassemblage : tels que des composants moins fiables pour la réparation et l'entretien, les composants les plus fiables pour la réutilisation et les composants et matériaux de grande valeur pour le recyclage. De plus, il est important d'éviter une charge thermique excessive sur les composants et les interconnexions (lors du dessoudage des PCB par exemple), si les composants ou les interconnexions sont destinés à être réutilisés. En effet, la charge thermique peut raccourcir la durée de vie des composants et des sous-ensembles. En outre, il est essentiel de minimiser les dommages mécaniques pour garantir que les composants, les sous-ensembles et le boîtier puissent être réutilisés sans perte de valeur fonctionnelle [9].

De nombreuses techniques ont été proposées par les chercheurs pour évaluer le niveau de désassemblage des produits, y compris la facilité de désassemblage par des métriques (eDiM) développées par Vanegas et al. [2]. L'objectif d'eDiM est de faciliter la réparation, la réutilisation, la remise à neuf et le recyclage en fournissant des informations pour améliorer la conception des produits, conformément aux principes d'une économie circulaire. Ce projet a été soutenu par la direction générale de l'environnement de la Commission Européenne et le rapport final a été publié par le Centre commun de recherche [10]. La méthode eDiM se concentre sur les équipements électriques et électroniques et le système de notation est fondé sur les temps de démontage et de remontage [11]. De plus, la méthode eDiM est citée dans la norme d'efficacité des matériaux EN 45554, publiée dans le cadre du PAEC de l'UE (2020), afin de promouvoir l'efficacité des matériaux conformément à la directive sur l'écoconception 2009/125/CE et à la proposition de règlement sur l'écoconception pour les produits durables.

Malgré la disponibilité de telles méthodes, il existe encore un manque de littérature sur la caractérisation du désassemblage de produits électriques et des CEP entiers, comme l'a souligné Patra (2021) [12]. Plus précisément, la norme horizontale générique EN 45554 a des applications limitées aux produits uniques liés à l'énergie tels que les entraînements à base d'EP [12]. C'est particulièrement le cas des PCBs où tous les composants électriques sont assemblés et interconnectés.

Dans cet article, nous visons à étudier la démontabilité des CEP à base de PCB en appliquant la méthode eDiM et en mettant l'accent sur leur réparabilité (partie 2). Pour ce faire, nous avons utilisé comme cas d'étude une alimentation sans interruption (ASI) afin d'évaluer l'application de la méthode eDiM aux CEP. En outre, une méthode eDiM sur mesure pour les CEP basés sur des PCBs a été proposée (partie 3) et analysée sur un cas d'étude (partie 4).

2. PROCÉDÉ EDIM ET PROCÉDÉ DE DÉSASSEMBLAGE D'UN CEP À BASE DE PCB

La méthode eDiM est fondée sur la technique de séquence d'opération Maynard (MOST)® qui est un outil d'analyse de systèmes temporels pré-déterminés utilisé par les ingénieurs industriels et les praticiens pour mesurer les temps d'assemblage d'une grande variété de produits [2], [8]. Le Tableau 1 fournit un exemple de séquence d'utilisation de l'outil MOST. Les mouvements de base qui forment une séquence standard sont chacun identifiés par une lettre, telle que A pour mouvement horizontal, B pour décalage vertical, G pour la saisie, P pour le placement et L pour le relâchement. Une carte de données supplémentaire répertorie plusieurs indices de degrés de complexité et de exigences de temps correspondantes, pour ces actions [13].

Tableau 1. Exemple d'utilisation de MOST d'après [13].

	Obtenir l'outil	Mettre l'outil en place	Action de l'outil	Mettre l'outil de côté	Retour à la position
Utilisation de base de l'outil MOST	ABG	ABPA	L	ABP	A

Dans la eDiM, les tâches requises pour désassembler les pièces sont répertoriées et chaque tâche se voit attribuer une valeur de temps de référence correspondante indiquée dans la base de données. Ces valeurs représentent la quantité d'effort requis pour accomplir chaque tâche [14]. Afin d'éliminer tout biais subjectif, eDiM utilise des propriétés géométriques et

physiques facilement vérifiables des fixations, y compris une base de données avec une taxonomie clairement définie et des paramètres facilement vérifiables. Le Tableau 2 montre l'approche eDiM pour calculer le temps de désassemblage d'après [2]. Les six premières colonnes fournissent des informations sur la catégorie de produits. (1) Énumère les composants dans un ordre spécifique pour atteindre les composants ciblés ou pour démonter complètement le produit. (2) Répertorie la séquence de connecteurs qui doivent être déconnectés pour extraire chaque composant. (3) Le nombre de connecteurs par composant. (4) Le nombre de manipulations de produits nécessaires pour accéder aux composants qui doivent être libérés. (5) La facilité d'identification des connecteurs. (6) Indique le type d'outil approprié pour libérer chaque connexion.

En utilisant les informations contenues dans les six premières colonnes, on peut calculer les sept dernières colonnes en utilisant des temps standards fondés sur des valeurs de référence. (7) Comprend le fait de prendre un outil et de le remettre, tout en le préparant à l'emploi en apportant les modifications ou les préparatifs nécessaires. (8) Consiste à déterminer l'emplacement des connecteurs, ainsi que le type de connecteur et l'outil approprié nécessaire pour les débrancher. (9) Désigne le fait de placer l'outil dans la bonne position par rapport à la fixation avant d'amorcer le processus de déconnexion. (10) Fait référence au temps nécessaire pour déplacer ou ajuster le produit afin de localiser et de déconnecter un connecteur. (11) Désigne le temps nécessaire pour débrancher physiquement une fixation. (12) Fait référence à la durée nécessaire pour retirer les composants non attachés et les placer dans des récipients appropriés.

Tableau 2. Approche fondée sur les feuilles de calcul eDiM pour calculer le temps de désassemblage d'après [2].

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Démontage, séquence de comp.	Démontage, séquence de connecteurs de comp.	Nombre de connecteurs	Nombre de produits	Identifiabilité (0,1)	Type d'outil	Changement(s) d'outil (s)	Identification (s)	Positionnement (s)	Manipulation (s)	Déconnexions (s)	Enlèvement (s)	eDiM (s)

(13) eDiM: Le temps total de démontage est calculé à partir des données (7-12) en utilisant l'équation (1) pour les produits contenant n composants [2].

$$eDiM = \sum_{i=1}^{i=n} \left(\begin{array}{l} \text{Changement d'outil}_i + \text{Identification}_i \\ + \text{Positionnement}_i + \text{Manipulation}_i \\ + \text{Déconnection}_i + \text{Enlèvement}_i \end{array} \right) \quad (1)$$

La mise en œuvre de l'approche eDiM est limitée aux étapes mécaniques jusqu'au PCB. Pour les systèmes électriques et d'électroniques de puissance, il est nécessaire de pouvoir quantifier également la complexité et le temps nécessaire pour effectuer un démontage au niveau des PCB.

2.1. Processus de désassemblage du CEP à base de PCB

Un CEP se compose généralement de différents composants, y compris un bloc électromécanique et un assemblage de carte de circuit imprimé (PCBA) [15] [16]. Le bloc électromécanique peut inclure des dissipateurs thermiques pour semi-conducteurs, le boîtier extérieur de l'équipement. Ces composants sont généralement fixés mécaniquement ensemble à l'aide de vis et de câblage. Le PCBA est la structure constituée d'un PCB et de divers Composants Electroniques (CE) montés sur celui-ci des

semi-conducteurs, des condensateurs, des éléments magnétiques, des circuits intégrés et des PCB [15] [16].

Pour désassembler un CEP, il faut d'abord démonter le bloc électromécanique pour accéder à l'PCBA. Ensuite, le CE ciblé qui s'est installé sur le PCB peut être démonté. Le processus de désassemblage d'une CEP comporte généralement quatre étapes principales aux fins des scénarios de circularité ou recyclage : (i) Fixation du PCB. Cela peut être facilité par l'utilisation d'un support avec des pinces réglables ou d'un étau, ce qui permet un accès facile aux composants et évite d'endommager la carte ainsi que les salissures liées aux manipulations. Pour assurer la sécurité des CE sensibles, la fixation du PCB doit être conçue pour permettre la mise à la terre de la carte, empêchant ainsi tout risque électrostatique potentiel. (ii) Le dessoudage des CE sur le PCB est réalisé par diverses méthodes [17], [18]. (iii) Démontage ou délogement, principalement en appliquant des forces externes pour extraire l'EC du PCB, ce qui peut impliquer un balayage mécanique, un jet de gaz, une force centrifuge ou une saisie robotisée [17], [18]. (iv) Inspection et nettoyage des composants et de la carte pour s'assurer qu'il ne reste aucun résidu de soudure, débris ou autres contaminants.

Le processus de dessoudage est grandement influencé par la température de dessoudage, ce qui a un impact sur la durée du processus. En outre, l'outil de dessoudage, la taille et la forme des composants et le type de PCB peuvent également affecter le processus de dessoudage. Par exemple, l'utilisation d'une station de dessoudage avec une buse à pointe fine peut faciliter le ciblage précis des brasures et minimiser les dommages aux composants voisins [19]. Il convient de noter qu'à l'exception du recyclage, toutes les situations de circularité nécessitent des procédures de démontage non destructives. Par conséquent, cette étude se concentrera sur le dessoudage par la chaleur.

2.2. Défis liés à la mise en œuvre de la méthodologie eDiM dans le CEP basé sur les PCB

La configuration expérimentale de mise en œuvre de eDiM est donnée dans la Fig. 1 explicitée ci-après. Dans sur la Fig. 2, le champ d'application de la méthode eDiM est indiquée par l'encadré vert pointillé. En revanche, la méthode eDiM n'a pas été réalisée au niveau des PCB [20], voir Fig. 2, la boîte rouge pointillée. De fait, pour statuer sur la compatibilité d'eDiM avec les PCBA, cette étude a identifié trois défis importants qui doivent être surmontés :

- La base de données doit être enrichie: dans eDiM, les outils sont choisis à partir d'un inventaire établi d'outils (sur la base des normes disponibles, c'est-à-dire ISO/TC 29/SC 10), tels que les outils pour pincer, pinces, vis et écrous [13] mais il n'y a pas de référence pour les outils de dessoudage.
- Des données d'entrée spécifiques supplémentaires sont requises : il existe des procédés détaillés de brasage et de dessoudage qui augmentent le temps de démontage, mais ces détails ne sont pas indiqués dans le Tableau 2.
- La liste des tâches de démontage devra être modifiée : il n'y a aucune information concernant la température.

Pour adapter la méthode eDiM à quantifier le désassemblage de l'électronique à base de PCB, il est impératif d'intégrer d'autres critères pertinents pour le processus de dessoudage. Entre-temps, la base de données MOST doit être élargie en incorporant des informations complètes concernant à la fois les CE et les processus de (dé)soudage, telles que l'indice de temps pour les actions détaillées liées à la tâche de dessoudage. Cet article se concentre sur le détail des étapes de dessoudage qui ont

un impact sur le temps de démontage et les outils nécessaires. L'objectif est d'orienter les études futures pour tenir compte de ces étapes lors de la création de points de référence.

3. MÉTHODOLOGIE

La méthode eDiM propose un processus de démontage complet ou partiel, sans endommager les composants [11]. Dans cette étude, nous considérons le démontage partiel en nous concentrant sur le scénario de réparation au niveau du PCBA. Bien que les étapes fondamentales des scénarios de réparation soient (i) l'identification du produit, (ii) le diagnostic de défaillance, (iii) le démontage et le remontage, (iv) le remplacement des pièces de rechange, (v) la remise en état de fonctionnement [21]. Pour atteindre cet objectif, les pièces prioritaires à démonter sont déterminées en fonction de leur taux de défaillance. La littérature rapporte que les composants les moins fiables dans les applications EP sont les condensateurs (de types électrolytiques, films et céramiques classés du plus au moins sujet aux pannes) et les semi-conducteurs de puissance [22]–[25]. Les condensateurs, les transistors et les diodes ont donc été priorisés pour le désassemblage. Par ailleurs, des équipements de protection tels que des fusibles et des varistances ont été inclus dans la liste, car ces dispositifs peuvent être endommagés en cas de défaillance de la protection de l'ensemble du système.

La configuration expérimentale est donnée dans la Fig. 1. En plus des outils de démontage, un extracteur de fumée est utilisé pour protéger l'opérateur des émissions de l'opération de fumées de brasure. La lampe grossissante réglable est un outil essentiel pour fournir suffisamment de lumière et pour identifier avec précision les composants. Le port de bracelets et de chaussures spéciales est recommandé pour éviter l'accumulation de charges électrostatiques sur l'opérateur. Par-dessus tout, il est crucial d'avoir un espace de travail propre et bien organisé.

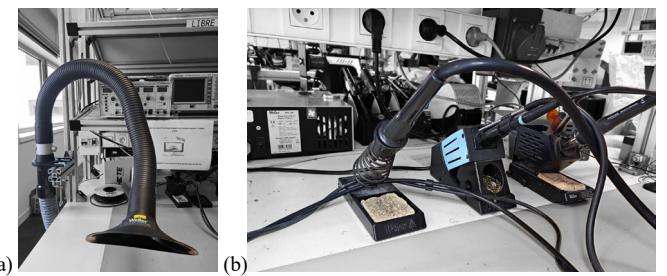


Fig. 1. (a) extracteur de fumées, (b) station de soudure et de dessoudage.

Divers outils sont utilisés pendant le processus de démontage pour extraire le PCBA du boîtier du produit, tels que les tournevis cruciforme, plat ou torx. En plus de ces outils, une manipulation minutieuse est également utilisée pour libérer les clips ou les connecteurs. Un autre ensemble d'outils est nécessaire pour dessouder l'EC du PCB, tels que des pinces, des fers à dessouder, des pistolets à air chaud, des pompes à dessouder, des tresses à dessouder. Les pinces brucelles sont utilisées pour extraire les composants avec précision tout en protégeant l'opérateur de la température des composants causée par le fer à dessouder. Un fer à dessouder avec une pompe est utilisé pour faire fondre la brasure et aspirer la brasure fondu du joint et des pattes des composants. Il est disponible en différentes tailles de buses pour différents diamètres des pattes des CE. Pour le réassemblage des CE, les outils nécessaires sont essentiellement le fer à souder, le fil de soudure et le flux de soudure. Le flux de soudure est une substance chimique utilisée pour nettoyer et préparer les surfaces à souder en éliminant les oxydes et les impuretés. Après la soudure, il y aura des restes de

soudure sur la pointe du fer à souder et elle doit être nettoyée avec de la pâte de nettoyage, etc. De plus, afin de s'assurer que le PCB est exempt de débris ou de contamination, il doit être nettoyé à l'aide d'un produit chimique, d'une brosse et d'air sous pression.

Une étude de cas d'un produit ASI a été utilisée pour évaluer l'applicabilité de la méthode eDiM pour évaluer le désassemblage des convertisseurs à base de PCB. Plus précisément, le processus de démontage de l'onduleur à base de PCBA a été effectué et l'efficacité de la méthode d'évaluation du désassemblage a été testée. L'objectif de cette étude expérimentale était double : premièrement, identifier les limites de l'utilisation de la méthode eDiM dans le contexte des CEP à base de PCB et, deuxièmement, mettre en évidence les critères qui nécessitent une modification pour adapter cette méthode aux CEP à base de PCB. Finalement, une méthode sur mesure pour le CEP à base de PCB est proposée.

4. RÉSULTATS

Dans cet article, nous considérons le scénario de réparation au niveau des PCB parmi les scénarios de circularité. Seule l'étape de démontage du processus de réparation est prise en compte en supposant que les composants complets seront remplacés par des composants fonctionnels. Par conséquent, les propriétés de réutilisation des composants désassemblés ne sont pas prises en compte, telles que la soudure restée sur les fils, l'effet d'humidité, la mouillabilité, etc. D'autre part, un soin particulier est apporté à limiter le vieillissement des PCB tout au long des activités de réparation, en limitant les manipulations, les poussières, les contraintes mécaniques et thermomécaniques.

La méthode proposée ne tient pas compte des activités préalables et postérieures au démontage. Bien que ces activités soient complémentaires et dépassent généralement le cadre de la conception des circuits imprimés, elles jouent un rôle essentiel dans l'efficacité globale du processus de réparation.

La méthode eDiM adaptée aux PCBA des CEP est présentée dans le Tableau 4. Le premier segment décrit les données d'entrée nécessaires au calcul du temps. La deuxième section présente une liste exhaustive des tâches de démontage. Dans les « connecteurs » suivants, les différentes options mécaniques permettent de créer un assemblage entre ou parmi les composants et les sous-pièces. De cette manière, un joint de soudure est un type de connecteur. Ils sont illustrés à la Fig. 3. Les définitions de chaque ligne sont fournies ci-dessous :

(1) Séquence de désassemblage des CE : la liste de CE fréquemment réalisées dans le scénario de réparation est ciblée.

(2) Séquence de désassemblage des connecteurs de CE : pour démonter les connecteurs des CE, il peut être nécessaire de suivre une séquence spécifique. En effet, les CE peuvent avoir une connexion supplémentaire, qui peut devoir être déconnectée avant le processus de dessoudage proprement dit.

(3) Type de connexion mécanique: les CE peuvent être classés en différents types de connexions, y compris la Technologie de Montage en Surface (SMS), la Technologie à Trou Traversant (TTT), vissée, rivetée, et douille-socle [15], Fig 3. Différentes connexions nécessitent un outil de démontage différent et (3) fournira une entrée pour la sélection de l'outil (8).

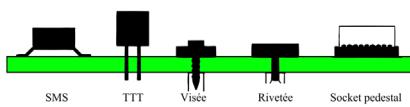


Fig. 3. Différentes technologies de connexion[15].

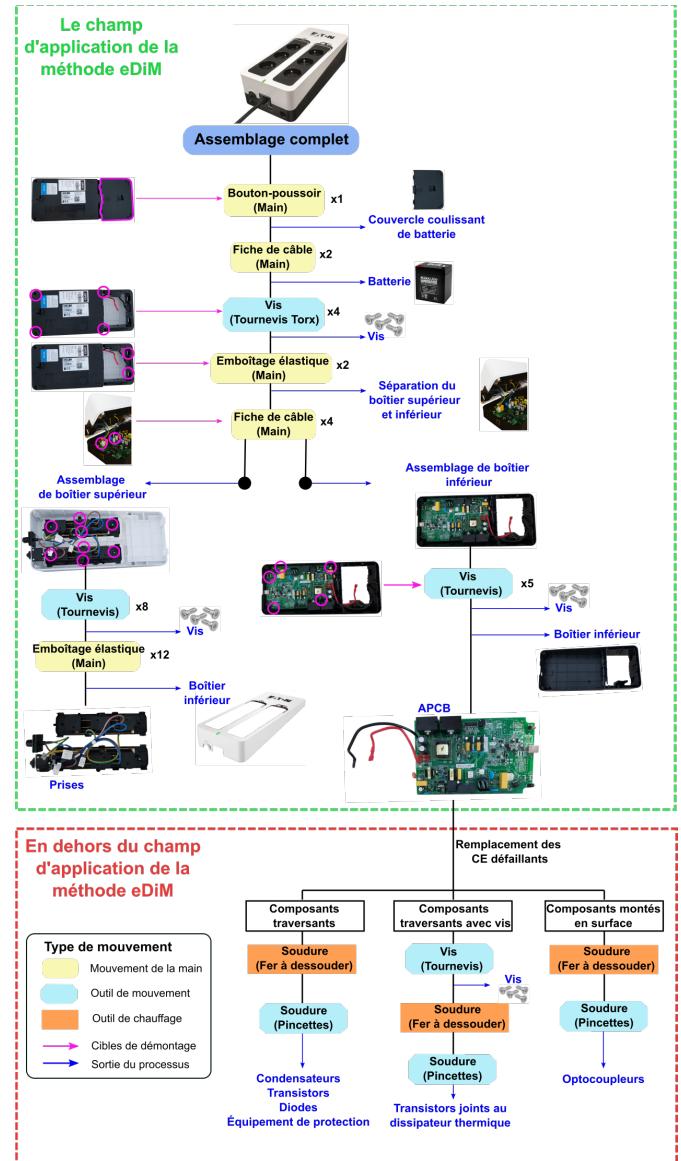


Fig.2. Séquence de démontage de l'onduleur.

(4) Type d'emballage : permet d'identifier l'outil de démontage le plus adapté pour le démontage. Les différents emballage d'électroniques peuvent être classé comme simple en ligne, double en ligne, petit contour, contour de transistor, ligne plate quadruple, sans plomb, J-lead, etc. [26] cf. Fig. 4. Le type de boîtier doit inclure le nombre de connexions et il a une incidence importante sur le temps nécessaire au dessoudage ou au démontage et au délogement des CEs. De plus, des outils spécialisés de dessoudage/démontage peuvent être nécessaires pour certains types de boîtiers.



Figure. 4. Exemples de types de boîtier, de gauche à droite, simple en ligne SIL, double en ligne DIL, boîtier transistor métal TO18, ligne quadruple plate TQ, transistor en boîtier ISOTOP, réseau de billes [26]–[28]

(5) Point de fusion de la soudure : le point de fusion fournira une entrée pour le calcul du temps de démontage. Le Tableau 3 montre les différents points de fusion de certaines soudures.

Tableau 3. Les caractéristiques des soudures utilisées en électronique [29].

Type de soudure	Température de point de fusion (°C)
63Sn/37Pb	183
42Sn/59Bi5 Sn/10Bi/5Zn	138
77.2Sn/20In/2.8Ag	179-189
99.3Sn/0.7Cu	227

(6) Nombre de manipulations du produit : Il est le nombre de manipulations de produits nécessaires pour désassembler les CE.

(7) Identification : fait référence à la facilité avec laquelle les connecteurs peuvent être identifiés. Ce concept est défini dans [11] suit : i) les connecteurs dont la surface visible est supérieure à $0,05 \text{ mm}^2$ sont considérés comme facilement identifiables, ii) les connecteurs ayant une surface cachée, où seulement moins de $0,05 \text{ mm}^2$ est visible, sont considérés comme difficiles à identifier.

(8) Type d'outil : comprend les outils de soudure spécifiques tels que le fer à souder, la pompe à dessouder, l'utilisation de la tresse à dessouder ou de fer à souder, ou l'utilisation de pistolet à air chaud en particulier pour SMD, pinces, pinces à dessouder, tournevis, etc. Bien qu'il existe des techniques supplémentaires disponibles pour le démantèlement des CE, Fig. 5 montre les outils capables de cibler des composants individuels.



Figure. 5 Différentes technologies d'outils, de gauche à droite, pistolet à air chaud avec diverses buses, fer à dessouder avec pompe, fer à souder.

(9) Température de l'outil de soudage : appropriée à déterminer, car elle affectera le temps et la qualité de la tâche de dessoudage. Si la température de l'outil de soudure est trop basse, la soudure peut ne pas fondre correctement, ce qui entraîne un temps de dessoudage plus long. Inversement, si la température de l'outil de soudure est trop élevée, il peut surchauffer les composants environnants s'il n'est pas retiré à temps, ce qui endommage le PCB et le rend moins adapté à une réparation réussie.

(10) Niveau de compétence de l'opérateur : niveau de compétence technique de la personne qui effectue les tâches de démontage. Cela comprend la capacité d'identifier et d'accéder au composant ciblé, de manipuler les outils en toute sécurité et de gérer tout risque pour le produit, l'environnement et l'opérateur. Il peut être classé en différentes catégories débutant, aguerri, expert, fabricant ou expert autorisé [8].

(11) Fixation du (des) PCB (s) : le temps de fixation du PCBA par des étaux à PCB. Les préhenseurs de PCB sont utilisés pour maintenir le PCB en toute sécurité tout en permettant un accès facile aux composants pour le (dé)montage et ils facilitent les manipulations des PCB.

(12) Changement d'outil (s) : indique le temps nécessaire pour le changement d'outil, c'est-à-dire le remplacement de la buse du fer à dessouder ou du pistolet à air chaud. Le fer à souder peut-être chaud pendant le processus de remplacement de la buse, nécessitant un temps supplémentaire pour le refroidissement ou le temps nécessaire pour mettre des gants spécifiques et les retirer.

(13) Identification (s) : le temps nécessaire à l'identification de la soudure correspondante.

(14) Positionnement de l'outil (s) : il indique le positionnement précis du fer à souder sur la soudure et la pose de pinces sur les CE, soit avant ou simultanément avec le positionnement du fer, de sorte que la pince puisse déloger les CE dès que la soudure a fondu.

(15) Dessoudage(s) : durée nécessaire à la fonte de la soudure et à la connexion de se relâcher. Une fois que la soudure a fondu, la connexion entre les CE et le PCB est rompue.

(16) Retrait de la ou des soudures fondues (s) : une fois la soudure fondu, il est essentiel de l'enlever complètement afin de déconnecter le fil des CE du PCB. Si la soudure fondu n'est pas enlevée, elle se solidifiera à nouveau lorsque le fer sera repositionné sur une autre sonde. Une méthode efficace pour enlever la soudure fondu consiste à utiliser une tresse à dessouder ou une pompe à dessouder pour aspirer la soudure.

(17) Déloger les CE (s) : retirer les CE du PCB avec une pince ou d'autres outils spécialisés.

(18) Nettoyage (s) : après le dessoudage, il est important de nettoyer tout résidu de soudure ou de flux restant sur le PCB pour le préparer à la soudure d'un autre CE. Une tresse à dessouder pour retirer la soudure restante ou une solution de nettoyage telle que l'alcool isopropylique pour éliminer le flux peut être utilisée.

(19) eDiM (s) : pour le calcul d'eDiM, les valeurs (11-18) doivent être additionnées. Après avoir retiré l'EC défectueux, il est nécessaire de le remplacer par un composant fonctionnel et de remonter le PCB. Cette partie n'est pas incluse dans cette méthode.

Tableau 4: Méthode eDiM adaptée aux PCBA des CEP.

Données d'entrée											Étapes de démontage							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Séquence de désassemblage des CE	Séquence de désassemblage des connex.	Type de connexion	Point de fusion de la soudure	Type d'emballage	Nombre de manipulations	Identifiabilité (0,1)	Type d'outil	Température de l'outil de dessoudage	Niveau de compétence de l'opérateur	Fixation du (des) PCB (s)	Changement(s) d'outil (s)	Identification (s)	Positionnement d'outil (s)	Dessoudage (s)	Déloger CE (s)	Nettoyage (s)	eDiM (s)	

5. DISCUSSION ET CONCLUSION

L'objectif de cette étude est de proposer une méthode opérationnelle d'évaluation du désassemblage des CEP à base de PCB à l'aide de la méthode eDiM. Et par là même, montrer son opérabilité pour les dispositifs électroniques PCB ordinaires. En appliquant cette méthode en atelier, il a été constaté que les procédés de dessoudage et de brasage sont plus techniques et compliqués que le démontage à l'aide de tournevis, de pinces ou manuellement et que la température affecte fortement le temps de (dé)brasage. De plus, la méthode eDiM sur mesure fait face à des défis pour quantifier cette opération en raison de l'absence d'un point de référence normalisé comme celui utilisé dans MOST. Afin de proposer une méthode normalisée d'évaluation du démontage pour la CEP à base de PCB, il est nécessaire de créer une base de données d'unités de mesure du temps compatibles avec tous les critères énumérés dans le Tableau 4, y compris le processus de (dé)brasage, les caractéristiques des CE, les outils, les traitements thermiques, etc.

De plus, par rapport aux processus d'assemblage qui sont principalement effectués dans des usines, les processus de réparation peuvent avoir lieu dans des lieux variants du domicile d'un utilisateur, un repair café ou à un centre de maintenance géré par un éco-organisme, si l'on imagine de manière pragmatique l'application de la loi AGEC anti-gaspillage en France ces prochaines années de réparation. Cela conduit à une diversité de niveaux de compétence des opérateurs influençant

le temps de démontage. Cette variable n'a pas encore été traitée dans la base de données MOST. Bien que la norme EN 45554 fournit des qualifications pour différents niveaux de compétence des opérateurs, leur influence sur l'indice de temps de démontage n'a pas été évaluée. Par conséquent, d'autres recherches sont nécessaires dans ce domaine pour mieux comprendre comment différents facteurs contextuels peuvent affecter le temps de démontage.

La base de données de mesure du temps adaptée permettra une évaluation plus précise du désassemblage en prenant en compte les facteurs contextuels dans les scénarios de circularité, qui peut être utilisée pour éclairer les décisions de conception et améliorer la durabilité des CEP.

La méthodologie proposée fournit une approche normalisée pour comparer la possibilité de démonter différents CEP. Elle peut aider à identifier les domaines où des améliorations peuvent être apportées aux techniques, telles que l'utilisation d'outils de dessoudage plus efficaces ou le développement de nouvelles techniques pour améliorer l'accessibilité des composants ciblés. La méthode eDiM peut également être utilisée pour identifier les verrous dans la conception CEP basée sur les PCB qui entravent le désassemblage, des modifications de conception peuvent ainsi être proposées pour améliorer le désassemblage.

En conclusion, la méthodologie proposée fournit un cadre théorique mais opérationnel pour évaluer le démontage de manière globale. L'utilisation de cette méthodologie peut promouvoir l'amélioration de l'écoconception des CEP à base de PCB en facilitant le démontage pendant la mise au point du produit, ce qui peut contribuer à des scénarios de circularité plus efficaces. Les résultats peuvent être utiles aux parties prenantes de l'industrie des CEP qui travaillent à atteindre des objectifs de circularité et de durabilité lors du développement de nouveaux CEP.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'Agence nationale de la recherche (ANR) pour son soutien financier, numéro de subvention ANR-21-CE10-0010.

6. RÉFÉRENCES

- [1] J. Falck, C. Felgemacher, A. Rojko, M. Liserre, and P. Zacharias, "Reliability of power electronic systems: An industry perspective," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 12, no. 2, pp. 24–35, 2018.
- [2] P. Vanegas *et al.*, "Ease of disassembly of products to support circular economy strategies," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 135, pp. 323–334, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.06.022.
- [3] V. Forti, C. P. Balde, R. Kuehr, and G. Bel, "The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential," 2020.
- [4] "French Parliament. (2020). Loi n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire (AGEC)."
- [5] S. Kara, M. Hauschild, J. Sutherland, and T. McAloone, "Closed-loop systems to circular economy: A pathway to environmental sustainability?," *CIRP Annals*, 2022.
- [6] L. Cong, F. Zhao, and J. W. Sutherland, "Product redesign for improved value recovery via disassembly bottleneck identification and removal," *Procedia CIRP*, vol. 61, pp. 81–86, 2017.
- [7] H. Mok, H. Kim, and K. Moon, "Disassemblability of mechanical parts in automobile for recycling," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 33, no. 3–4, pp. 621–624, 1997.
- [8] "EN 45554. (2020). General methods for the assessment of the ability to repair, reuse and upgrade energy-related products. European Committee for Standardization."
- [9] B. Rahmani, Y. Lembeye, M. Rio, and J.-C. Crebier, "Analysis of Passive Power Components Reuse," in *PCIM Europe digital days 2021: International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, VDE, 2021, pp. 1–8.
- [10] M.-D. Uli-Merz, "Design for repair as a circular Eco-Design approach: Methodological approaches and a case study on a vacuum cleaner," 2022.
- [11] J. Peeters, P. Tecchio, F. Ardent, P. Vanegas, D. Coughlan, and J. Duflo, *eDiM: Further development of the method to assess the ease of disassembly and reassembly of products: application to notebook computers*. 2018. doi: 10.2760/864982.
- [12] M. Patra, "European Ecodesign Material Efficiency Standardization Overview for Circular Economy Aspects in Motor and Power Drive Systems," presented at the Energy Efficiency in Motor Systems: Proceedings of the 11th international Conference EEMODS'19, Springer, 2021, pp. 231–242.
- [13] P. Vanegas Pena *et al.*, "Study for a method to assess the ease of disassembly of electrical and electronic equipment. Method development and application to a flat panel display case study," 2016.
- [14] M. Cordella, F. Alfieri, and F. J. V. SANFELIX, "Analysis and development of a scoring system for repair and upgrade of products," 2019.
- [15] S. Park, S. Kim, Y. Han, and J. Park, "Apparatus for electronic component disassembly from printed circuit board assembly in e-wastes," *International Journal of Mineral Processing*, vol. 144, pp. 11–15, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.minpro.2015.09.013.
- [16] F. Javier Hurtado Albir and J. Antonio Carrasco Hernández, "Environmental Aspects of Manufacturing and Disposal of Power Electronics Equipment," *EPE Journal*, vol. 21, no. 3, pp. 5–13, 2011.
- [17] J. Wang and Z. Xu, "Disposing and recycling waste printed circuit boards: disconnecting, resource recovery, and pollution control," *Environmental science & technology*, vol. 49, no. 2, pp. 721–733, 2015.
- [18] W. Zhao, J. Xu, W. Fei, Z. Liu, W. He, and G. Li, "The reuse of electronic components from waste printed circuit boards: A critical review," *Environmental Science: Advances*, 2023.
- [19] A. Renteria, E. Alvarez, and J. M. López, "A simulation based methodology to define the reuse process of printed circuit board's components," presented at the Proceedings of FAIM–18th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (30 junio–2 julio 2008, Skövde, Suecia). Skövde: University of Skövde, 2008, pp. 397–403.
- [20] F. De Fazio, C. Bakker, B. Flipsen, and R. Balkenende, "The Disassembly Map: A new method to enhance design for product repairability," *Journal of Cleaner Production*, vol. 320, p. 128552, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128552.
- [21] E. Bracquené *et al.*, "Repairability criteria for energy related products," *Study in the BeNeLux Context to Evaluate the Options to Extend the Product Life Time Final Report*, 2018.
- [22] S. Yang, A. Bryant, P. Mawby, D. Xiang, L. Ran, and P. Tavner, "An industry-based survey of reliability in power electronic converters," in *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Sep. 2009, pp. 3151–3157. doi: 10.1109/ECCE.2009.5316356.
- [23] Y. Yang, H. Wang, A. Sangwongwanich, and F. Blaabjerg, "Design for reliability of power electronic systems," in *Power electronics handbook*, Elsevier, 2018, pp. 1423–1440.
- [24] S. Peyghami, Z. Wang, and F. Blaabjerg, "A guideline for reliability prediction in power electronic converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 10, pp. 10958–10968, 2020.
- [25] H. Wang *et al.*, "Transitioning to physics-of-failure as a reliability driver in power electronics," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 2, no. 1, pp. 97–114, 2013.
- [26] O. Brand, "Comprehensive Microsystems (1.15 - Packaging)," in *Comprehensive Microsystems*, Y. B. Gianchandani, O. Tabata, and H. Zappe, Eds., Oxford: Elsevier, 2008, pp. 431–463. doi: 10.1016/B978-044452190-3.00019-7.
- [27] STMicroelectronics. [Online]. Available: <https://datasheetspdf.com/pdf-file/118030/STMicroelectronics/BUV298V/1>. [Accessed: Apr. 20, 2023].
- [28] "Efficient Power Conversion Corporation, 'Designing PCB Footprint for eGaN FETs & ICs,' Application Note AN008, 2019. [Online]. Available: <https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/application-notes/How2AppNote008%20-%20Designing%20PCB%20Footprint%20eGaN%20FETs%20ICs.pdf>. [Accessed: Apr. 20, 2023]."
- [29] A. Canal Marques, J.-M. Cabrera, and C. de Fraga Malfatti, "Printed circuit boards: A review on the perspective of sustainability," *Journal of Environmental Management*, vol. 131, pp. 298–306, Dec. 2013, doi: 10.1016/j.jenvman.2013.10.003.