

# Améliorer la réparabilité des systèmes techniques, une proposition méthodologique basée sur la documentation collaborative - Exemple/cas d'un convertisseur de puissance open source

Jean ALINEI<sup>1,2</sup>, Guillaume ARTHAUD<sup>1,2</sup>, Luiz VILLA<sup>1,2</sup>, Antonio ORGIU<sup>1,3</sup>, Sahar KARAANI<sup>4</sup>, Claude BARON<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, <sup>2</sup>Université Paul Sabatier, <sup>3</sup>INSA Toulouse, Toulouse, France

<sup>4</sup>ISAE-Supméca, Saint-Ouen

**RÉSUMÉ** - Cet article présente une méthodologie qui permet d'améliorer la réparabilité des systèmes techniques, en prenant pour exemple le cas d'un convertisseur de puissance. La mise en place d'une documentation collaborative et interactive est présentée. Cet outil permet de suivre chaque convertisseur tout au long de sa durée de vie opérationnelle et permet d'agrégéer le retour d'expérience acquis sur le terrain pour en faire bénéficier aux utilisateurs tout en favorisant l'amélioration des prochaines générations de produits. L'article montre par ce cas d'étude comment l'open source hardware, combiné à une documentation appropriée, permet d'augmenter la maintenabilité et la réparabilité de certains systèmes techniques complexes que sont les convertisseurs de puissance.

**Mots-clés**— *Open Source Hardware, Écoconception, Réparabilité, Analyse du cycle de vie, Gestion des déchets, Durabilité, Electronique de puissance.*

## 1. INTRODUCTION

Rendre la technologie plus soutenable nécessite de prendre en considération de façon holistique l'intégralité du cycle de vie d'un système technique, recouvrant les phases de développement (jusqu'à la réalisation d'un prototype), la production, d'exploitation puis de retrait de service [1]. En électronique de puissance, cela implique qu'un convertisseur de puissance, optimisé du point de vue de ses performances et de ses capacités d'intégration, ne constituera pas nécessairement le meilleur choix technologique pour minimiser l'énergie grise, ou l'intégralité de son coût énergétique au cours de son cycle de vie [2].

Les choix réalisés à l'étape de conception vont influer sur les pertes énergétiques liées à la phase d'exploitation, sur la réparabilité et sur la fin de vie du système. Par conséquent, un convertisseur optimisé pour son efficacité énergétique peut mettre en jeu des composants innovants qui seront moins matures, moins standardisés donc moins facile à remplacer en cas de défaillance. L'architecture globale du convertisseur innovant comportera un risque de défaillance plus important inhérent au manque de retour d'expérience. Ainsi faire le pari des technologies modernes pour augmenter l'efficacité du convertisseur peut diminuer les pertes d'exploitation au risque de ne pas maximiser la durée de vie du convertisseur. Un moyen de palier à ce problème est d'intégrer d'autres critères pendant la phase de conception.

L'analyse de cycle de vie (ACV) est un moyen quantitatif d'intégrer d'autres critères pendant la phase de conception d'un dispositif. Le point faible de cette méthode émane de sa complexité et de l'absence de bases de données ouvertes renseignant les composants électroniques utilisés par le système. Il est donc important de trouver une méthodologie actionnable et simple pour intégrer des aspects non-techniques lors des phases de conception en électronique de puissance.

Un aspect non-technique important dans le cycle de vie du dispositif est son rapport à la propriété intellectuelle. Ici nous pouvons distinguer deux approches, une en *closed-source* et l'autre en *open-source*. Dans le premier cas, la gestion de toute information et documentation est internalisée par l'entité, souvent une entreprise de droit privé, qui distribue la technologie. Le deuxième cas comprend des dispositifs où la gestion de l'information et la documentation sont décentralisés et reposent sur une communauté d'usagers. Cet article se consacrera au deuxième type de propriété intellectuelle.

Ainsi, un système disponible en *open source* permet de penser des technologies sur le temps long ainsi qu'une réutilisabilité accrue [1]. La notion de technologie open source appropriée (Open Source Appropriate Technology) inclue l'accèsibilité à la technologie et la notion de décentralisation d'accès, de développement et de contribution en vue de créer des dispositifs soutenables, durables et dont la fabrication est décentralisée [3].

Cet article propose d'analyser l'utilisation des aspects non-techniques inhérents à une technologie distribuée en *open-source* dans la conception des convertisseurs de puissance dans le but de minimiser son énergie grise ou maximiser sa durée de vie (ou vies). Pour ce faire, cet article propose une analyse croisée de l'*open-source* et de l'*obsolescence*. À partir de cette analyse, des méthodes actionnables seront décrites et appliquées à un cas d'étude. Le cas d'étude sera le convertisseur de puissance issu du projet OwnTech, dont l'objectif est la conception et la réalisation d'un convertisseur de puissance dont le hardware est *open source*, modulaire et flexible, conçu pour satisfaire différents cas d'usage.

L'état de l'art de l'*open-source* hardware et de l'*obsolescence* est présenté en section deux, suivi d'une présentation de l'étude de cas à partir du projet OwnTech portant

sur la réalisation d'un convertisseur modulaire et flexible open source. Cette étude de cas élucide un besoin documentaire manquant du projet en question. Enfin, la section quatre présente l'innovation documentaire qui répond au besoin du projet discute de l'intérêt de la solution proposée pour augmenter la durée de vie des dispositifs.

## 2. ÉTAT DE L'ART

L'état de l'art sera divisé en deux parties. La première traitera de l'obsolescence. Son objectif est d'en définir les principales facettes. La deuxième partie définira l'open-source hardware et ses principales composantes documentaires.

### 2.1. L'obsolescence en électronique de puissance

Un convertisseur de puissance, en tant que sous-ensemble au sein d'un système, assure la disponibilité énergétique à tout instant. Or, la disponibilité énergétique est très souvent critique à la réalisation de la fonction du système global. Ainsi, une indisponibilité ou une panne du convertisseur de puissance représente une gêne sensible. La littérature scientifique s'intéresse particulièrement à l'estimation de la durée de vie résiduelle d'un convertisseur afin d'estimer au mieux le temps restant avant une maintenance planifiée[4]. Une partie de cet effort de recherche est spécifiquement lié aux composants connus pour leur vieillissement, nommément les condensateurs électrolytiques[5].

La nécessité de maintenance d'un convertisseur de puissance provient de la durée de vie limitée des composants qui le composent ou d'une défaillance liée à l'exploitation ou à l'environnement. Au sein d'un système, la réponse apportée au vieillissement du sous-ensemble convertisseur conduit de manière générale au remplacement de celui-ci sans tenter d'en prolonger la durée de vie par une action de maintenance prédictive ou curative[2]. Comme tout dispositif technique, ce choix du remplacement, au détriment de la maintenance ou de la réparation, dépend de plusieurs facteurs regroupés sous un terme clé, l'obsolescence[4].

Les causes de l'obsolescence d'un dispositif technique sont plurielles. La figure 1 illustre les principaux types d'obsolescence documentées dans la littérature.

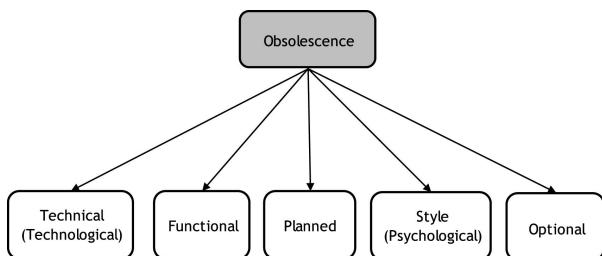


Figure 1 Les différents types d'obsolescences [4]

La disparition des pièces de rechange, d'un fabricant, ou des compétences est un cas classique d'obsolescence technique qui empêche l'extension de la durée de vie d'un produit dont la fonction ou les performances ne sont pas remises en cause. [6] En électronique de puissance un convertisseur est le plus souvent assemblé à partir d'un circuit imprimé et de composants COTS (Commercially off-the-shelf)[2]. Remplacer un composant vieillissant ou défectueux implique :

1. D'identifier les composants en question
2. De maîtriser le savoir faire associé au désassemblage des composants cibles et celui associé au remontage des composants de remplacement.

3. De pouvoir approvisionner un composant de même référence ou un équivalent compatible avec la conception initiale
4. En cas d'impossibilité d'approvisionnement la complexité de la maintenance ou de la réparation augmente sensiblement, il faut alors remplacer le groupe fonctionnel vieillissant ou défectueux. Se pose alors la question de la certification du convertisseur modifié par rapport à sa conception d'origine.

L'obsolescence fonctionnelle n'est pas liée à l'incapacité du dispositif à remplir sa fonction initiale mais plutôt à l'incapacité du convertisseur à s'adapter à l'évolution du contexte ou du besoin de l'utilisateur [4]. L'évolutivité fonctionnelle en électronique de puissance dépend des charges et/ou des sources d'énergie connectées au convertisseur. Une évolution de la fonction du système global implique une évolution du sous-ensemble convertisseur.

En pratique, l'évolution du système global peut être associé à l'accroissement de la demande énergétique. Par exemple, le remplacement des charges ou la connexion des nouvelles sources induit un changement d'échelle et nécessite un nouveau système de conversion. Changer une partie du système peut créer un problème d'interface informationnelle, avec souvent le besoin de reparamétriser le flux de données entre sous-systèmes. Un problème de connectique peut également apparaître.

L'obsolescence fonctionnelle peut également venir d'un besoin accru de performance. La performance est le plus souvent donnée par le rendement et la compacité, mesurée en densité de puissance volumique et ou massique. Ces derniers critères s'appliquent particulièrement pour les applicatifs embarqués.

L'obsolescence programmée est définie en tant que « le recours à des techniques, y compris logicielles, par lesquelles le responsable de la mise sur le marché d'un produit vise à en réduire délibérément la durée de vie » et interdite par le Code de la consommation[7].

En électronique de puissance, l'obsolescence psychologique peut être liée à la densité volumique et massique des convertisseurs. Pour exemple, l'appréciation de la finesse et du poids d'un chargeur d'ordinateur entre directement en compte dans la valeur d'estime perçue de l'objet.

Enfin, l'obsolescence liée à l'absence d'amélioration du produit peut se traduire dans notre cas d'étude par l'absence d'évolution logicielle permettant de mieux interagir avec le dispositif.

### 2.2. L'open-source hardware

Une licence Open Source Hardware (OSH) donne le droit à quiconque d'étudier, de modifier, de fabriquer et de vendre l'objet protégé. La licence décrit les aspects légaux associés à ces droits. Des standards documentaires complètent la licence en définissant le contenu que doit contenir la documentation afin de permettre l'exercice des droits par l'utilisateur.

La norme DIN3105-1 est consacrée à la documentation dans des projets open-source hardware. Cette norme pose trois points d'attention lors de la création de cette documentation[7] :

1. la documentation d'un produit OSH doit être adaptée au type de produit (la documentation d'un objet mécanique diffère de celle d'un objet électronique)
2. la documentation doit être adaptée à l'audience (le manuel d'utilisation ne contient pas la même

- information que celle nécessaire pour fabriquer le dispositif)
3. la documentation doit **couvrir tout le cycle de vie du produit** (elle doit couvrir l'utilisation, la maintenance, la mise à jour et le recyclage et non uniquement la phase de fabrication.) [1]

L'accessibilité de l'information est un autre aspect important de la documentation des projets open source qui vient compléter cette norme. Des travaux récents adressent la problématique récurrente des projets open source hardware liée à l'agrégation de la documentation produite tout au long du cycle de développement et de la vie du produit. Ces travaux portent notamment sur quelles métadonnées associer à l'information, et comment faciliter sa traduction. [8][9]

La modularité et de l'interopérabilité des dispositifs sont considérées comme étant des caractéristiques inhérentes à l'OSH par la littérature. Il est cependant très difficile de les quantifier de façon générique ce qui a poussé certains auteurs à ne pas l'inclure dans la définition stricte de l'OSH. [1]

Un concept important à cette étude et complémentaire à l'open source est la notion de technologie appropriée. Apparu dans les années 70, ce terme a été remis au goût du jour par les moyens modernes de collaboration et par le mouvement open source hardware. Il désigne une technologie conçue pour être facilement utilisable en considérant les ressources, les outils et les compétences disponibles localement. Les technologies appropriées doivent considérer dès la conception les aspects environnementaux, culturels, économiques et éducatifs liés au déploiement d'une technologie pour une communauté locale donnée. [8]

Sur la base de cet état de l'art il est discuté par la suite de la réalisation d'un convertisseur modulaire OSH et de son positionnement par rapport à cet état de l'art. Au travers de ce cas d'étude nous verrons quelles solutions peuvent être apportées par une démarche documentaire OSH en vue d'adresser les différents types d'obsolescence de ces dispositifs techniques.

### 3. LE PROJET OWNTECH - UN CONVERTISSEUR MODULAIRE ET FLEXIBLE POUR PERMETTRE LA RÉUTILISATION ET LE SURCYCLAGE

Le projet OwnTech vise à concevoir un convertisseur modulaire reprogrammable optimisé pour sa flexibilité applicative et sa scalabilité de puissance. L'objectif visé est de pouvoir agréger une communauté de contributeur autour d'une base matérielle standard pouvant être adaptée au besoin de chaque utilisateur afin de faciliter le prototypage rapide du convertisseur de puissance. À l'instar de la révolution opérée par Arduino ou Raspberry Pi dans l'IoT, ce projet espère démocratiser l'accès à l'électronique de puissance à l'aide d'un dispositif multifonction entièrement modifiable.

Le convertisseur de puissance OSH étudié est constitué d'une structure matérielle et logicielle. D'un point de vue hardware, le convertisseur comporte cinq sous-ensembles fonctionnels, illustrés par la Figure 1 et détaillés ci-dessous. Chaque composant du convertisseur est rattaché à un de ces sous-ensembles et cette analyse fonctionnelle interne sommaire permet d'appréhender le fonctionnement global du convertisseur.

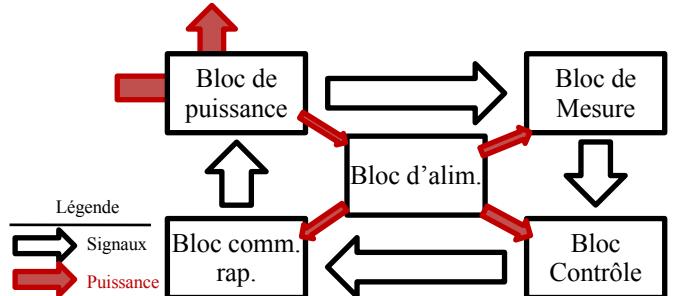


Figure 2 - Les 5 blocs d'un convertisseur de puissance

- **Bloc de puissance** : permet de faire circuler l'énergie entre entrées/sorties par une structure active et un filtre associé ;
- **Bloc de mesures** : embarque différents instruments de mesure permettant d'observer les entrées/sorties ;
- **Bloc de commande rapprochée** : adapte les signaux du microcontrôleur et gère la commutation des éléments actifs qui contrôlent le flux électrique ;
- **Bloc d'alimentation** : récupère une partie de l'énergie et l'adapte pour faire fonctionner l'ensemble du système ;
- **Bloc contrôle** : contient l'électronique numérique nécessaire au contrôle des flux de puissance en temps réel et la communication avec l'extérieur

Les cinq types d'obsolescences se déclinent différemment pour chaque sous-ensemble fonctionnel du convertisseur. Les cinq sous sections suivantes vont adresser comment chaque aspect de l'obsolescence a été traité par le projet OwnTech.

#### 3.1. Obsolescence fonctionnelle - Flexibilité applicative, scalabilité de puissance et ré-utilisabilité numérique

Les figures 1 à 3 montrent la capacité du convertisseur OSH proposé à opérer dans plusieurs conditions d'utilisation et sa réutilisabilité pour suivre l'évolution du besoin.

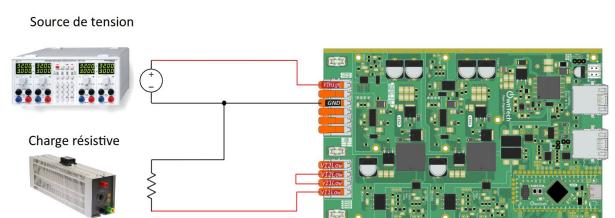


Figure 3 - Schéma d'une carte TWIST en connexion Buck

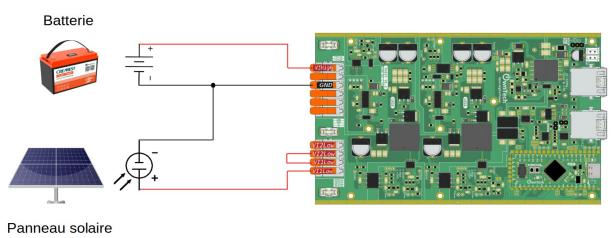


Figure 4 - Schéma d'une carte TWIST en connexion Boost

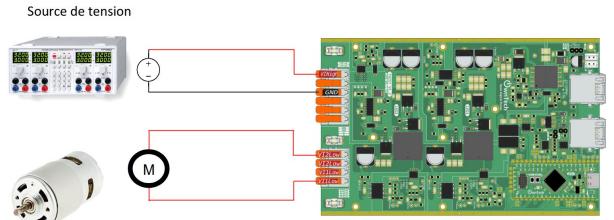


Figure 5 - Schéma d'une carte TWIST en connexion onduleur monophasé

Le même matériel peut être utilisé pour des cas applicatifs liés aux batteries, au photovoltaïque isolé et à la mobilité douce. Il peut aussi être associé avec d'autres modules pour suivre l'évolution de la consommation d'énergie.

Le convertisseur OSH peut opérer une scalabilité en puissance pour répondre à une augmentation de la demande. L'objet de cette vérification est de valider la capacité du convertisseur à s'adapter à une évolution fonctionnelle du système global. En cas d'augmentation de la demande, il n'est pas nécessaire de remplacer le convertisseur, l'ajout d'un module complémentaire suffit.

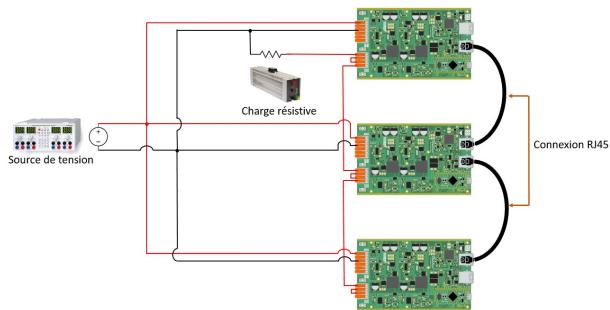


Figure 6 - Schéma de trois cartes OwnTech connectées en parallèle pour augmenter le courant fourni à la charge

Le sous-bloc de contrôle a été séparé des autres 3 sous-blocs par la création d'une carte de contrôle dédiée. La structure logicielle associée à ce sous-bloc a aussi été conçue pour être modulaire, amendable et ré-utilisable. Cette séparation permet une ré-utilisabilité de ce bloc avec d'autres cibles de puissance et une forte flexibilité fonctionnelle.



Figure 7: la Carte Open Source SPIN OwnTech.

### 3.2. Obsolescence liée à l'amélioration du produit - Flux informationnel flexible

L'évolution du système global est prise en compte par la capacité du convertisseur à supporter des interfaces de communication additionnelles. L'intégration matérielle et logicielle du bloc de contrôle du convertisseur permet l'ajout d'un module de connectivité supplémentaire dédié. Cette flexibilité permet de prévenir d'une obsolescence liée au protocole de communication entre le convertisseur et son environnement numérique.

### 3.3. Obsolescence technique - Une maintenance facilitée associée à une documentation étendue

Le choix a été fait de privilégier la réparabilité à l'intégration. Dans cette optique le design utilise uniquement des composants dit COTS. Par ailleurs, les dimensions physiques de l'objet répondent au standard eurocard pour que le boîtier et le dissipateur thermique soit également COTS.

Une difficulté rencontrée lors de la conception a été d'arbitrer entre l'exigence de flexibilité applicative et de modularité en puissance avec la bonne pratique de sélectionner des composants interchangeables disposant de plusieurs références alternatives. En pratique la volonté de lutter contre

l'obsolescence fonctionnelle a exposé le design à un risque d'obsolescence technique plus important. Ce constat peut en partie s'expliquer par l'aspect innovant de la démarche, nécessitant des composants plus performants et moins répandus.

La documentation OSH du convertisseur porte sur trois disciplines complémentaires nécessaires à la maîtrise du flux électrique :

1. La documentation matérielle
2. La documentation informatique du micrologiciel
3. La documentation liée à l'automatique et au contrôle système

Les objectifs des documents, leur disciplines et publiques associées sont données dans le tableau 1.

Tableau 1 - Documentation disponible

Titre du document	Public	Discp.	Objectif
Note de calcul	Experts	Matér.	Comprendre le dimensionnement des éléments matériels
Caractérisation du vieillissement	Experts	Matér.	Disposer d'un retour d'expérience sur le produit pour pouvoir l'améliorer collectivement
Schématique	Experts	Matér.	Comprendre le fonctionnement avancé du produit. Contribuer à l'amélioration du matériel
Routage	Experts	Matér.	Comprendre le fonctionnement avancé du produit. Contribuer à l'amélioration du matériel
Gerbers	Fabricants	Matér.	Répliquer le convertisseur
BOM	Intermédiaire	Matér.	Quels sont les composants constituant le convertisseur
Notice d'assemblage	Fabricants	Matér.	Répliquer le convertisseur
Jumeau numérique	Experts	Autom.	Simuler le fonctionnement du convertisseur
Sources logicielles	Experts	Inform.	Contribuer à l'outil
Explication logiciel	Intermédiaire	Inform.	Comment se servir de l'API logicielle
Datasheet	Débutant	Tous	Connaître les capacités opérationnelles du produit
Explication fonctionnelle	Débutant	Tous	Comment fonctionne le convertisseur
Tutoriels	Débutant	Tous	Comment se servir du convertisseur
Exemples	Intermédiaire	Tous	Comment adapter le convertisseur à son usage

En termes de cycle de vie du produit, la documentation couvre bien des aspects liés à la fabrication et la mise en opération du dispositif. Les aspects liés à la maintenance et opération sont encore manquants.

### 4. UNE DOCUMENTATION INTERACTIVE POUR AUGMENTER LA RÉPARABILITÉ

Pour répondre au besoin d'une documentation qui puisse suivre le cycle de vie du dispositif soulevé par l'état de l'art cet article propose par la suite une documentation interactive dédiée au suivi, à la maintenance prédictive, à réparation et au désassemblage du convertisseur.

#### 4.1. Fonctionnement

La documentation proposée se base sur un outil graphique pour simplifier le placement des composants appelé « Interactive BOM ». Il s'agit d'un plugin libre associé au logiciel de conception électrique libre KiCad. Cet outil numérique permet à l'utilisateur de visualiser les composants tels que montés sur le PCB et d'accéder en un clic à leur référence. Cela permet de commander un composant de

remplacement identique ou compatible avec celui câblé lors de la fabrication de la carte électronique [10].

L'accès à la documentation se fait via un QR code apposé au dos de chaque carte comme montre la figure 8. Le scan du code ou l'entrée manuelle d'un identifiant sur la plateforme distante déclenche l'affichage de la page documentaire associée au numéro de produit. Chaque produit dispose de sa fiche de suivi.



Figure 8 - QR code d'accès à la documentation interactive

Nous avons modifié cet outil de l'aide au placement pour permettre à l'utilisateur de saisir les modifications apportées au convertisseur et ainsi réaliser un carnet de santé des opérations de maintenance menées sur le dispositif. Ces informations sont centralisées et sont agrégées sur le serveur distant.

1. Un groupement par fonction permet en un clic de visualiser quel est le rôle de chaque groupe de composants. Cela permet d'obtenir visuellement la répartition fonctionnelle physique du convertisseur. Un exemple de ce découpage fonctionnel est donné dans la figure 9.
2. Un groupement plus fin par sous fonction permet d'identifier un groupement de composant qu'il faudrait remplacer en cas d'indisponibilité d'un composant de rechange.
3. Une heatmap des défauts rencontrés permet de visualiser rapidement les composants les plus à même de générer une panne. La probabilité de défaillance est calculée grâce à l'ensemble des défauts observés sur le parc. La démarche de traque du défaut est ainsi grandement simplifiée. Un exemple de cette heatmap est illustré par la figure 10.
4. Un groupement par score ou critère permet de mettre en surbrillance chaque composant partageant une caractéristique commune. Des métadonnées peuvent être ajoutées à chaque composant permettant de nouvelle façon d'afficher des groupements de composants. Nous avons expérimenté plusieurs groupements
  - a. Par concentration métallique, pour permettre de visualiser quels composants comportent la plus forte teneur en élément chimique rare ou critique.
  - b. Par score carbone, pour permettre de visualiser quel composant du système participe le plus au budget carbone lié à la fabrication du convertisseur

Un menu interactif permet à l'utilisateur de soumettre des informations sur son produit. Chaque composant peut faire l'objet d'une soumission de l'utilisateur. Dans cette preuve de concept trois type d'informations peuvent être ajoutées par l'utilisateur :

1. Ce composant a fait l'objet d'une maintenance préventive, à telle date avec telle référence de remplacement

2. Ce composant a fait l'objet d'une maintenance curative suite à un défaut, à telle date avec telle référence de remplacement.
3. Candidat de référence de remplacement pour ce composant.

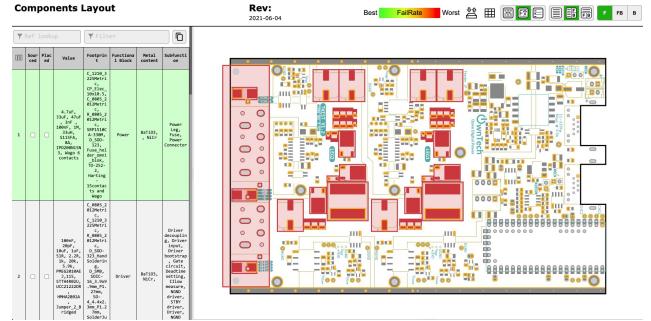


Figure 9 - Capture d'écran montrant les composants du groupement fonctionnel « Bloc Puissance » soulignés en rouge

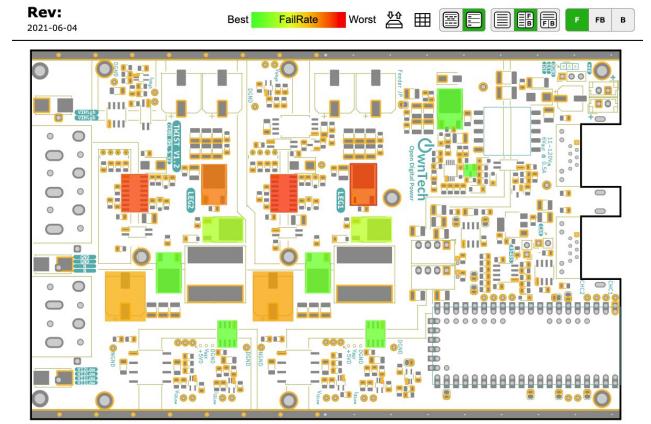


Figure 10 - Heatmap proposée avec les principaux défauts d'un circuit imprimé

#### 4.2. Discussion

La preuve de concept d'une documentation ouverte dédiée au suivi tout au long de la vie des convertisseurs de puissance issues du projet OwnTech présentée dans cet article montre comment l'open source peut être mobilisé pour apporter une réponse concrète aux différentes facettes de l'obsolescence.

Pour l'obsolescence technique, la représentation interactive des blocs fonctionnels permet de discriminer l'origine d'un défaut et de simplifier la démarche d'explicabilité. En parallèle l'affichage du bloc fonctionnel permet d'évaluer la complexité associée au remplacement d'un composant dont l'approvisionnement est compromis. L'aspect collaboratif de la documentation interactive proposée permet d'afficher les composants les plus à même de présenter des défauts permettant de proposer des améliorations qui pourront venir soit du concepteur initial soit d'une contribution communautaire grâce à la collaboration rendue possible par une forge numérique [12]. Ainsi le droit à l'étude et à la modification du système offerte par l'OSH couplé à la mise en place d'une documentation respectant la norme DIN3105-1 permet à l'utilisateur de trouver l'origine de la panne sans procéder à une phase de rétro-ingénierie. Ce nouvel outil couvre bien le cycle de vie du produit, permettant de garder une trace des modifications effectuées sur chaque dispositif conformément au standard. Enfin, la problématique associée à la documentation du savoir faire associé au démontage et au ré-assemblage n'est pas adressée par cette preuve de concept mais un riche contenu est d'ores et déjà disponible en accès libre sur cette thématique.

Tout au long du cycle de vie, une multitude d'acteurs industriels pourront proposer du service sous forme de mise à jour, de plugin ou de module interopérable avec le convertisseur OSH, permettant de lutter contre l'obsolescence optionnelle. La disponibilité de ces ajouts dépendra alors de la capacité du produit à agréger une large communauté, contrairement à un schéma industriel classique où des ajouts éventuels dépendent souvent du fabricant d'origine.

De même, en fin de vie, il sera possible de procéder au désassemblage sélectif du convertisseur, sans être tributaire du fabricant pour obtenir la liste des composants, tel que dans le schéma industriel proposé par [2] ;en effet, il sera possible à tout à chacun de démonter tout ou partie du convertisseur grâce à la liste de composant fournis par le document interactif. De plus, l'ajout de métadonnées associées à la teneur en éléments rares ou critiques permettant de trier les composants désassemblés pour permettre un traitement via des filières spécialisées [5].

## 5. CONCLUSIONS

Le travail proposé montre l'intérêt de concevoir des convertisseurs statiques avec une démarche issue du mouvement OSH ou OSAT. L'intérêt d'une telle démarche est qu'elle peut être combinée à une architecture matérielle et standard pour favoriser la contribution communautaire et limiter le risque d'obsolescence fonctionnelle. Au-delà des considérations techniques, il est montré que la documentation interactive apporte des réponses concrètes à certains verrous liés à l'obsolescence des systèmes techniques.

La documentation OSH permet la contribution externe qui peut prendre la forme d'une amélioration continue de la conception grâce à un système de *peer review* totalement transparent. Nous montrons grâce à l'outil développé que cette contribution peut également porter sur l'intégralité du cycle de vie grâce à l'analyse collective du vieillissement des dispositifs pour favoriser la maintenance de ces dispositifs complexe, soumis aux limites physiques de certains composants.

La démarche méthodologique proposée permet ainsi une réparabilité accrue et facilite le diagnostic des pannes tout en permettant une capitalisation du retour d'expérience pour améliorer la conception.

Des travaux futurs viseront à montrer l'intérêt de la documentation interactive pour mener une analyse de cycle de vie collaborative. Chaque composant peut être ainsi étudié par différents contributeurs, simplifiant la démarche de cette analyse rigoureuse mais complexe. Cela ouvre la perspective d'une amélioration continue décentralisée pensée en termes d'analyse de cycle de vie.

## 6. RÉFÉRENCES

- [1] J. Bonvoisin et al, « Standardisation of Practices in Open Source Hardware », journal of open hardware
- [2] B. Rahmani et al, « Opportunités de la modularité pour l'écoconception de convertisseurs de puissance », Symposium de génie électrique, Novembre 2020.
- [3] K. Gavras et al « Mapping the types of modularity in open-source hardware » Cambridge university press 2021
- [4] M. Mellal « Obsolescence – A review of the literature », Technology in Society
- [5] Thomas, C. (2016). Recyclage des cartes électroniques : un aperçu de l'état de l'art. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, 82, 57-61. <https://doi.org/10.3917/re1.082.0057>
- [6] S. Cangiano, Z. Romano « Ease of repair as a design ideal: A relection on how open source models can support longer lasting ownership of, and care for, technology », in ephemera theory & politics in organization, volume 19(2) p 441-449.
- [7] Article L441-2 de la Loi n° 2021-1485 du 15 novembre 2021 visant à réduire l'empreinte environnementale du numérique en France
- [8] DIN SPIN 3105-1 « requirements for technical documentation »
- [9] M. Wardeh « Open Know-How Specification », 2022
- [10] Interac. BOM <https://github.com/openscopaproject/InteractiveHtmlBom>
- [11] J. Pearce, U. Mushtaq « Overcoming Technical Constraints for Obtaining Sustainable Developement with Open Source Appropriate Technology », IEEE International Conference on Science and Technology for Humanity (TIC-STH) 2009
- [12] CERN OHL V2 « CERN Open Hardware Licence version 2 »
- [13] Xue, R., Baron, C., & Esteban, P. (2017). Optimising product development in industry by alignment of the ISO/IEC 15288 systems engineering standard and the PMBoK guide. International Journal of Product Development, 22(1), pp. 65-80.
- [14] OwnTech Foundation - « TWIST OSH converter design files» - <https://github.com/owntech-foundation/TWIST>
- [15] Heatmap interactive - <https://devices.owntech.org/>
- [16] C. Barron « [Garantissez la pérennité de l'industrialisation du système embarqué](#) », openclassroom MOOC INSA