

RAPPORT DE PROJET DE FIN D'ETUDES

GRENOBLE INP Esisar 2022/2023

Titre du projet

Réparabilité et modularité dans l'électronique de puissance, vers le meilleur scénario pour la circularité.

Nom et adresse de l'entreprise

G2Elab
Bâtiment GreEn-ER
21 avenue des Martyrs
38031 Grenoble

Nom et prénom de l'étudiant

Chabanne Simon

Dates du stage	Du 1 ^{er} février au 28 juillet 2023
Spécialité	EIS – ESE
Tuteur Entreprise	Jean-Christophe Crébier
Tuteur ESISAR	Darine Kaddour

RAPPORT DE PROJET DE FIN D'ETUDES

GRENOBLE INP Esisar 2022/2023

Mots clés :

Réparabilité, modularité, électronique de puissance, indicateurs, diagnostic, circularité, soutenabilité

Résumé :

Mon projet de fin d'étude s'est déroulé au sein de l'équipe électronique de puissance du laboratoire G2ELAB de Grenoble. Ma mission durant ces 6 mois de stage était d'explorer des pistes pour permettre aux convertisseurs d'électronique de puissance d'être plus facilement réparable. Cela revenait donc à :

- D'abord à mieux connaître les pratiques et méthodes utilisées pour la réparation, notamment pour identifier les freins à la réparation de ces appareils. La mission nécessitait donc d'aller rencontrer et documenter les pratiques de réparateurs de différents milieux : académiques, industriels, professionnels indépendants, associatifs, particuliers.
- Ensuite de chercher des pistes pour que les enjeux de réparabilité soient intégrés dès la conception des appareils d'électronique de puissance.

J'ai donc travaillé à la création de 3 livrables : un guide de recommandation pour réparer des appareils d'électronique de puissance, un guide pour intégrer les enjeux de réparabilité à la conception d'appareils d'électronique de puissance, un indicateur de réparabilité adapté aux appareils d'électronique de puissance.

Pour concevoir ces guides et confirmer leur pertinence, des applications pratiques et des expériences ont été effectuées sur un convertisseur développé par le laboratoire, appelé cellule standard de conversion.

Keywords :

Repairability, modularity, power electronics, indicator, diagnostics, circularity, sustainability

Abstract :

My end-of-study project took place within the power electronics team of the G2ELAB laboratory in Grenoble. My mission during these 6 months of internship was to explore ways to allow power electronics converters to be more easily repairable. So, it came down to:

- First, to better understand the practices and methods used for repair, in particular to identify the brakes on the repair of these devices. The mission therefore required meeting and documenting the practices of repairers from different backgrounds: academics, industrialists, independent professionals, associations, individuals.
- Then to look for ways to ensure that repairability issues are integrated from the design of power electronics devices.

I worked on creating 3 deliverables: a recommendation guide for repairing power electronics devices, a guide for integrating repairability issues into the design of power electronics devices, and a repairability indicator suitable for power electronic devices.

To design these guides and confirm their relevance, practical applications and experiments were carried out on a converter developed by the laboratory, called a standard conversion cell.

TABLE DES MATIERES

Introduction	4
Contexte et enjeux stratégiques du projet au sein du laboratoire	5
Cahier des charges	6
Présentation du déroulement et de l'avancement du projet	8
Cadrage et planning, méthodologie	8
État de l'art de la littérature scientifique existante	11
Quels sont les pratiques & méthodes de réparation en électronique ? En électronique de puissance ?	13
Recherche documentaire technique sur l'électronique de puissance et la réparation	13
Enquête de terrain	17
Synthèse technique dans un guide de Conseils & recommandation pour la réparation	19
Synthèse non technique dans un rapport sur l'état des lieux et les perspectives du secteur de la réparation à Grenoble	19
Comment concevoir réparable en électronique de puissance ?	20
Etablir des recommandations pour la réparabilité	20
Evaluer la réparabilité d'un appareil électronique dès la conception	25
Validation des résultats sur un cas d'étude, la cellule de conversion standard du G2ELAB	30
Bilan du projet	40
Coût global de votre projet	40
Résultats obtenus en regard du cahier des charges	40
Impact du projet pour le laboratoire	42
Conclusion	43
Bibliographie	44
Acronymes et lexique	45
Annexes	47

L'électronique, comme de nombreux secteurs industriels, se voit de plus en plus confrontée à des enjeux environnementaux. En effet, cette industrie est pointée comme étant particulièrement consommatrice en matières premières (et notamment en métaux critiques), en eau et en produits chimiques pour la conception de ses composants et des appareils de manière générale (SystExt, 2021) (Roussilhe, Eau et puces électroniques, l'avenir climatique et industriel de Taiwan, s.d.) (Roussilhe, Explication sur l'empreinte environnementale du numérique, s.d.). De plus, ce secteur connaît une forte croissance ces dernières années, le nombre d'objets électroniques nous entourant n'a jamais été aussi haut, mais le nombre de déchets électroniques lui aussi est en hausse. L'électronique se voit donc confronté à un problème structurel à résoudre si l'on souhaite qu'il respecte les limites planétaires.

Les enjeux environnementaux font partie de mes sujets de préoccupation majeurs. Cela s'est traduit par des engagements collectifs durant ma scolarité à l'ESISAR, puis j'ai choisi d'effectuer une césure pour découvrir des lieux et collectifs s'engageant sur ces sujets, et pour effectuer un service civique autour des enjeux d'autonomie énergétique dans le petit éolien. Ces considérations m'ont aussi poussé à vouloir compléter mon parcours d'électronique en réalisant un semestre au sein du *Parcours pour une Ingénierie Sobre Techniquement et Ecologiquement Soutenable* à l'ENSE3, ainsi qu'un double diplôme dans le master *Transitions Ecologiques* de l'IEP de Grenoble. Ce parcours et ces motivations ont naturellement orienté mon projet de fin d'étude d'ingénieur en électronique dans une direction qui lierait soutenabilité et électronique. Mon service civique m'ayant familiarisé avec des appareils d'électronique de puissance tout en étant confronté à leur irréparabilité, et mon projet industriel portant déjà sur des enjeux d'énergie (à très basse puissance), ce secteur m'était particulièrement attrayant.

Depuis plusieurs années, les laboratoires de recherche en électronique de puissance tendent à se saisir de ces enjeux, en s'intéressant notamment à l'impact de leurs convertisseurs, aux manières de les rendre plus efficaces, mais aussi aux manières d'allonger leurs durées de vie, ou, à défaut, de pouvoir revaloriser un maximum les pièces matériaux qu'ils contiennent, dans une démarche de circularité. C'est typiquement le cas du projet VIVAE au sein de l'équipe électronique de puissance du G2Elab, qui cherche à lever des verrous techniques empêchant des convertisseurs d'emprunter un scénario de circularité (réusage, réparation, reconditionnement, récupération, recyclage...), notamment grâce à la modularité. Leur proposition d'effectuer un travail de recherche explorant le scénario de la réparation intitulée « Modularité dans l'électronique de puissance : vers le meilleur scénario pour la circularité » et son contenu, particulièrement orienté sur les questions de comment concevoir réparable en électronique de puissance m'a particulièrement motivé.

Ce document décrit le déroulé de ce projet de fin d'étude de 6 mois et les différents résultats qui en sont sortis. Il s'appuie sur de nombreuses études et documents, listés en annexe. Un lexique en fin de document détaille les termes et acronymes techniques utilisés.

Le G2Elab est un laboratoire de génie électrique à Grenoble, comportant une équipe de recherche en électronique de puissance. Le laboratoire intègre de plus en plus les enjeux écologiques dans une partie de ses projets, en cherchant notamment à étudier la compatibilité des produits développés avec l'environnement, au travers de méthodes comme l'analyse de cycle de vie.

En interne, les enjeux environnementaux sont également pensés. Le Plan climat-biodiversité et transition écologique de l'Enseignement supérieur et de la Recherche (2022) est étudié et décliné au sein du laboratoire par une démarche DDRS-QVT (développement durable et responsabilité social des entreprise - qualité de vie au travail), portée par un collectif du même nom, au travers de bilan carbone du laboratoire par exemple, ou de travail autour du recyclage. Si l'ensemble des membres du laboratoire ne se sent peut-être pas concerné de la même manière par les enjeux écologiques et sociaux, c'est en tout cas un sujet de discussion récurrent et pris au sérieux, confortant certains choix techniques dans les recherches et la vie du laboratoire.

Depuis septembre 2021, le G2Elab est membre du projet ANR VIVAE¹, collaboration entre 5 partenaires industriels et académiques : EATON, OPOWER, l'ENSAM-I2M (Bordeaux), le G-SCOP et le G2Elab, visant à **étudier la circularité dans le domaine de l'électronique de puissance**. Le projet dure 4 ans et a reçu 580 567 euros d'aide de l'ANR.

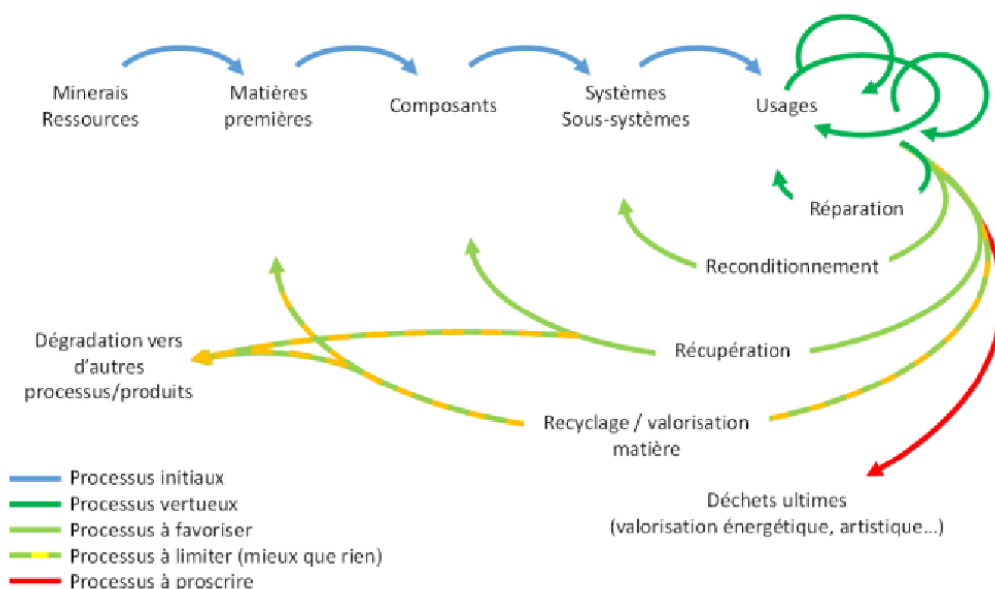


Figure 1: Différentes boucles d'économie circulaire possibles (VIVAE)

L'axe développé au sein du projet VIVAE est celui de la modularité, en proposant un convertisseur formé de sous-ensembles standardisés, pour faciliter la maintenance, le désassemblage, la réparation, et le réusage. L'objectif est de développer des méthodes permettant d'intégrer les enjeux de circularité dès la conception, et permettant d'évaluer la valeur résiduelle d'un produit à la fin de son premier usage.

Mon stage a été créé pour servir ce projet VIVAE en réalisant un travail préliminaire d'exploration des possibilités proposées par un scénario de réparation des appareils d'électronique de puissance. Ainsi, plus qu'une démarche RSE, mon stage fait partie d'un choix stratégique fait par leur laboratoire d'orientation de recherche dans un domaine autour des enjeux environnementaux.

¹ <https://anr.fr/Projet-ANR-21-CE10-0010>

Au départ de mon stage, ma fiche mission décrivait le projet comme ceci :

*« Les principaux objectifs du projet sont d'**étudier comment améliorer la réparabilité et la circularité** en électronique et plus spécifiquement en électronique de puissance.*

*L'étudiant sera confronté à une pratique réelle sur le terrain. Il **cartographiera les meilleures pratiques et les limites réelles**. A cet effet il contactera des experts ou des institutions reconnues en réparation d'électronique/électronique de puissance, il en interrogera certains. Sur la base des connaissances acquises et avec l'aide de l'équipe, il travaillera sur **des lignes directrices de conception vers la réparabilité**. Des observateurs embarqués, des compteurs d'utilisation, mais aussi des options de modularité et de standardisation seront étudiées.*

*En lien avec l'**indicateur de réparabilité** en place en France, il confrontera sa propre analyse.*

*Le projet est fortement lié à **des études de cas réels**, par exemple avec nos partenaires industriels. »*

Cette première approche du cahier des charges a ensuite été précisée et coconstruite après quelques semaines de stage, fin février.

- L'objectif du stage est alors d'aboutir à trois livrables :
- Un guide d'éco-conception pour une électronique de puissance réparable
- Un guide de réparation en électronique de puissance (notamment les besoins en termes de compétences pour cette réparation)
- Un indice de réparabilité basé sur les recommandations de ces deux guides

Ces livrables seraient l'aboutissement d'un travail d'enquête auprès de réparateurs (associatifs, professionnels ou particuliers) et de travaux à partir de documents issus de la littérature.

On note la présence de deux grandes familles et échelles d'électronique de puissance (EP) : l'EP sur PCB et l'EP sur bus bar (plus grosses échelles de puissances, et conceptions et assemblage plus mécanique), qui créent de fait deux situations bien différentes à la conception et à la réparation, et demanderait à priori un travail distinct. Il faut donc définir si le travail doit être effectué sur les deux types de technologies (et donc de trouver des accès à des informations spécifiques à l'EP bus bar), ou uniquement sur la techno PCB (en considérant le fait que la techno bus bar est plus complexe à étudier du fait de sa gamme de puissance, et son cadre surtout industriel).

Un **cas d'étude** pour mettre en œuvre, développer et valider ces livrables serait l'étude de la cellule standard de conversion (CSC) dual active bridge (DAB), développée par l'équipe du G2Elab pour servir de brique élémentaire de Power Converter Array (PCA), un réseau de convertisseurs assemblés dans une logique matricielle, en parallèle ou en série. On pourrait ainsi identifier des moyens de concevoir la CSC en vue d'une meilleure réparabilité (diagnostic, réparation de la cellule, extraction de la cellule du PCA). Un objectif serait donc d'arriver à des modifications sur le design du produit pour plus de réparabilité.

Tableau 1 : Cahier des charges

Livrable	Attendus
Guide pour une conception d'EP réparable	<i>Comment concevoir pour rendre la réparation accessible à un niveau faible</i> • Ergonomie de lecture, sommaire, etc. • Confrontation aux réalités des pratiques de conception • Différenciation Bus Bar et PCB • Conseils de conception mécaniques quantifiés • Conseils de conception électronique quantifiés • Conseils de documentation pertinente pour aider le diagnostic, le désassemblage/ré-assemblage, la réparation, à trouver les pièces détachées, des ressources et des réparateurs • Méthodes d'évaluation quantitatives (indicateurs) • Bonnes pratiques
Guide de réparation de l'EP	• Différenciation Bus Bar et PCB • Version destinée aux professionnels, version destinée aux particuliers ○ Niveau de qualification requis en fonction des réparations ○ Pratiques de sécurité + sécurité de l'équipement • Explications des grandes familles de circuits pour les particuliers • Méthodes de diagnostic guidées & pannes courantes (Hiérarchisation, pré-diagnostic, composants critiques) • Outils courants
Indicateur de réparabilité adapté à la conception en électronique de puissance	• Différenciation Bus Bar et PCB • Structure similaire à l'indice français/compatibilité • Vocation technique → informer le concepteur • Listes de critères complets et sans intersection • Quantifications précises des critères & méthodes d'évaluation quantitative (au maximum) • Grille de points équilibrée et seuil/niveaux minimum

La méthodologie utilisée pour le travail de recherche de mon stage suit le diagramme suivant.

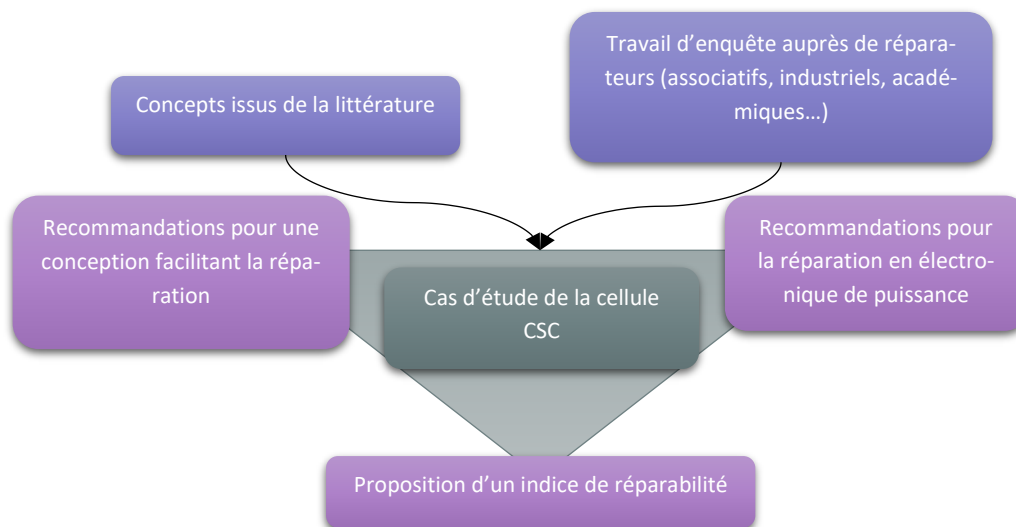


Figure 3 : Diagramme d'organisation du processus de recherche de mon stage

En effet, pour l'ensemble des 3 thématiques, départagées en livrables, qui composent le stage, l'idée était de d'abord se renseigner dans la littérature scientifique pour acquérir des bases théoriques sur ces sujets, puis d'agrémenter ces données par des rencontres de terrain auprès de réparateurs et de concepteurs. Pour valider mais aussi pour aider à construire chacun des livrables, nous nous sommes appuyés sur un cas pratique sur une Cellule Standard de Conversion développée au laboratoire.

Le travail d'enquête étant un travail qui demande du temps, il s'étale sur l'ensemble du stage et peut être mené au fur et à mesure, tandis que les autres tâches sont menées plus ou moins en parallèle. Les applications sur le cas pratique ont principalement lieu à la fin du projet, car les livrables doivent être terminés au préalable. Néanmoins, il est nécessaire de s'appuyer sur le cas pratique pour concevoir les méthodes de création de procédures de diagnostic. Cette étape peut donc arriver plus tôt dans le processus.

L'idée du projet était ainsi de suivre dans les grandes lignes les étapes suivantes :

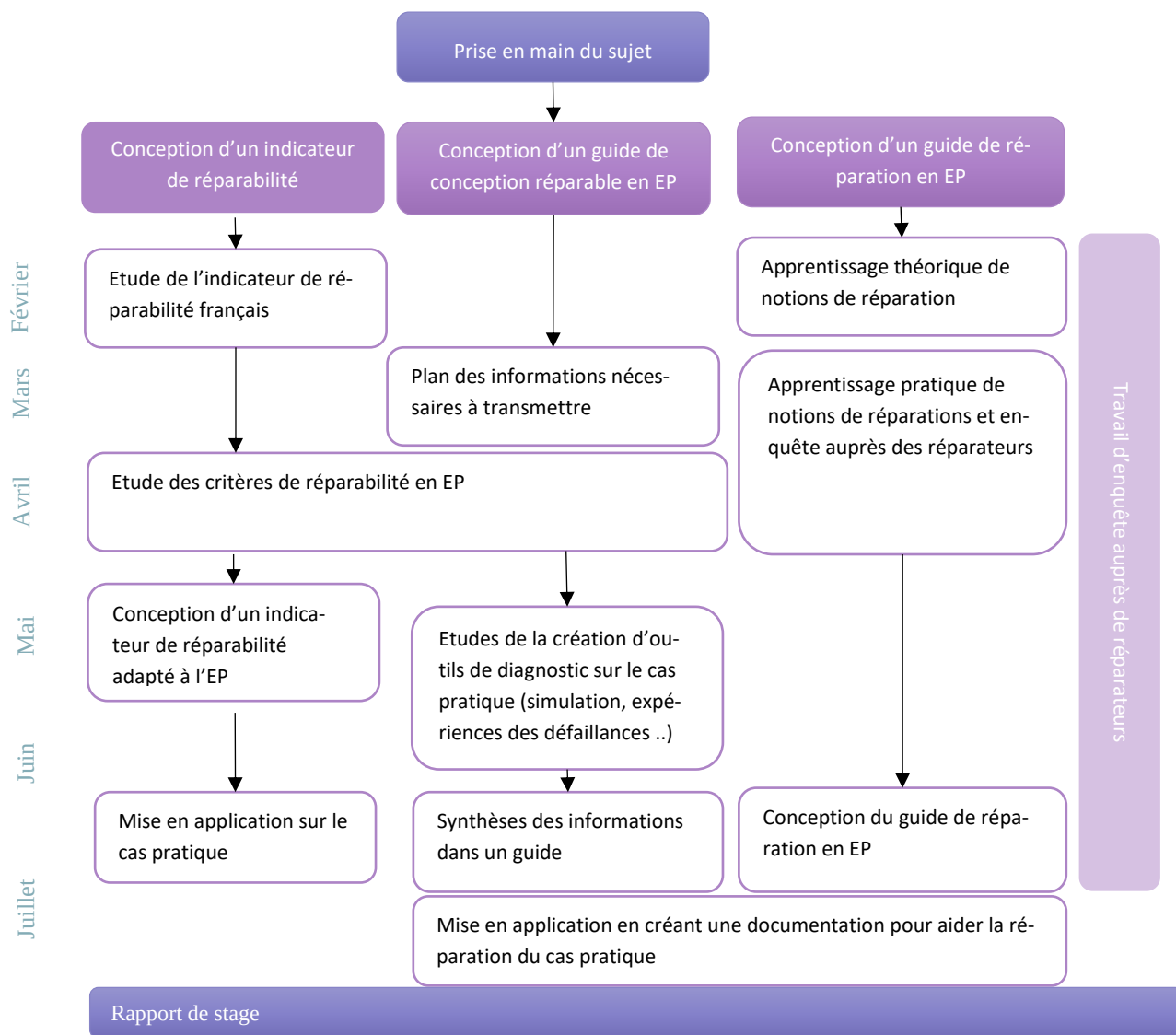


Figure 4 : Planning du projet

Dans la pratique, ce déroulé a été plus ou moins suivi, comme on peut le voir dans le diagramme suivant récapitulant les grandes tâches effectuées chaque mois.

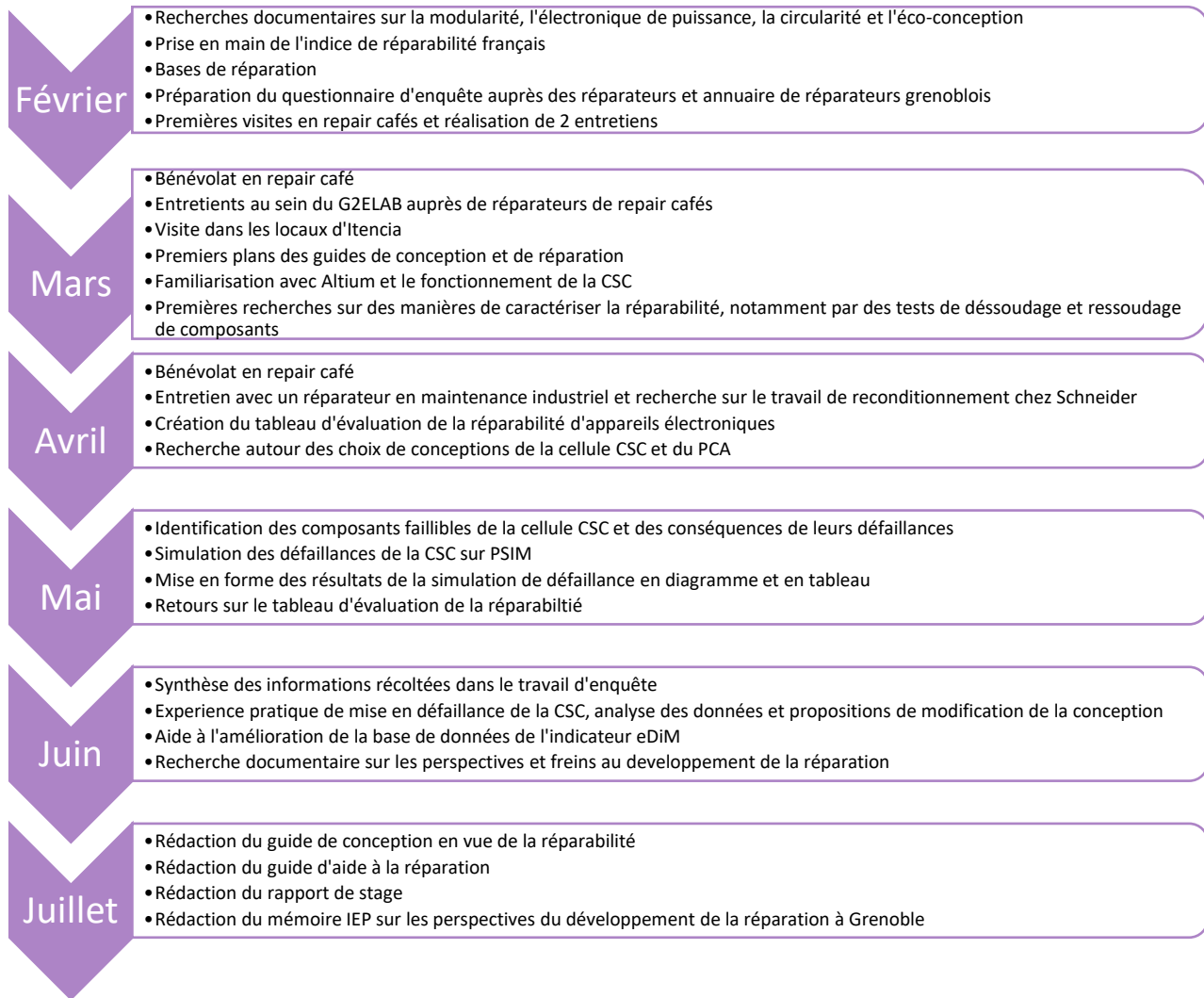


Figure 5 : Déroulé pratique du projet

J'ai été amené à me documenter dans la littérature scientifique tout au long du stage pour mieux comprendre certains concepts et l'état de la recherche sur l'économie circulaire, la modularité, la réparabilité, les indicateurs de réparabilité et les défaillances courantes en électronique de puissance. Cet état de l'art a permis de clarifier, d'orienter et d'étoffer mes recherches et les livrables qui en ont découlé. S'il est ici présenté dans une partie à part entière, les sources qui y sont citées ont servi à appuyer les différents livrables du document, présentés dans les parties suivantes.

Modularité et économie circulaire

Les premières semaines ont particulièrement porté sur la modularité (Yasushi Umeda, 2008) (Gu & Sosale, 1999), sujet de recherche assez spécifique à l'équipe dans laquelle j'évoluais. Cela a été d'une aide importante pour comprendre la vision de l'équipe à ce sujet et comment cela pourrait, sous certaines conditions, appuyer les stratégies d'éco-conception. La modularité peut en effet faciliter la standardisation, et en fonction des regroupements de composant fait sur chaque module, faciliter certaines stratégies de circularité (recyclage, réusage, réparation et maintenance, etc.). (Turkbay, Alix, Lembeye, Perry, & Crebier, 2023).

Réparabilité

Sur le thème de la réparation en électronique de puissance, j'ai été rapidement confronté à la quasi-inexistence de recherches dans ce domaine. En effet, la plupart des écrits au sujet de la réparabilité porte sur ... l'ADN, et les recherches en économie circulaire semblent beaucoup s'orienter sur le recyclage et la revalorisation. Si quelques études portent sur les freins à la réparation, peu d'enjeux techniques sont clairement identifiés et documentés. Cela m'a mené à des thèmes plus généraux portant sur des conseils pour le diagnostic, marquant notamment l'importance des points de tests (Ramamoorthy, 1967), des recommandations généralistes pour une électronique plus verte (Greenpeace report, 2017), et des recommandations particulièrement intéressantes et pratiques pour une conception soutenable en électronique pour augmenter le nombre de cycle de vie d'un produit (Go, Wahab, & Hishamuddin, 2015). Le travail de recherche de ma collègue doctorante Li Fang sur les barrières pour éco-conception en vue de la circularité des convertisseurs d'électronique de puissance (Fang, Lefranc, & Rio, 2023) était aussi un très bon point de départ pour mes recherches plus spécifiques à la réparation.

Indicateurs de réparabilité

Mon travail amenant à la proposition d'un indicateur de réparabilité en électronique de puissance, un état de l'art sur des indicateurs de réparabilité a été effectué, notamment grâce à l'étude comparative *Design Aspects in Repairability Scoring Systems: Comparing Their Objectivity and Completeness* (Dangal, Faludi, & Balkenende, 2022) mais aussi grâce à un rapport sur ceux utilisés dans le BeNeLux pour les produits liés à l'énergie (Bracquené, et al., 2018) et les systèmes spécifiques aux smartphones et tablettes (Spiliotopoulos, et al., 2022). Nous nous sommes bien entendu penchés sur le fonctionnement de l'indice de réparabilité français (Spareka, s.d.) (Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, 2023). Nous avons aussi creusé des notions autour d'un indicateur mesurant la facilité de désassemblage des produits, l'indicateur eDiM (Vanegas, Peeters, Cattrysse, Tecchio, & Ardente, 2018). Ce dernier a principalement été approfondi par Tugce Turkbay, doctorante au G2ELAB, que j'ai assisté et qui cherche à l'adapter au désassemblage de carte électronique (Turkbay, et al., 2023). Ces données ont permis de construire un indicateur de réparabilité basé sur l'indice de réparabilité français existant, en le complétant par des concepts venant d'autres indicateurs et par les données récoltées dans notre enquête. L'indice français de réparabilité apparaît dans la littérature scientifique comme un indice assez avancé et objectif par rapport à d'autres indices existants, même s'il couvre une quantité limitée de critères, et que la note finale peu masquer des disparités de résultats par critères.

Composants défaillants en EP

Pour prodiguer des conseils autour des procédures de diagnostic, il a été nécessaire d'identifier les composants les plus couramment défaillants en électronique de puissance. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur des études portant sur la fiabilité en électronique de puissance. (Song & Wang, 2013), (Yang, et al., 2011), (Falck, Felfemacher, Rojko, Liserre, & Zacharias, 2018) (Wang, et al., 2014).

Etat des lieux des pratiques de réparation à Grenoble et en France, et perspectives du secteur

Un état des lieux des enjeux autour de la réparation a également été réalisé, au travers de rapports de l'ADEME sur les perceptions et pratiques des français (ADEME, 2020), un benchmark international du secteur de la réparation (ADEME, 2018), des mesures pour une consommation et une production durable (HOP, 2019), d'une enquête auprès de réparateurs grenoblois (Masclat, Azudie, & Boujut, 2023), une étude sur les pratiques des consommateurs et les initiatives institutionnelles (Sonego, Echeveste, & Debarba, 2022), ainsi qu'un aperçu interne d'une étude de l'ADEME sur la réparabilité des équipements électriques & électroniques dans une logique d'économie circulaire, commandé en novembre 2022. Ces documents ont appuyé le travail de mémoire réalisé dans le cadre de mon master en transitions écologiques à l'IEP de Grenoble disponible en annexe 4.

RECHERCHE DOCUMENTAIRE TECHNIQUE SUR L'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE ET LA REPARATION

Une première étape de mon travail de recherche sur la réparation en électronique de puissance a été d'acquérir des bases de compréhension suffisantes en électronique de puissance et en réparation.

NOTIONS BASIQUES D'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE & FONCTIONNEMENT DE LA CSC DAB

J'ai donc consacré la première semaine de mon stage à m'autoformer sur les composants utilisés en électronique de puissance, les applications et les montages à la base de nombreux systèmes (hacheurs, buck, boost, buckboost, fly-back, alimentations à découpage...), grâce à mes connaissances issues de l'ESISAR, à des ressources en ligne et à un webinaire réalisé par Pierre Lefranc pour l'équipe du projet VIVAE intitulé « *Applications, principes de bases et composants usuels* ». L'objectif était d'être capable d'avoir les bases nécessaires pour comprendre le fonctionnement d'un circuit et pour reconnaître les composants et les circuits courants intervenant dans les réparations.

Le fonctionnement de la cellule de conversion standard, cas d'étude que nous aborderons plus loin dans le rapport, m'a été détaillé par Hugot Pichon, doctorant dans l'équipe EP du laboratoire.

L'équipe électronique de puissance du G2Elab travaille depuis plusieurs années sur des convertisseurs de puissance électrique conçu de manière modulaire. Au lieu que la conversion d'énergie soit réalisée par un circuit électronique unique adapté à la haute puissance, elle est réalisée par un grand nombre de convertisseurs plus petits combinés entre eux, en série ou en parallèle pour atteindre l'intensité et la tension souhaitée en sortie. Ces petits convertisseurs sont standardisés : ils ont tous exactement la même conception au sein d'un appareil, et pour certains modèles, sont même parfaitement bidirectionnels. On nomme donc ces convertisseurs des « Cellules Standards de Conversion » (CSC).



Figure 6 : CSC permettant une conversion DC/AC

Les cellules de standards de conversion sont combinées entre elles dans des « Tableau convertisseur de puissance » ou Power Converter Array (PCA).

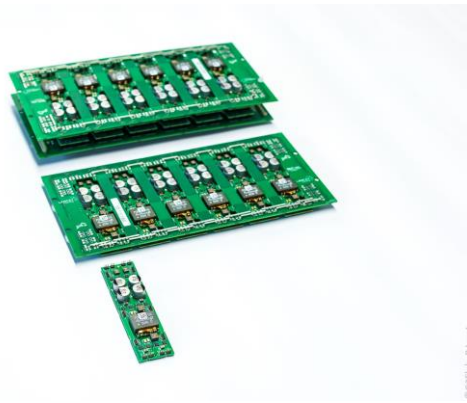


Figure 7 : PCA et CSCs DC/AC

La cellule de conversion standard que nous avons utilisée pour notre test est un modèle basé sur une topologie de conversion DC-DC à isolation galvanique nommée Dual Active Bridge (DAB). Il s'agit d'une topologie bidirectionnelle associant une source et une charge de nature capacitive, et qui possède un élément inductif, adapté à la forte puissance.

Elle permet de contrôler l'alimentation d'une charge continue avec un très bon rendement (de l'ordre de 90%), et a, ainsi, de nombreuses applications : alimentations de laboratoire, conversion DC-DC au sein des réseaux embarqués, chargeurs de batterie pour véhicules électriques. (Maximin Blanc, 2019)

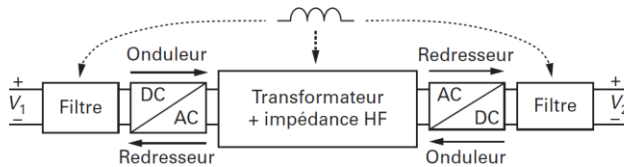


Figure 8 : Synoptique de la conversion DC-DC isolée (Maximin Blanc, 2019)

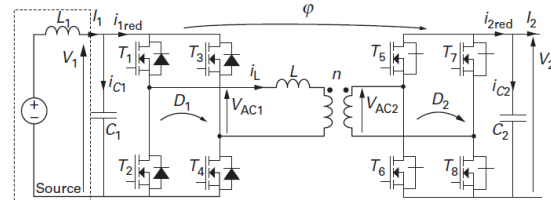


Figure 9 : Schéma électronique d'un DAB (Maximin Blanc, 2019)

Le fonctionnement est assez simple à comprendre :

- Le signal est filtré en entrée
- Il est ensuite converti en tension alternative en créneaux par un pont onduleur
- Il passe au travers d'un condensateur AC servant à éliminer le courant de mode commun (résonance série), et au travers d'une inductance de liaison pour lisser le courant de liaison et réduire les harmoniques parasites
- Le transformateur haute fréquence transmet le signal du primaire au secondaire, et permet ainsi une isolation galvanique.
- Le deuxième pont de MOSFET redresse le signal qui sera ensuite filtré par le condensateur DC pour obtenir une source de tension continue (filtrage des courants hautes fréquences et écrêtage de la tension aux bornes des MOSFETs).

Dans le DAB, l'onduleur et le redresseur sont formés de transistors MOSFETs en ponts, que l'on peut voir comme des sources de tension en créneaux. Ils sont commandés à fréquences identiques à trois états ($-V_i$; 0 ; $+V_i$), avec un certain rapport cyclique d'ouverture. Le signe du déphasage φ entre les commandes du primaire et du secondaire va définir le sens du transfert de puissance. La commande la plus simple utilisée pour le DAB est la modulation « *phase-shift* », réalisée à fréquence fixe, avec un rapport cyclique de 50% maximum pour la commande de chaque pont, et dans lequel on va faire varier le déphasage entre le primaire et le secondaire pour obtenir un certain transfert de puissance. La plupart du temps la consigne de cette commande est ajustée à l'aide d'une correction proportionnelle intégrale, pour obtenir un résultat optimal sans erreur statique.

Dans les PCA, l'objectif est surtout de profiter de l'isolation galvanique entre l'entrée et la sortie qui permet de combiner les cellules en série ou parallèle pour réaliser une conversion (augmenter l'intensité quand on les combine en parallèle, augmenter la tension quand on les combine en série). De plus, notre utilisation de la cellule nécessitant juste que le DAB soit en fonctionnement, sans chercher à avoir de commande particulière, nous l'avons utilisé sans

modulation particulière et sans correction, en cherchant à ce que la tension et le courant de sortie soient les mêmes que la tension d'entrée.

La commutation des MOSFETs est assurée par des Gates Drivers, alimentés par des régulateurs de tension LDO 5V, placés au dos de la carte.

Le schéma électrique détaillé de la cellule utilisée et son placement sont détaillés ci-dessous.

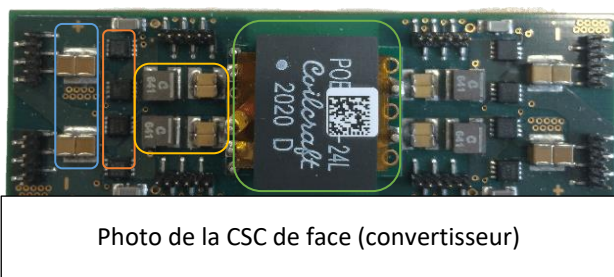
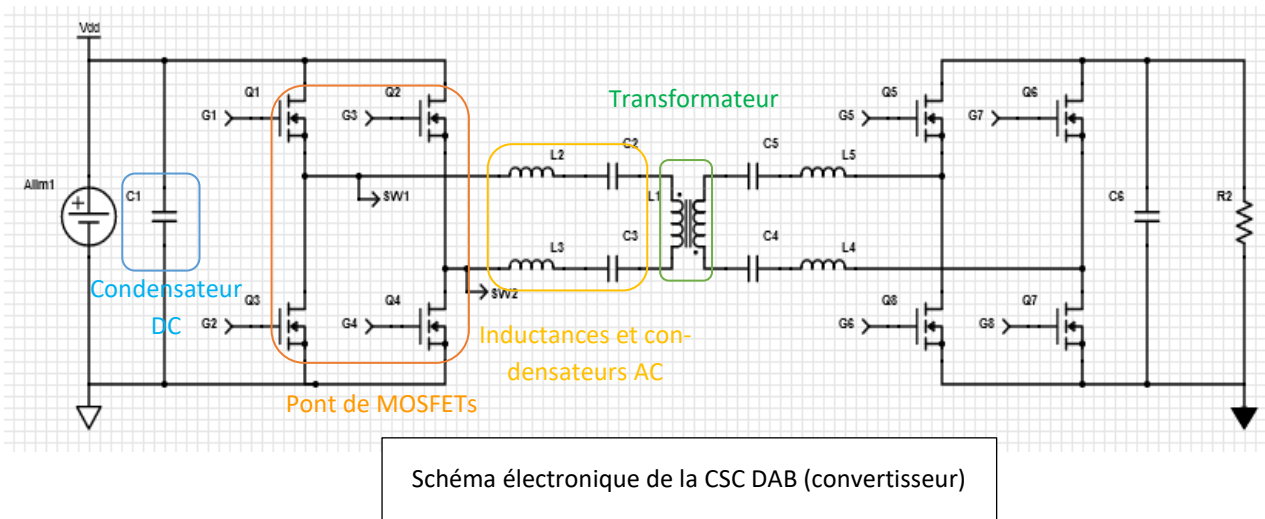
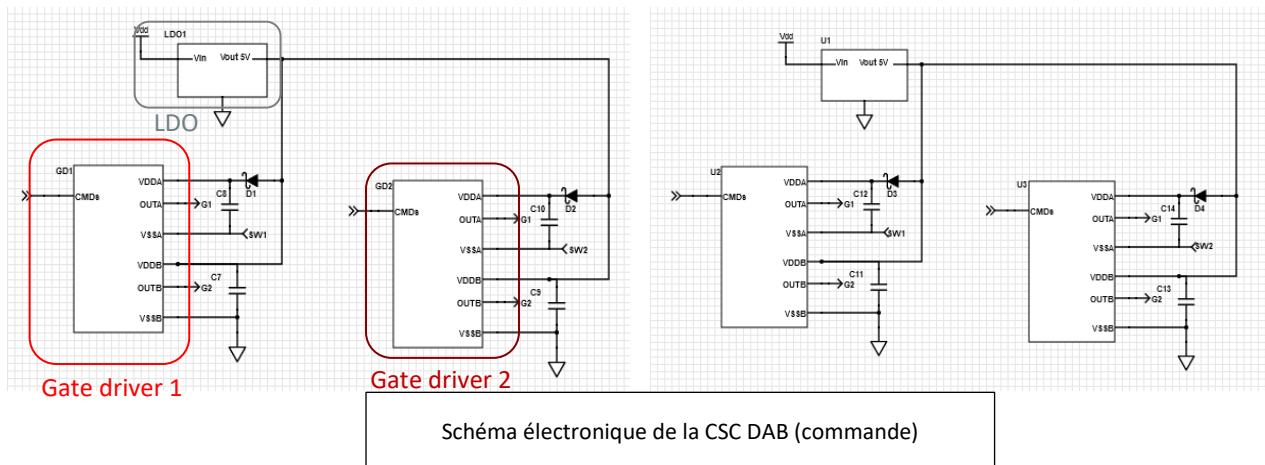


Figure 10 : Schéma électronique complet et photo de la CSC DAB, avec identification des principaux groupes de composants en entrée (la sortie est symétrique)

BASES DE REPARATION

L'apprentissage de notions de réparations s'est fait tout au long des différentes expériences au sein de mon stage et des Repair Cafés, mais à principalement débuté grâce à la lecture du « **Guide pour apprendre à réparer ses appareils électroménagers et électroniques soi-même** » (Ateliéphémère, 2016) de David M. L'Ateliéphémère. Ce livre apporte un bon socle de connaissances pour être capable de diagnostiquer et réparer des appareils courants du quotidien. Nous avons complété cet apprentissage de ressources en ligne, notamment les vidéos de « Simon Liegeois » (Liegeois) détaillant les méthodes de réparations utilisées en micro-électronique.

La participation à plusieurs Repair Cafés, associations et ateliers d'autoréparation ou d'aide à la réparation, tout au long du stage a été aussi l'occasion de sortir de la théorie, de d'apprendre au côté de réparateurs sur des objets courants, ou moins courant : lors d'un atelier, un visiteur a ramené 3 alimentations sans interruption de la marque EA-TON, partenaire du projet VIVAE.

ENQUETE DE TERRAIN

Afin de mieux cerner les besoins des réparateurs en termes de conception électronique pour faciliter la réparation, il est rapidement apparu comme nécessaire d'aller à la rencontre des réparateurs dans différents secteurs pour observer le déroulé de leurs réparations, ainsi que pour leur soumettre un questionnaire.

L'objectif de cette enquête est d'identifier des points clés freinant ou aidant la réparation, notamment pour avoir des bases permettant d'améliorer la conception pour la réparabilité, mais aussi pour mieux comprendre l'état et les perspectives du secteur de la réparation. L'étude a été réalisée en allant à la rencontre de réparateurs du monde de la recherche (support technique du laboratoire), du monde associatif (Repair Cafés), et de l'industrie (Itencia entreprise réparant notamment le matériel d'Eaton, un ingénieur de maintenance chez Soitec et un technicien de maintenance, de réparation et mesures aujourd'hui pour EDF).

CONCEPTION DU QUESTIONNAIRE, CADRE ET LIMITE

Un questionnaire a donc été conçu, disponible en annexe sous le nom « *A1_QuestionnaireReparateur.xlsx* ». Ce questionnaire s'est basé sur les catégories de l'indice de réparabilité français (documentation, accès démontage, disponibilité des pièces détachées, prix, spécifique) ainsi que des questions permettant d'identifier le répondant, et de mieux cerner les enjeux de la structure dans laquelle il évolue. L'objectif était aussi de cerner les enjeux non techniques liés au développement de la réparation. On a donc abouti à 70 questions, visant au maximum des réponses quantifiées pour être comparables, réparties dans les catégories suivantes :

- Identification de la personne répondant et du rapport à la réparation
- Questions spécifiques aux associations
- Questions spécifiques aux professionnels
- Documentation
- Diagnostic
- Accès au démontage & remontage
- Disponibilités des pièces détachées
- Prix
- Spécifiques
- Générales

Les entretiens se sont toujours déroulés en présentiel, au travers d'une discussion guidée par le questionnaire. Si les rendez-vous au sein du G2ELAB ont été faciles à prendre et ont permis d'expérimenter sur un terrain indulgent le questionnaire, les rendez-vous externes ont demandé de passer du temps dans les Repair Cafés pour gagner la confiance des réparateurs, nécessaire à ce que ces derniers soient prêts à accorder du temps pour ces entretiens d'environ une heure. Eaton, partenaire du projet VIVAE, a facilité la possibilité d'une visite chez Itencia, réparateur agréé de certains de ses convertisseurs. Si cette visite n'était pas guidée par le questionnaire, elle a permis de récolter beaucoup d'informations sur les pratiques de réparation dans un cadre professionnel plus industriel.

Cette enquête présente plusieurs limites : elle est basée sur un faible panel de réparateurs (7 et un industriel). Il est donc nécessaire de toujours être prudent sur ses conclusions et de la mettre en relief avec d'autres travaux. Aucun de ces réparateurs ne travaillaient spécifiquement sur des convertisseurs d'électronique de puissance à forte puissance de type « Bus Bar », source d'un manque de données crucial sur cet aspect.

SYNTHESE DES RESULTATS

L'ensemble des résultats de cette enquête est synthétisé dans un document, disponible en annexe 2 sous le nom « *A2_SynthèseEnquête* ». Cette enquête a permis d'obtenir des résultats importants pour mieux appréhender les pratiques de réparation, l'ensemble des enjeux abordés dans les différentes parties du questionnaire, la sociologie des réparateurs, des utilisateurs de leurs services, et l'organisation des structures de réparation mais aussi pour mieux comprendre les freins et les leviers systémiques nécessaires au développement de la réparation.

Les principales informations techniques retenues de cette enquête sont résumées dans ce tableau.

Tableau 2 : Synthèse technique de l'enquête auprès des réparateurs

	Particulier	Associatif	Maintenance interne (académique ou in- dustrie)	Réparateur in- dépendant	Réparateur agréé, SAV
Publique	Particulier	Particulier	Une entreprise/laboratoire	Particuliers et pro- fessionnels	Particuliers et pro- fessionnels
Type d'objets	Variable, petite électronique et électroménager	Variable, petite électronique et électroménager	Légère spécialisation, machines industrielles	Spécifique	Spécifique
Budget	Faible	Relativement faible	Important	Relativement important	Important
Matériel	Incomplet	Correct mais non spécialisé	De correct à bon, légèrement spécialisé	Complet et spécialisé	Très complet et spécialisé
Niveau de compétence	Faible	Correct	Plutôt important	Très important	Très important
Niveau d'accès actuel à l'information	Faible	Faible	Moyen	Plutôt moyen	Important
Outils d'information souhaitable	- Information sur le caractère réparable - Information de sécurité - Guide de diagnostic (fonctionnement et tension) et de réparation basique, - information sur les services de réparation	Référencement des composants, schéma électronique, service manuel, guide de diagnostic (tension, puissance consommée et valeurs des composants), listes des composants faillibles à tester	- Référencement des composants - schéma électronique - service manuel - guides de diagnostic (tension, puissance consommée, intensités, signaux et formes d'ondes) - listes des composants faillibles à tester	- Référencements des composants - schéma électronique et documents détaillés - Service manuel détaillé - guides de diagnostic (tension, puissance consommée, intensités, signaux et formes d'ondes)	- Données complètes de conception (schéma, valeurs de références, diagnostics prévus etc.)
Conception aidante	- Démontabilité avec outils courants - Points de tests de tension simples & indicateurs visuels & codes d'erreurs	- Démontabilité avec outils non-propriétaires - points de tests de tension par modules fonctionnels & composants faillibles - codes d'erreurs - composants faillibles faciles d'accès et de démontage	- Démontabilité avec outils non-propriétaires -Points de tests de tension & signaux par modules fonctionnels & composants faillibles & points stratégiques - codes d'erreurs - composants faillibles faciles d'accès et de démontage	- Démontabilité avec des outils commercialisés - points de tests de tension & signaux par modules fonctionnels & composants faillibles & points stratégiques - codes d'erreurs - composants faillibles faciles d'accès et de démontage	- Démontabilité possible - Diagnostic possible
Détails des modèles possibles et financement	- Autoformation, formation en ligne, aide de proches - Récupération, achats d'occasion	- Repair café, participation plus ou moins grande de l'utilisateur, ateliers de formations, stocks de composants - Subventions, prix libres, services rémunérés aux professionnels	- Maintenance en usine, maintenance & réparation en laboratoire, en bureau de développement - Financement par l'entreprise/la structure, politique RSE, aide de l'état	- Réparateurs généraliste ou spécialisé, à domicile ou en boutique, gros atelier ou indépendant - Aide à l'installation, prime de réparation - Aide à la formation	- SAV interne, contrat entre le fabricant et des sous-traitants, B2B ou B2C - aide de l'état, trésorerie interne, contrat fabricant-sous-traitant

SYNTHESE TECHNIQUE DANS UN GUIDE DE CONSEILS & RECOMMANDATION POUR LA REPARATION

Les informations récoltées dans la littérature et grâce au travail d'enquête ont permis de réunir suffisamment d'informations pour proposer un Guide de conseils et recommandations pour la réparation disponible en annexe 3 sous le nom « *A3_GuideConseilsRecommandationsReparation* » (environ 20 pages). Ce document a pour but de prodiguer des conseils de bases permettant de se lancer dans une réparation, ainsi que de fournir des éléments qui pourraient servir de base de construction pour des documents guidant la réparation et l'autoréparation. Il est donc tout autant adressé à des débutants en réparation qu'à des concepteurs en tant que base ou annexe à la leur documentation.

Il a été construit autour des catégories suivantes :

- Une **introduction**, qui rassemble des informations sur l'électronique de puissance, la nécessité de réparer, et des recommandations générales de sécurité.
- Des **rappels basiques d'électroniques pour la réparation**, avec un mémo sur les différentes grandeurs électriques, une liste d'outils nécessaires à la réparation (issue de liste collectées en Repair Cafés, d'observation du matériel utilisé en maintenance ou en entreprise de réparation, ainsi que de données en ligne) et quelques pistes pour être capable d'identifier le type de circuit réparé.
- Une partie sur la **documentation**. En effet, elle est identifiée dans l'enquête et dans la littérature (Sonogo, Echeveste, & Debarba, 2022) (ADEME, 2020) comme un enjeu essentiel de la réparation pour dépasser les freins psychologiques à la réparation, ainsi que pour la rendre techniquement possible. Nous proposons donc des conseils pour trouver les informations utiles à la réparation, tout comme pour trouver des réparateurs en fonction du type de produit et des moyens dont on dispose.
- Une partie sur le **diagnostic** : quel événement a mené à la panne ? Quels sont les pannes courantes ? Quelle méthode de diagnostic appliquer ? On y liste également les méthodes pour diagnostiquer le bon fonctionnement des composants les plus courants en électronique de puissance. Cette partie est nécessaire pour permettre aux utilisateurs de dépasser l'impression d'impuissance face à un appareil endommagé, quand bien même la plupart des techniques utilisées sont relativement simples.
- Des techniques de **réparation**. Le but étant de donner des astuces pour désassembler, dessouder, ressouder et réassembler de la manière la plus efficace possible en fonction du type de composant rencontré. Cette partie a été rédigée à partir de documentation en ligne (Liegeois), d'expérience de réparateurs rencontrés durant les entretiens, mais aussi lors d'un travail visant à améliorer l'indicateur eDiM (métrique de désassemblage). Durant ce travail nous avons filmé Danièle, électronicienne du laboratoire, dans un travail de dessoudage de nombreux composants de type différents, puis documenté chacun de ses gestes.
- Quelques conseils pour **identifier et remplacer une pièce ou un composant**. L'identification des composants défaillant est l'un des freins les plus importants à la réparation. S'il peut être dépassé à l'aide d'un travail du côté des concepteurs, les utilisateurs sans expérience ne savent pas toujours comment trouver l'information, ni où le commander.

Les catégories ont été construites pour correspondre grossièrement à l'ordre dans lequel va être effectué la réparation et l'ordre utilisé

SYNTHESE NON TECHNIQUE DANS UN RAPPORT SUR L'ETAT DES LIEUX ET LES PERSPECTIVES DU SECTEUR DE LA REPARATION A GRENOBLE

Dans mon travail de recherche, de nombreux enjeux non techniques ont rapidement été relevés. En effet, si la réparabilité passe en partie par des changements techniques dans la conception et des meilleures documentations, de nombreux autres enjeux pèsent énormément dans la balance : le modèle économique du fournisseur et du distributeur permet-il à l'utilisateur d'avoir accès à un service après-vente efficace, compétent, proche de chez lui ? Est-il possible pour lui de réparer chez un réparateur indépendant proche de chez lui ou dans une association ? Ces structures existent-elles ? Des réparateurs sont-ils formés pour réparer ce type d'objet ? La réparation est-elle plus coûteuse que l'objet neuf ? Les politiques publiques favorisent-elles la réparation ? Imposent-elles des contraintes aux entreprises à ce sujet ?

Il semble parfois même que la plupart des efforts techniques ont un impact relativement marginal tant que des évolutions législatives et structurelles majeures ne sont pas mises en place : la standardisation nécessite par exemple des politiques coercitives pour exister.

Mon travail de recherche m'amenant à rencontrer et me documenter sur un nombre varié de réparateurs et de structures liés à la réparation, j'ai eu envie de documenter l'état du secteur de la réparation électronique dans le bassin Grenoblois, ainsi que détailler les freins et les leviers permettant au secteur de la réparation de se développer, en fonction du modèle que ce secteur choisira. Si ce travail peut sembler annexe au travail de recherche technique de mon stage, il permet pour moi de donner de la perspective et de la profondeur aux propositions techniques. Les acteurs de la recherche et de l'électroniques sont et seront en effet les premiers acteurs concernés par les directions que prendra le secteur de la réparation et les directives étatique le concernant.

Tout ce travail est donc disponible en annexe sous le nom « A4_MemoireIEP ».

Figure 11 : Synthèse de l'état des lieux des pratiques de réparation électronique à Grenoble

Professionnels & industriels	Académique	ESS	Associatif	Autoréparation
• SAV, indépendants agréés ou non, maintenance • Grande diversité de domaines et de modèles économiques • 40-30, Miss-Pièces, Darty, Itencia	• Recherche, enseignement, maintenance interne • Peu de recherche (VIVAE) • pas de formation spécialisée (parcours technique ou pro)	• Domaine structuré et soutenu à Grenoble • Fédération d'acteurs et future plateforme Fabricanova (Emmaus, Régie de quartier, Cycle&Go ...)	• Repair cafés et ateliers • En croissance mais peu structuré • Projet de plateforme de mutualisation de pièces détachées et composants	• Peu de données et pratiques inégales • Des possibilités de progression

Figure 12 : Perspectives de développement du secteur de la réparation électronique à Grenoble

Un modèle à construire	Freins au développement	Leviers d'action
• Des structurations différentes (exemple de l'automobile et du vélo) • Des enjeux spécifiques à l'électronique	• Economiques • Psychologiques et informatifs • Matériels & techniques • Cadre actuel du secteur de la réparation • Organisation systémique du secteur électronique	• Economiques et financiers • Documentation • Accès aux pièces détachées • Techniques • Garanties • Marketing, communication, information à l'acheteur • Organisation du secteur de la réparation

COMMENT CONCEVOIR REPARABLE EN ELECTRONIQUE DE PUISSANCE ?

ETABLIR DES RECOMMANDATIONS POUR LA REPARABILITE

TRAVAIL D'ENQUETE DE TERRAIN

Le travail d'enquête, détaillé dans la première partie sur les pratiques de réparation, dans le tableau 2 *synthèse technique des résultats de l'enquête*, ainsi que dans le document « A2_SynthèseEnquête », permet non seulement de mieux identifier comment procéder à une réparation, mais permet aussi d'identifier les changements nécessaires à la conception.

Ce travail a notamment permis d'identifier :

- Les proportions d'électronique de puissance dans les réparations effectuées
- Le profil des réparateurs
- Les fonctionnements et besoins spécifiques de chaque réparateur : matériel, les compétences, le temps passé sur le diagnostic et la réparation, contraintes économiques (cf. tableau *synthèse technique des résultats de l'enquête*)
- Le type de documentation perçue comme utile à la réparation (cf. tableau ci-dessous)
- Une meilleure identification de comment faciliter les procédures de diagnostic : accès aux composants, identification des composants, procédures de diagnostic (service manual), outils utilisés, maîtrisés et disponibles, temps maximal accordé à cette partie (en exemple, la liste *Bilan des recommandations techniques facilitant le diagnostic*)
- Temps, matériel, et compétences pour le désassemblage et le remplacement des composants
- Designs facilitants ou compliquant le désassemblage (connecteurs, fixations, miniaturisations, placement...) (en exemple la liste *Fixations et connecteurs compliquant le désassemblage* et *Bonnes pratiques vis-à-vis de la miniaturisation et l'accessibilité*)
- Composants identifiés comme régulièrement défaillants
- Pratiques utilisées pour commander des nouvelles pièces

Tableau 3 : Utilité perçue des documentations possibles

Type de documentation	Danièle Dargaud	Alexis & Benoît	Pablo Garcia	Dominique Clément	Alban	Hugo	Total
Identification sans équivoque du produit (type de produit, marque, nom commercial, modèle et éventuellement le numéro de série)	1	1	1	1	1	0,8	0,97
Schéma de démontage ou vue éclatée		1	1	1	1	0,8	0,96
Schémas de câblage et de raccordement	1	1		1		0,8	0,95
Schémas des cartes électroniques	1	1	0,5	1	1	0,8	0,88
Valeurs de références pour la mesure	1	0,75	1	0,8		0,8	0,90
Liste du matériel de réparation et de test nécessaire à la réparation	1	0	1	0		0,8	0,56
Manuel technique d'instructions relatives à la réparation	1	0,75	1	0,8		0,5	0,89
Codes d'erreurs et de diagnostic + logs machines		1	1	1		1	1,00
Informations sur composants et diagnostic	1	1	1	0,9	1	0,8	0,95
Instructions logicielles (y compris réinitialisation)	1	1	1	0,5		0,8	0,86
Logiciel de débogage		1	0	0		0,8	0,45
Accès aux incidents signalés et enregistrés dans l'équipement	1	0,75	0,2	1		1	0,79
Bulletins techniques			0	0		0	0,00
Encadrement spécifique de l'auto-réparation (opérations conseillées, instructions de sécurité et de réparation, répercussions éventuelles sur la garantie)	1	0	1	0		0	0,40
Informations sur accès aux réparateurs professionnels		0,75	0	0		0,8	0,39
Information de remplacement & fournisseurs		0	1	0		1	0,50
Détection des pannes et actions requises (approche grand public)		0	0	0,8		0,8	0,40
Conseils d'utilisation et d'entretien		1	1	0		0,8	0,70
Séquence de réassemblage	1	1	1	0,8		0,8	0,92
Plan d'impression 3D		0,2	1	0,8	1	0,8	0,76
Reconditionnement		0	0	0		0,8	0,20
Accès à un service center	1	0	0	0		1	0,40
Instructions de transport		0	1	0		1	0,50
Matériel d'entraînement pour la réparation		0	0	0		0,8	0,20
Couple recommandé pour les fixations		0	0	0		1	0,25
Compatibilité de certaines parties avec d'autres produits	1	0,2	1	1		1	0,84
Spécifications fonctionnelles de parties		0,5	1	1		0,8	0,83

Tableau 4 : Exemples de listes de recommandations utiles à la conception des livrables

Bilan des recommandations techniques facilitant le diagnostic	Fixations et connecteurs compliquant le désassemblage	Bonnes pratiques vis-à-vis de la miniaturisation et l'accessibilité
- Composants identifiables (références écrites sur le PCB, valeurs de référence...) - Présence de testpoints stratégiques (Signaux d'entrée et sortie, signaux d'alimentation & optocoupleurs, composants faillibles...) - Robustesse face à la défaillance et fonctionnement en marche dégradée - Minimisation et protection des composants complexes à diagnostiquer et remplacer : microcontrôleurs, CI, composants actifs...	- Des boîtiers collés, scellés, moulés, remplis de résines - Composants recouverts de pâte blanche - Accès à des vis trop profondes demandant des tournevis particulièrement longs - Têtes de tournevis spécifiques - Alliages de métaux de basses qualités impossibles à ressouder - Pas de vis de mauvaises qualités (plastique), cassants - Connecteurs d'électronique nécessitant de trouver la bonne méthode pour le déclipser (nappes de téléphones...) - Pastilles ou pistes de PCB s'arrachant de la carte lors du dessoudage - Plan de masse ralentissant la chauffe au dessoudage, notamment en l'absence de freins thermiques - Cosse de sertissage nécessitant un point de soudure pour une connexion plus durable - Fils trop courts pour être dénudés et resoudés facilement, et conception créant	- Eviter les composants inaccessibles avec du matériel de soudure classique (boîtier 0402 par exemple), notamment sur les composants ayant beaucoup de pins - Agrandir les pads pour avoir un meilleur accès avec un fer à souder - Ajouter des testpoints - Ajouter un marquage et une identification claire des composants. - Espacer les composants pour permettre le passage d'outils

	des torsions sur la soudure du câble d'alimentation ou d'autres câbles, pour les objets mobiles.	
--	--	--

CONCEPTION D'UN GUIDE DE RECOMMANDATIONS POUR UNE CONCEPTION ELECTRONIQUE FAVORABLE A LA REPARATION

Tout le processus de collecte d'information dans la littérature et par un travail d'enquête de terrain, ainsi que par un travail sur un cas pratique, a amené à la création d'un *Guide de Recommandations pour une conception électronique favorable à la réparation* disponible en annexe sous le nom de « A5_RecommandationConceptioFavorableReparation » (environ 20 pages).

Ce guide est ordonné de manière à correspondre au processus de conception :

- Introduction : pourquoi concevoir réparable ? Pourquoi choisir ce scénario face à d'autres scénarios de l'économie circulaire ? Est-ce incompatible avec la performance ?
- A quel type de réparateurs sont destinés les choix de conception ?
- Développement du fonctionnement théorique de l'appareil et circuit électronique
- Simulations physiques
- Choix des composants et empreintes
- Placement & routage
- Assemblage mécanique
- Documentation
- Modèle économique de la commercialisation du produit
- Utilisation de l'indicateur de réparabilité développé dans le stage pour s'autoévaluer et s'améliorer

Le guide veut pousser les concepteurs à des mesures simples et atteignables pour favoriser la réparation. En effet, si les réparateurs espèrent tous des objets ultra modulaires et réparables comme les *Fairphones*, leurs problématiques primaires sont beaucoup plus simples à résoudre : elles concernent souvent la présence d'une documentation minimale permettant d'identifier les pièces, de les diagnostiquer et de pouvoir commander de nouveaux composants.

DES COMPOSANTS PLUS FAILLIBLES QUE D'AUTRES

Une des recommandations principales de ce guide est de, à la manière de l'indice de réparabilité français, proposer aux concepteurs de se concentrer en priorité sur le diagnostic, la documentation et l'accessibilité des composants les plus faillibles, et donc le plus probablement source de la défaillance.

Une liste ordonnée de la faillibilité des composants a donc été créée, basée sur la littérature scientifique (Falck, Felfemacher, Rojko, Liserre, & Zacharias, 2018) (Song & Wang, 2013) (Yang, et al., 2011) (Wang, et al., 2014), et confirmé par l'expérience des réparateurs interrogés :

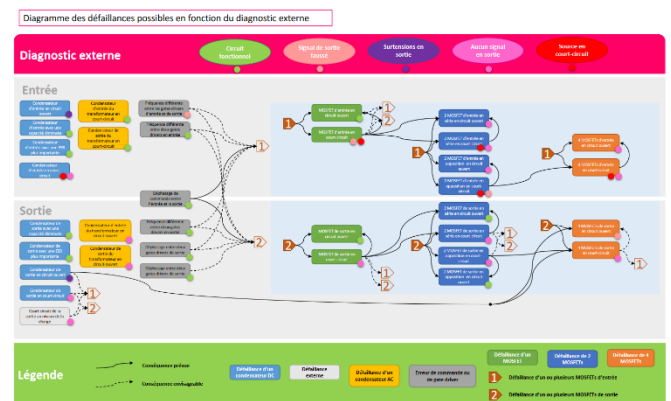
1. Les semi-conducteurs « modules »
2. Les condensateurs électrolytiques
3. Les semi-conducteurs discrets (diodes, transistors, thyristors, ...)
4. Les condensateurs films
5. Environ ex-aequo :
 - Les condensateurs céramiques
 - Les semi-conducteurs drivers (driver gate)
 - Les composants électromécaniques (relais, contacts, ...)
 - Les systèmes de protection (surtension, fusibles, ...)
 - Les systèmes de refroidissement
 - Les systèmes d'alimentation secondaires
 - Les connecteurs
6. Les capteurs (voltage, courant, T° ...) et les systèmes de contrôles hardware (µC, FPGA, ...)

7. Les composants magnétiques (inductances, transfo, ...)

AMELIORATION DES PROCEDURES DE DIAGNOSTIC

Une autre proposition majeure développée dans ce document, et appuyée par le travail sur le cas pratique, c'est la proposition de méthodes nouvelles pour améliorer les procédures de diagnostic. La méthode envisagée, dérivée de l'analyse AMDEC, se déroulerait de la manière suivante :

- Définition des composants et connexions les plus à même d'être à l'origine d'une défaillance
- Analyse des défaillances possibles de ces composants et connecteurs (court-circuit, circuit ouvert, changement des valeurs de référence...)
- Préviation de conséquences possibles sur le circuit et ses signaux et corroboration par simulation numérique
- Trie des informations dans un tableau, qui servira de référence solide pour diagnostiquer l'appareil pour ses défaillances les plus courantes
- Visualisation graphique des données sous forme de diagramme
- Visualisation des données dans un tableau classé en fonction d'un signal de diagnostic
- Conformation pratique des simulations numériques
- Construction de procédures de diagnostic



L'objectif est de construire un diagramme permettant :

- De mieux gérer le diagnostic en comprenant quel peut être la source de la défaillance
- De mieux visualiser les points sensibles de la conception, et quelles pannes peuvent être critiques.

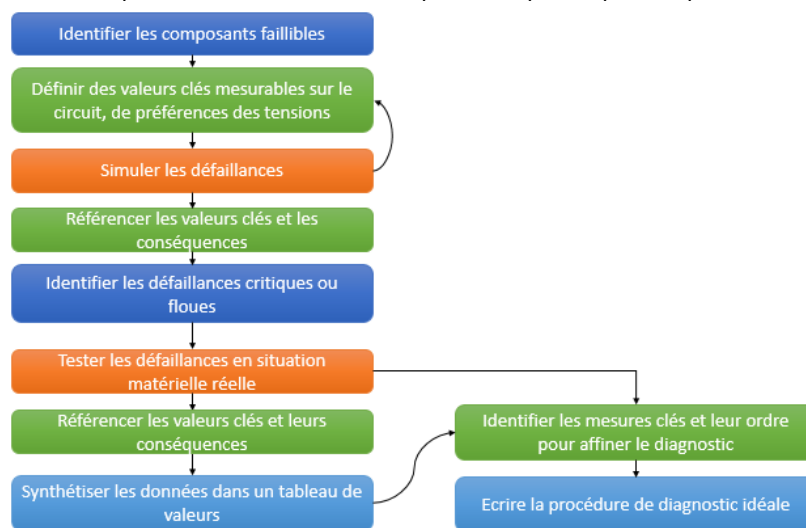


Figure 14 : déroulement prévu de la création de processus de diagnostic

Les données de l'enquête ont permis d'établir **une liste des documentations utiles aux réparateurs** : l'identification sans équivoque du produit, les schémas de démontage (ou vue éclatée), la séquence de réassemblage, les schémas de câblage ou raccordement, les codes d'erreurs et de diagnostics & les logs, les informations sur les composants et leurs diagnostics, le manuel technique d'instructions relatives à la réparation, les schémas électroniques.

De cette liste, nous avons fait une proposition d'organisation d'une documentation d'aide à la réparation et au diagnostic d'un produit donné :

- Informations de sécurité vis-à-vis de l'autoréparation, indiquant clairement les risques encourus dans l'autoréparation, et les zones à ne pas toucher en tension.
- La Bill of Materials (BOM), le tableau reliant les codes des composants à la référence permettant de les identifier et les commander
- Les informations de maintenance du produit
- Des diagrammes fonctionnels ou des diagrammes blocs permettant d'identifier les différentes zones de la carte électronique/du produit.
- Des procédures de maintenance et de réparation adaptées aux réparateurs
 - Procédures de maintenance et d'entretien basiques pour les utilisateurs (démontage, nettoyage, réinitialisation, ...)
 - Procédures de test débutant (voyants allumés, codes d'erreurs, tensions d'entrée, de sortie, ...)
 - Procédures intermédiaires (Valeurs de référence et signaux à divers points stratégiques de la carte, listes des composants faillibles et manière de les tester, ordre des tests à effectuer)
 - Procédures complètes (schéma électronique complet, simulation numérique du circuit, valeurs attendues, diagramme de défaillance)

Le *Guide de Recommandations pour une conception électronique favorable à la réparation* a pour but de servir d'appui à la création de cette documentation, comme nous l'avons expérimenté sur le cas d'étude de la CSC.

EVALUER LA REPARABILITE D'UN APPAREIL ELECTRONIQUE DES LA CONCEPTION

INDICATEURS EXISTANTS

Comme expliqué dans l'état de l'art, de nombreux indicateurs existent déjà et présent sont plus ou moins complet ou orienté sur la réparation électronique, et destiné à des publics et pratiques différentes. Les critères utilisés peuvent être évaluée de manière plus ou moins objective (Dangal, Faludi, & Balkenende, 2022) :

- EN45554 (2020) → général, professionnel et autoréparation
- FRI (French Repair Index) (2020) → professionnel et autoréparation
- iFixit (2019) → smartphone, autoréparation
- RSS (2019) → plutôt pour les professionnels (électroménager, smartphone ordi)
- AsMer (2018) → Général, pro et autoréparation
- ONR 192102 (2014) → Petit et gros électroménager, professionnels

Dans ces méthodes, les critères suivants sont listés comme principes et design qui permettent de déterminer la réparabilité :

- Désassemblage
- Réassemblage
- Réutilisation et désassemblage des attaches
- Visibilité des attaches
- Modularité
- Diagnostique
- Risque de santé et de sécu
- Standardisation
- Accès aux infos
- Simplicité de design, complexité
- Adaptabilité, upgradability
- Facile à prendre ne main, ergonomie
- Interchangeabilité (test et remplacement)
- Robustesse du design
- Redondance
- Reset du micrologiciel



Figure 15 : scores de l'indice de réparabilités français

L'indice de réparabilité français, imposé par la loi AJEC depuis le 1^{er} janvier 2021 sur 7 appareils électroménagers et électroniques courants, fonctionne à l'aide de 5 critères et environs 9 sous-critères, ayant des coefficients différents. Il s'évalue en répondant à différentes questions dans un tableau prérempli qui calculera un résultat. Il fonctionne grâce à la définition de deux listes : la liste 1, une liste de 10 pièces dont le bon état est nécessaire au fonctionnement de l'appareil, et la liste 2, une liste de 3 à 5 pièces dont la panne et la casse sont les plus fréquentes.

La note unique attribuée et affichée ensuite présente le défaut de masquer les notes par critères et par sous critères, et donc de masquer certaines difficultés à la réparation pouvant résulter de notes mal réparties. On notera aussi que le modèle de réparation envisagé par ce critère est celui de la réparation au sous-ensemble : l'objectif est de remplacer des pièces et pas forcément des composants. On va donc, en cas d'un composant défilant sur un module électronique, remplacer l'entièreté du module.

La volonté du gouvernement semble être d'élargir cet indice de réparabilité à un maximum d'objets de la vie courante, mais il ne semble pas être prévu pour s'appliquer sur des objets moins personnels, comme c'est souvent le cas des convertisseurs d'électronique de puissance.

Critère	Sous-critère	Note du sous-critère	Coefficient du sous-critère	Note du critère	Total des notes des critères
1. Documentation	1.1. Durée de disponibilité de la documentation technique et relative aux conseils d'utilisation et d'entretien	■/10	2	■/20	■/100
2. Démontabilité et accès, outils, fixations	2.1. Facilité de démontage des pièces de la liste 2*	■/10	1	■/20	
	2.2. Outils nécessaires (liste 2)	■/10	0,5		
	2.3. Caractéristiques des fixations entre les pièces de la liste 1** et de la liste 2	■/10	0,5		
3. Disponibilité des pièces détachées	3.1. Durée de disponibilité des pièces de la liste 2	■/10	1	■/20	
	3.2. Durée de disponibilité des pièces de la liste 1	■/10	0,5		
	3.3. Délai de livraison des pièces de la liste 2	■/10	0,3		
	3.4. Délai de livraison des pièces de la liste 1	■/10	0,2		
4. Prix des pièces détachées	4.1. Rapport prix des pièces de la liste 2 sur prix de l'équipement neuf	■/10	2	■/20	
5. Critère spécifique (exemple avec 3 sous-critères)	5.1.	■/10	1	■/20	
	5.2.	■/10	0,5		
	5.3.	■/10	0,5		
Note de l'indice					■/10

*liste 2 : liste des 3 à 5 pièces détachées au maximum (selon la catégorie d'équipements concernée) dont la casse ou les pannes sont les plus fréquentes
 **liste 1 : liste de 10 autres pièces détachées au maximum (selon la catégorie d'équipements concernée) dont le bon état est nécessaire au fonctionnement de l'équipement

Figure 16 : Grille de notation de l'indice de réparabilité français

DEVELOPPEMENT D'UN NOUVEL INDICATEUR POUR LA REPARABILITE AU COMPOSANT EN ELECTRONIQUE

Il apparait donc nécessaire de dépasser les limites de ce critère et d'en proposer un complet, et fonctionnel pour être utilisé en électronique de puissance. Cet indice doit être destiné aux concepteurs et orienter leur choix vers des mesures concrètes pour la réparabilité. Il doit être suffisamment complet et indicatif pour être pertinent.

RECHERCHE DE CRITERES D'EVALUATION DE LA REPARABILITE DES COMPOSANTS

Une première phase de développement de cet indicateur a été de rechercher des critères objectifs pour qualifier la réparabilité d'un composant. Un premier cas d'étude sur la Cellule Standard de Conversion du G2ELAB a été effectué, en s'appuyant sur sa BOM (Bill of Material, sa nomenclature) et en cherchant pour chaque composant à tester différents paramètres liés à sa réparabilité :

- Son MTBF (temps moyen avant défaillance) et son prix pour définir **l'importance stratégique du composant**
- Le nombre de pattes du composants, le type de soudure (type de boîtier), son accessibilité physique en fonction du nombre de composant à dessolder avant, le matériel nécessaire au dessoudage, la durée de dessoudage à l'air chaud, la durée de dessoudage à la pince, pour qualifier **la difficulté de désassemblage du composant**

MTBF ou MTTF (hours)	Prix (pour 1000)	Nombre de pattes	Type de soudure	Taille des pins	Accessibilité physique (entre 1 et 0 - > 0 inaccessible sans rien dessolder d'autre, 1 accessible sans contact avec d'autres composants, 0,5 possible mais contact avec d'autres composants)	Matériel nécessaire au dessoudage (texte)	Matériel nécessaire au dessoudage (note)	Durée de dessoudage à l'air chaud	Dessoudage à la pince	Note de difficulté de désassemblage des composants
----------------------	------------------	------------------	-----------------	-----------------	--	---	--	-----------------------------------	-----------------------	--

Figure 17 : Paramètres testés pour chaque composant

Pour la cellule CSC, on a obtenu le tableau suivant, qui comportait plusieurs limites : les durées de désassemblage étaient fortement dépendantes des compétences de l'opérateur, et l'agrégation des résultats posait des questions complexes : est-ce plus difficile de souder et dessolder un composant avec 18 pins mais plutôt gros, ou de dessolder un composant à 4 pins particulièrement petit ?

Les résultats n'ont pas permis d'éclaircir le flou entre les deux méthodes de notations. Les notes sont relativement similaires en termes de classement des composants par réparabilité, mais présentent de nombreuses disparités difficiles à partager entre les composants aux caractéristiques proches. La taille des pins semble quant à lui être un critère qui apporte peu de différences, à valeurs égales de technique de dessoudage et de nombre de pin.

Nous avons donc choisi d'effectuer un autre test en nous concentrant uniquement sur deux critères : le nombre de pattes et le type de technique utilisée pour le dessouder. Dans un premier temps, nous avons agrégé les critères selon un calcul peu risqué : le nombre de pattes était sommé à l'autre note après avoir été divisé par 20, ce qui le rendait presque complètement dissocié de l'autre note.

Si ce calcul était encore peu satisfaisant, il a permis de valider la facilité d'utilisation d'une note se concentrant uniquement sur ces deux aspects.

Proposition finale

Notre objectif étant de définir la réparabilité de l'ensemble de la carte à la lumière de la réparabilité de ses composants, la proposition finale a rajouté un autre élément : nous avons choisi, comme dans l'indice de réparabilité français, de nous concentrer uniquement sur une liste particulière de composants, ceux les plus faillibles. En effet, peu importe si un composant jamais en panne est difficile à réparer.

Pour éviter que la notation de la réparabilité d'une carte soit biaisée par la présence d'un composant particulièrement difficile à dessouder, nous avons dissocié sa note, et la note moyenne des composants sources de défaillances.

Nombre de pattes	(Type de matériel & compétences nécessaires au ressoudage)	Type de matériel & compétences nécessaires au ressoudage (entre 1 et 5)	Note de difficulté de réassemblage des composants
6	soudure CMS classique (fer à souder, pompe à dessouder,	2	2,3
2	soudure CMS classique (fer à souder, pompe à dessouder, loupe, étain)	2	2,1
2	soudure CMS classique (fer à souder, pompe à dessouder, loupe, étain)	2	2,1
2	soudure CMS classique (fer à souder, pompe à	2	2,1
8	four (pad en dessous)	5	5,4
2	soudure CMS classique (fer à souder, pompe à dessouder, loupe, étain)	2	2,1
7	soudure CMS classique (fer à souder, pompe à dessouder,	2	2,35
8	Microsoudure (microscope & soudure fine)	4	4,4

Figure 20 : tableau d'évaluation de la réparabilité de la CSC selon deux critères

Facilité de démontage et remontage du composant	Technique la plus complexe nécessaire au dessoudage ou ressoudage des composants faillibles*	Note (entre 0 et 5) : aucune ou vis (5), soudure classique traversants (4), soudure classique CMS (3), microsoudure(2), four (1), impossible(0)	5		5/5
	Nombre de pates du composant le plus complexe à dessouder des composants faillibles*	Note (entre 0 et 5) : inférieure ou égale à 2 (5), inférieure ou égale à 4 (4), inférieure ou égale à 8 (3), inférieure ou égale à 16 (2), inférieure ou égale à 24 (1), supérieur à 24 (0)	1		5/5
	Technique moyenne nécessaires au dessoudage ou ressoudage des composants faillibles*	Note (entre 0 et 5) : aucune ou vis (5), soudure classique traversants (4), soudure classique CMS (3), microsoudure(2), four (1), impossible(0)	5		5/5
	Nombre de pates moyen à dessouder sur les composants faillibles *	Note (entre 0 et 5) : inférieure ou égale à 2 (5), inférieure ou égale à 4 (4), inférieure ou égale à 8 (3), inférieure ou égale à 16 (2), inférieure ou égale à 24 (1), supérieur à 24 (0)	1		5/5

Figure 21 : mode d'évaluation finale de la facilité de démontage et remontage des composants

Ce critère technique, bien qu'important, ne suffit pas à lui seul à qualifier la réparabilité d'un appareil : même facile à désassembler, il sera impossible de réparer une carte sans documentation, sans identification de ses composants, sans moyen de la diagnostiquer et sans composant de rechange. Ainsi l'indicateur doit comprendre d'autres catégories.

Nous avons donc construit un tableau indicateur de réparabilité sur la même base que l'indice de réparabilité français, en y rajoutant de nombreux critères. Ce tableau est disponible en annexe, dans le document « A6_TableauDEvaluationDeLaReparabilite ». Il se veut simple à remplir pour le concepteur, et source de réflexion quant à cette conception. Un mode d'emploi de son fonctionnement a été rédigé.

Catégorie	Caractéristique	Critères	Mode d'évaluation	Pondération	Pré-Note	Note	Sous totaux
-----------	-----------------	----------	-------------------	-------------	----------	------	-------------

Figure 22 : colonnes du tableau

Le tableau comporte 8 colonnes.

- **Catégorie** : Les grandes catégories permettant d'évaluer la réparabilité : Robustesse du circuit face aux défaillances, Documentation & identification du produit, Diagnostic, Réparation, Remplacement des pièces/composants. Ces catégories ont été réparties dans différentes feuilles de calcul

Information Produit	Robustesse	Documentation	Diagnostic	Réparation	Remplacement	Totaux
---------------------	------------	---------------	------------	------------	--------------	--------

Figure 23 : Feuilles du tableau

- **Caractéristique** : ce que l'on cherche à quantifier
- **Critères** : le ou les moyen(s) proposé(s) pour quantifier la caractéristique en question
- **Mode d'évaluation** : détail sur le mode d'attribution des points en fonction de la réponse à ces critères
- **Pondération** : importance de la caractéristique par rapport aux autres dans les calculs. La pondération a été évaluée subjectivement en fonction des retours sur le questionnaire d'enquête et la littérature. Un processus de validation de cette pondération par d'autres membre du projet VIVAE a été entamé mais n'a pas reçu de retours suffisants. L'idéal serait de poursuivre ce processus et de le faire confirmer par des réparateurs pour affiner la pertinence de la pondération.
- **Pré-note** : Dans le cas où plusieurs critères sont utilisés pour quantifier une même caractéristique, la case pré-note permet de remplir les valeurs liées à ces critères
- **Note** : Note attribuée à la caractéristique
- **Sous-totaux** : Agrégation des notes par catégories grâce à un calcul de moyenne pondérée :

$$\text{Note} = \frac{\sum \text{pondération} \times \frac{\text{Note}}{\text{NoteMax}}}{\sum \text{pondération}} \times 10$$

Les résultats sont donnés en bas du tableau. La note totale de réparabilité fait la moyenne des notes des 5 sous-totaux par catégories. Deux autres notes sont indiquées :

- **Conception pour la réparabilité** : cette note correspond à la moyenne pondérée des notes des caractéristiques dépendant de la conception technique de l'objet.
- **Enjeux de documentation, marketing, gestion de projet et modèle économique pour la réparabilité** : cette note correspond à la moyenne pondérée des notes des caractéristiques ne dépendant pas uniquement du concepteur : marketing du produit, modèle économique de l'entreprise, contrat avec les fournisseurs de pièces, procédures de diagnostic...

Les détails des caractéristiques prises en comptes sont indiqués dans les colonnes masquées K et L.

La dernière feuille permet d'afficher les différentes notes attribuées par catégorie ainsi qu'une note totale.

Catégorie	Sous totaux	Conception pour la réparabilité	Enjeux de documentation, marketing, gestion de projet et modèle	Totaux	
Robustesse du circuit face aux défaillances	10/10	10/10		Conception pour la réparabilité	10/10
Documentation & identification du produit	10/10	10/10	10/10	Enjeux de documentation, marketing, gestion de projet et modèle économique pour la réparabilité	10/10
Diagnostic	10/10	10/10	10/10		
Réparation	10/10	10/10	10/10	Note totale de réparabilité	20/20
Remplacement des pièces/composants	10/10	10/10			

Figure 24 : Notes finales du tableau indicateur de réparabilité

Les notes doivent être attribuées pour chaque caractéristique en se basant sur le « mode d'évaluation » indiqué. **Uniquement les cases où le texte est en italique sont à modifier**, les autres se remplissent automatiquement.

Pour répondre à plusieurs critères, il est nécessaire d'établir la liste des composants faillibles : les 5 composants différents les plus à même de casser ou de tomber en panne. Basé sur 1) Une étude du produit fait par le fournisseur, 2) Des retours quantifiés d'expériences sur les composants, 3) des retours qualitatifs d'experts dans la littérature. L'objectif est ensuite de permettre d'évaluer la difficulté de réparation de ces pièces les plus à même de tomber en panne.

VALIDATION DES RESULTATS SUR UN CAS D'ETUDE, LA CELLULE DE CONVERSION STANDARD DU G2ELAB

EVALUATION DE LA REPARABILITE DE LA CSC & PROPOSITION D'AMELIORATION

En guise de cas d'étude du fonctionnement du tableau permettant d'évaluer la réparabilité de cartes électroniques, nous avons cherché à évaluer la réparabilité actuelles des cellules CSC.

De cette première évaluation, nous avons **déduit une série de proposition visant à améliorer le design de la CSC**.

La première évaluation, effectuée volontairement avec un scénario pessimiste pour toutes les questions n'ayant pas encore de réponse (la CSC n'étant pas un produit commercialisé), a donné les résultats suivants.

Le tableau complet est disponible dans le fichier Excel « A7_EvaluationReparabiliteCSC ».

Catégorie	Sous totaux	Conception pour la réparabilité	Enjeux de documentation, marketing, gestion de projet et modèle économique pour la réparabilité	Totaux	
Robustesse du circuit face aux défaillances	2,778/10	2,777777778/10		Conception pour la réparabilité	4,493/10
Documentation & identification du produit	1,25/10	1,666666667/10	0/10	Enjeux de documentation, marketing, gestion de projet et modèle économique pour la réparabilité	1,382/10
Diagnostic	1,071/10	5/10	1,111111111/10		
Réparation	4,792/10	4,791666667/10	3,035438596/10	Note totale de réparabilité	6/20
Remplacement des pièces/composants	4,59/10	8,226666667/10			

Figure 25 : Note de réparabilité de la cellule CSC du G2ELAB dans l'état actuel, avec des suppositions négatives

Nous avons cherché point par point à formuler des propositions pour augmenter la note, comme l'on peut le voir dans le tableau « A8_EvaluationReparabiliteCSCAmelioree ». Ces propositions sont les suivantes :

Tableau 5 : Propositions d'améliorations techniques de la CSC

CATEGORIE	PROPOSITIONS
ROBUSTESSE	• Ajout d'un fusible en entrée de la CSC
DOCUMENTATION ET IDENTIFICATION DU PRODUIT	• Ajout d'une identification claire de la cellule (modèle, type, fabricant, ...) sur le PCB • Ajout d'un QR code renvoyant à la documentation • Mise à disposition de la documentation par le laboratoire • Présence dans la documentation de la <i>bill of material</i> identifiant les composants • Présence dans la documentation des valeurs de références de VtransOut Vin et Vout en entrée et pour les défaillances • Ajout d'information autour des risques pour la santé, et les risques en cas d'auto-réparation (en l'occurrence pas de tension dangereuse) • Ajout d'un pictogramme indiquant la réparabilité du produit
DIAGNOSTIC	• Création de procédures de diagnostic à partir du travail entamé • Ajout de points de test en entrées et sorties, autour des composants faillibles (notamment en sortie du LDO). Les pins du transformateur sont suffisants pour tester la tension en ce point. • Ajout d'une LED en sortie de la CSC, s'allumant au seuil 18V. • Marquage des composants faillibles à tester par un point coloré sur le PCB
REPARATION	• Revoir les connexions inter-couches de PCA pour éviter d'avoir à dessolder la carte. • Changer de connecteur ou de type d'étain pour les headers
REMPLACEMENT DES PIECES ET MODELES ECONOMIQUE	• Négocier une disponibilité des pièces pendant 10 ans de la part des fournisseurs ou les stocker • Mettre en place et indiquer : ○ Des SAV et service de réparation interne ○ La présence de réparateurs professionnels agréés ○ La présence de réparateurs professionnels et associatifs • S'assurer de la proximité géographique entre les centres de réparation et les utilisateurs des produits, à l'échelle d'un même département • Fournir les données permettant de s'assurer du fonctionnement normal du système pour permettre sa requalification. • Utiliser un maximum de composants similaires entre cartes produites par le G2ELAB

En appliquant ces mesures, on observe une augmentation drastique de la note de réparabilité. Les mesures proposées ici sont toutes (hormis celle concernant la mise en place de centres de réparation) relativement simples à mettre en œuvre et peu impactantes pour les performances de la carte.

Catégorie	Sous totaux	Conception pour la réparabilité	Enjeux de documentation, marketing, gestion de projet et modèle	Totaux	
Robustesse du circuit face aux défaillances	3,704/10	3,703703704/10		Conception pour la réparabilité	7,603/10
Documentation & identification du produit	9,643/10	9,523809524/10	10/10	Enjeux de documentation, marketing, gestion de projet et modèle économique pour la réparabilité	9,55/10
Diagnostic	9,286/10	10/10	10/10		
Réparation	6,563/10	6,5625/10	8,649473684/10	Note totale de réparabilité	15/20
Remplacement des pièces/composants	8,399/10	8,226666667/10			

Figure 26 : Note de réparabilité de la cellule CSC du G2ELAB en imaginant la mise en place de mesures de réparabilité

Le tableau semble donc être un bon outil pour une première prise de conscience simple des enjeux de réparabilité dans une carte électronique. Il pourra être complété par le document synthétisant les recommandations en vue d'une conception électronique réparable.

DEVELOPPEMENT D'UNE PROCEDURE DE DIAGNOSTIC ET ROBUSTESSE DE LA CSC

En première partie, nous expliquons que le *Guide de Recommandations pour une conception électronique favorable à la réparation* proposait de servir de base pour la création de procédure de diagnostic et de documentation pour la réparation. Nous avons mis cela en pratique sur la CSC en créant un document donnant des *Eléments d'aide à la réparation de la carte électronique CSC* (disponible en annexe dans le document « A9_ProcédureRéparationCSC »).

TABLE DES MATIERES	
Introduction	2
Objectifs	2
Cadre	2
Fonctionnement Général de la cellule	2
Procédures préliminaires	4
Identification de la manière dont s'est déroulée la casse et type de panne	4
Mesures de diagnostic	5
Tests préliminaires basics.....	5
Mesure d'un point stratégique de la carte : la tension de sortie du transformateur	7
Mesures de composants sensibles.....	8
Source de la panne.....	10
Réparation.....	10
Dessouder un composant	10
Ressouder un composant.....	12
Requalification	12
En cas d'échec de la réparation	13
Documentations annexes.....	14
Schéma électronique simplifié de la carte et placement	14
Nomenclature (BOM).....	15

Figure 27 : table des matières du document donnant des éléments d'aides à la réparation

Au-delà de la simple mise à disposition d'informations courantes, nous avons développé une méthode de diagnostic sur la cellule. Cette méthode vient d'une étude expérimentale de cette dernière, suivant la méthode détaillée dans « *amélioration des procédures de diagnostic* ». L'enjeu était double : à la fois trouver des moyens fiables de diagnostiquer la cellule, mais aussi déterminer sa robustesse, pour répondre à la caractéristique de l'indicateur de réparabilité évaluant l'échelle de propagation de la panne à partir d'un composant sensible.

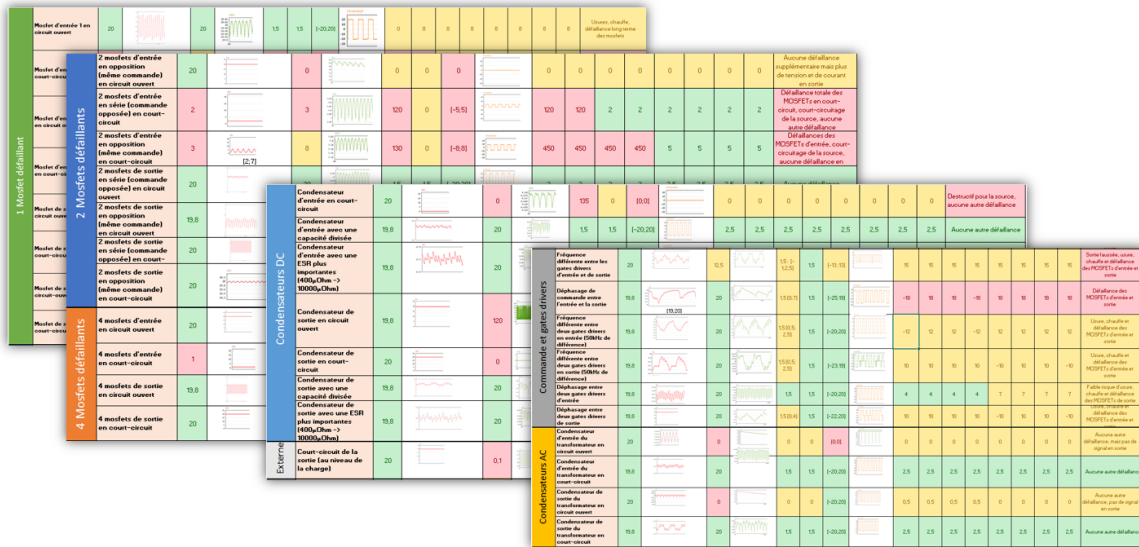


Figure 30 : aperçu du tableau des résultats des simulations de défaillances (cf. annexe A11)

Nous avons déduit du tableau un *Diagramme des défaillances et sources de défaillances possibles en fonction du diagnostic externe de la CSC* disponible en annexe 10. Ce diagramme permet de mettre en avant les conséquences de la défaillance d'un composant sur le reste de la carte et donc de répondre au critère de robustesse de l'indicateur de réparabilité. Il permet aussi de remonter à la source du problème à partir d'un diagnostic externe.

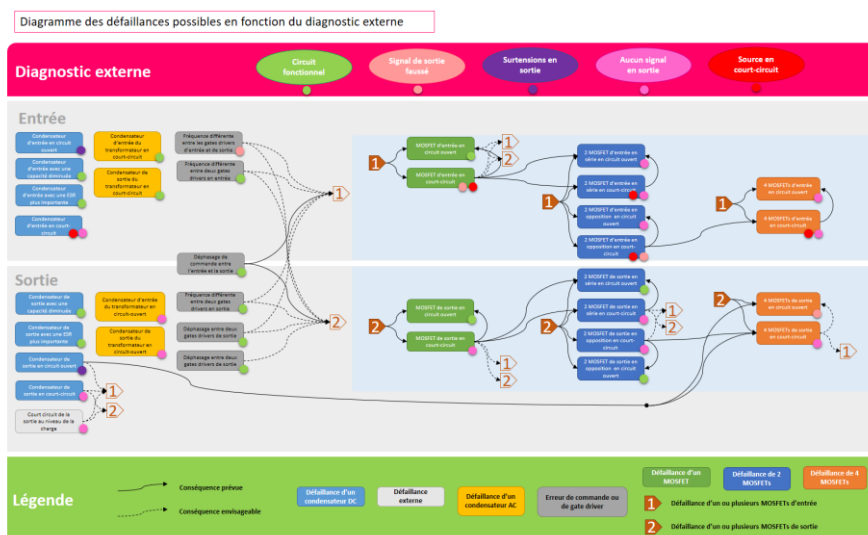


Figure 31 : Aperçu du diagramme des défaillances possibles en fonction du diagnostic externe de la CSC (cf. annexe A10)

En observant les données, on peut déterminer la mesure d'un signal comme étant une mesure-clé pour diagnostiquer l'état de la carte, de par son accessibilité et la quantité d'information fournie par cette dernière. En effet, les variations de la tension en sortie du transformateur reflètent bien les différentes défaillances du circuit.

On peut donc réaliser une table de diagnostic de la cellule en fonction de la valeur et de la forme d'onde de la tension en sortie du transformateur.

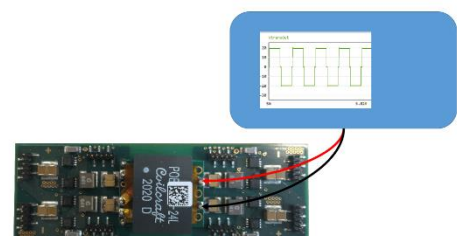


Figure 32 : mesure de $V_{transOut}$, la tension en sortie du transformateur

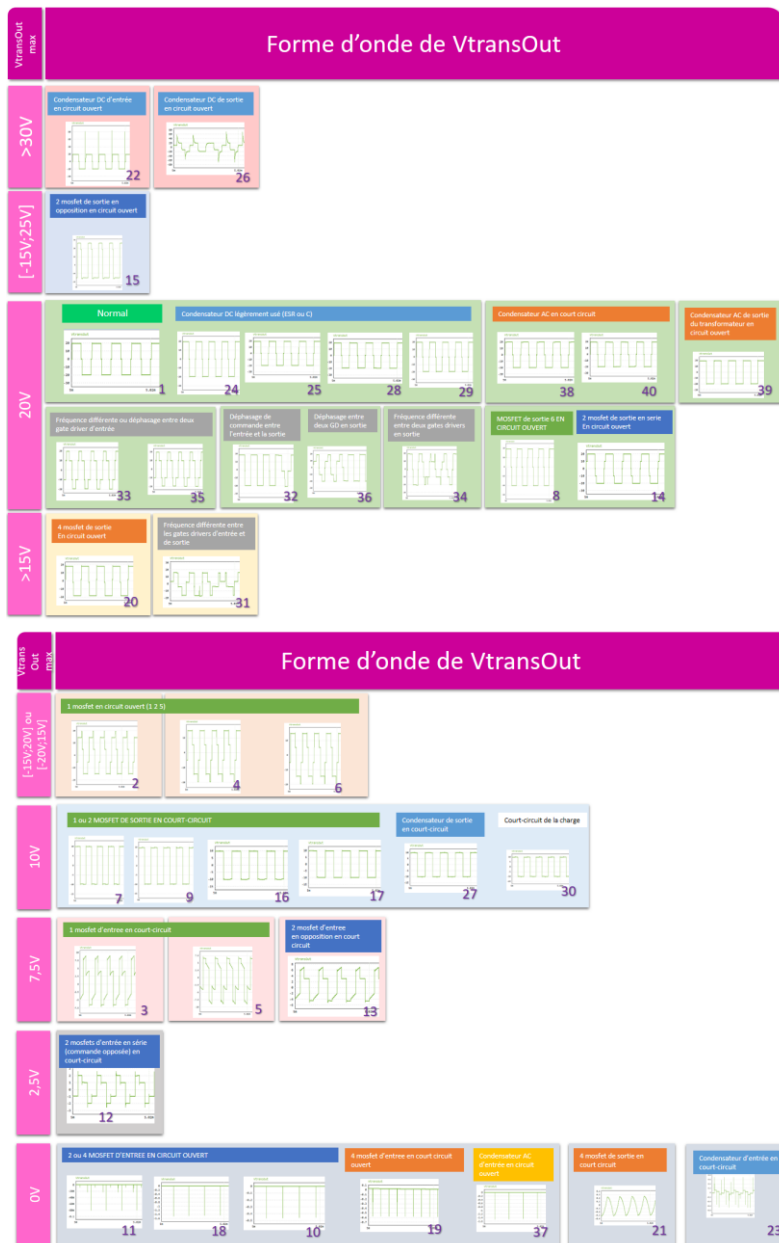


Figure 33 : Aperçu de la table de diagnostic de la cellule en fonction de la tension en sortie du transformateur (cf. annexe A10)

Il a ensuite fallu confirmer et affiner les résultats à l'aide d'une expérimentation pratique de certaines des défaillances, en ouvrant ou court-circuitant le circuit à la place des composants, pour observer les conséquences sur les autres composants. Nous n'avons pas testé les 40 défaillances par enjeu de coûts, de temps et de sécurité. Les mesures relevées sont les tensions et intensités d'entrée et de sortie, et le signal de tension en sortie du transformateur, ainsi qu'une image à la caméra thermique de la température de la carte. Des vidéos ont aussi été prises mais n'ont pas apporté d'informations utiles pour analyser les défaillances et leurs conséquences. Le protocole de l'expérience est disponible en annexe A10 et les résultats sont dans le tableau annexe A12_ExperienceDefaillanceReelsTab.

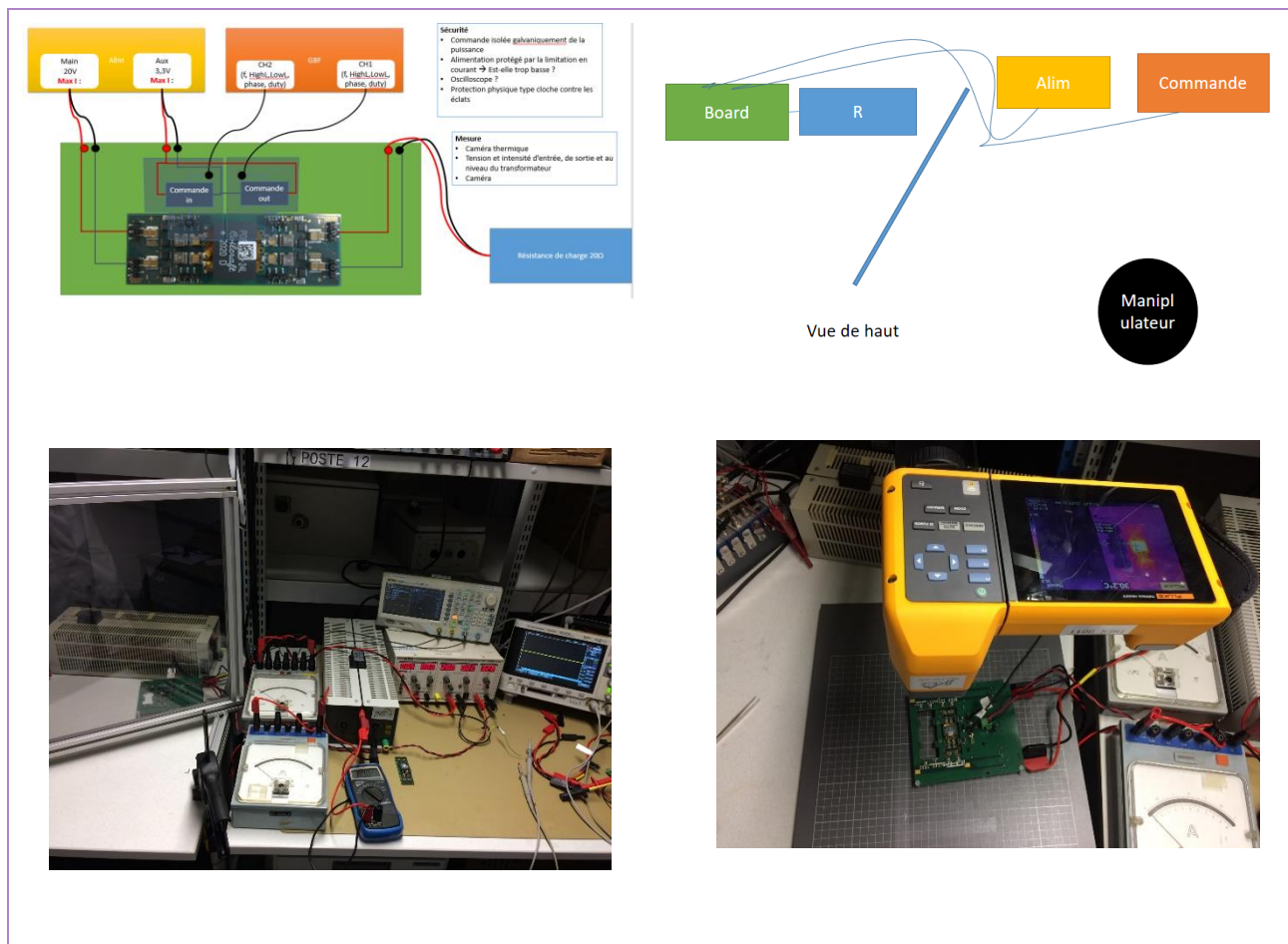


Figure 34 : illustrations de l'expérience de défaillance

Nom de l'expérience	Méthode de simulation de la défaillance	Vin	Vout	Iin	Iout	VrmsOut1 (20ms)	VrmsOut2 (5µs)	Valeurs T° max	Image thermique	Impacts	Notes
Témoin	Aucune défaillance	20	19,11	0,96	0,93			43,4		Fonctionnement normal	
LDO d'entrée en circuit ouvert	Déssouder le LDO d'entrée	20	0	0	0			3	31,2	Aucun	
LDO de sortie en circuit ouvert	Déssouder le LDO de sortie	20	17,5	0,85	0,85			1	62	Aucun, sortie plus faible	
Commande nulle sur un couple de MOSFETs d'entrée	Déconnecter le pin (INA) (1) d'un gate driver d'entrée	20	9,9	0,3	0,43			4	45,4	Aucun, sortie divisée par deux	
Commande nulle sur un couple de MOSFETs de sortie	Déconnecter le pin (INA) (1) d'un gate driver de sortie	20	18,6	0,925	0,9			5	49	Aucun	
Condensateur AC d'entrée en court-circuit	Déssouder Cac in et le remplacer par un fil	20	19,09	0,95	0,9			6	51,4	Aucun	
2 condensateurs AC d'entrée en court-circuit	Déssouder Cac in et le remplacer par un fil	20	19	0,95	0,9				51,5	Aucun	En théorie Cac absorbe le courant continu qui s'accumule dans le transformateur à cause de la légère imperfection du duty cycle de 50 %. Sans Cac, un courant s'accumule qui va finir par causer une destruction d'un composant. En pratique cette accumulation n'est pas constatée.
(fausse manip : align phase de tests correspond à un déphasage entrée-sortie) 2 condensateurs AC d'entrée en court-circuit	Déssouder Cac in et le remplacer par un fil	20	11 puis 0	2,5	0,5			7	226	Sortie à 230V puis à 0, surchauffe de l'ensemble de la carte, notamment les gate drivers et les bobines. Destruction de la diode bootstrap.	
(fausse manip : align phase)	Ressoudage de Cac et remplacement diode	20	11	0,275	0,5				140,6	Surchauffe générale de la carte, principalement les gate drivers et bobines.	Il y avait en fait un problème d'alignement de phase II en réglant les phases la cellule fonctionne mais une légère excitation apparaît. Teste à refaire.
Diode de sortie en court-circuit	Remplacement diode de sortie	20	2,9	0,32	0,2				250,3	Aucun, les propriétés de la diode de sortie sont respectées.	
Diode de sortie en court-circuit	Remplacement diode de sortie	20	2,9	0,32	0,2				250,3	Aucun	

Figure 35 : Aperçu des résultats de l'expérience de défaillance (cf. annexe A12)

Les résultats obtenus ont ensuite été utilisés pour affiner le *Diagramme des défaillances et sources de défaillances possibles en fonction du diagnostic externe de la CSC*, et la table de diagnostic de la cellule en fonction de la valeur et de la forme d'onde de la tension en sortie du transformateur.

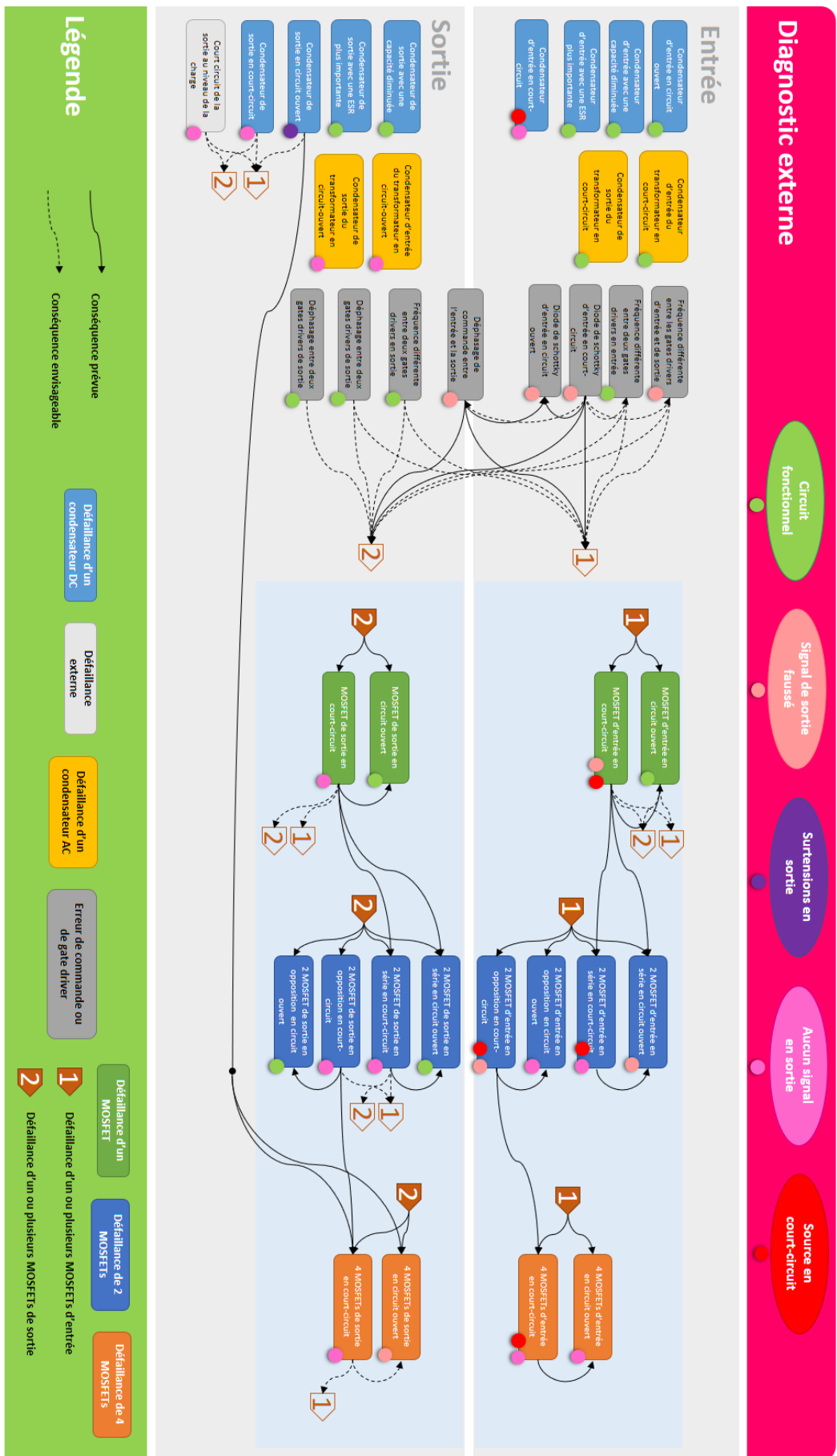


Figure 36 : Diagramme amélioré des défailances et sources de défailances possibles en fonction du diagnostic externe de la CSC (cf. annexe A10)

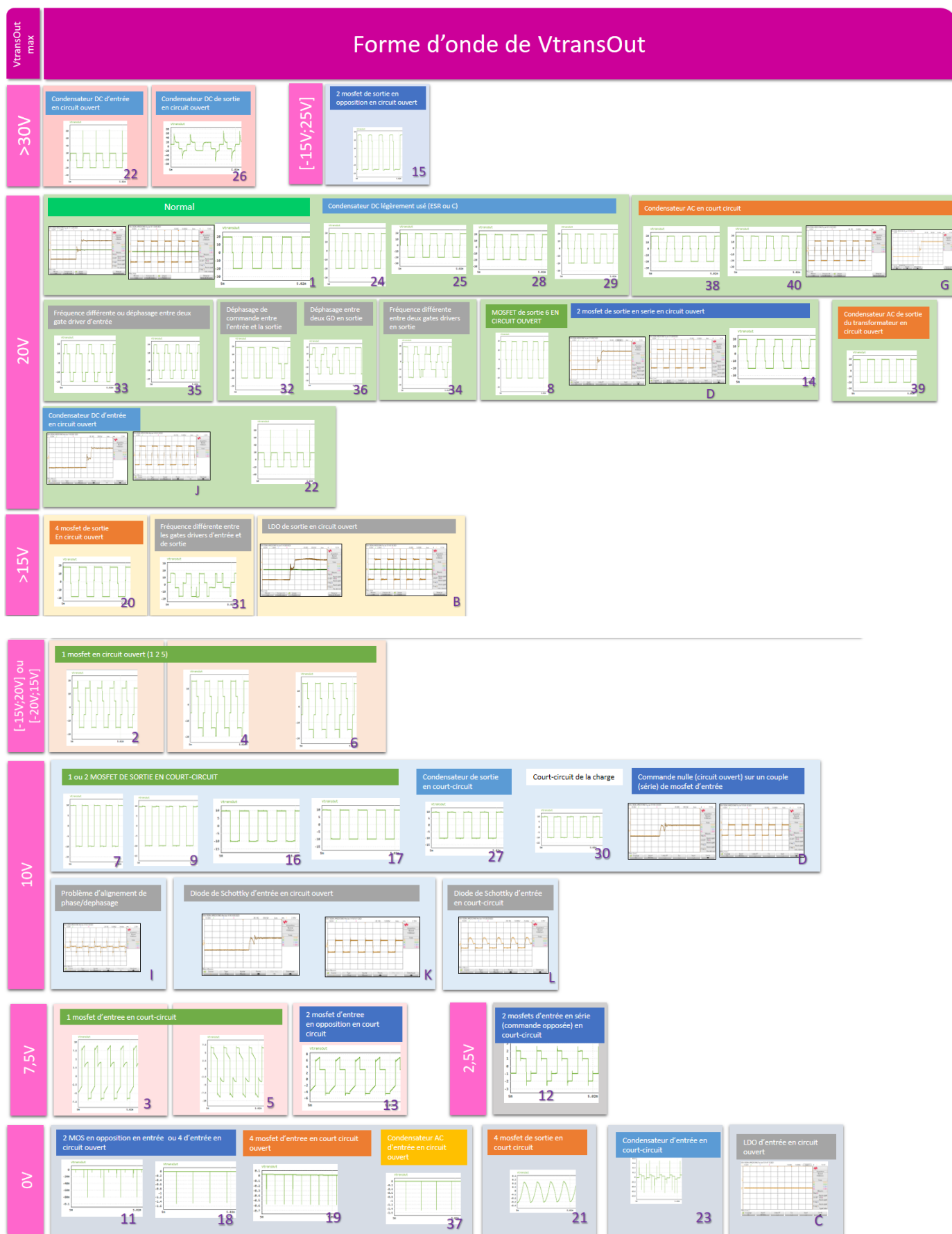


Figure 37 : Table améliorée des défaillances de la cellule en fonction des formes et valeurs d'onde de la tension en sortie du transformateur (cf. annexe A10)

Grâce à l'ensemble de ces documents, on peut construire des procédures de diagnostic, en ordonnant les mesures à effectuer par difficulté et par pertinence. On commence par des observations simples, puis des mesures de signaux externes, puis de VtransOut (tension en sortie du transformateur), et enfin des composants sensibles pour diagnostiquer la cellule. Ces procédures complètes sont disponibles dans le document « *éléments d'aides à la réparation de la carte électronique CSC* » disponible en annexe 9 sous le nom « *A9_ProcédureRéparationCSC* ».

BILAN DU PROJET

COUT GLOBAL DE VOTRE PROJET

Le coût global de mon projet est peu élevé étant donné que l'ensemble des livrables était des documents numériques. Les recommandations effectuées concernant les possibilités de reconception de la cellule CSC seront effectuées en pratique dans un autre projet, je ne peux donc pas estimer ce coût.

On peut donc estimer le coût de mon projet comme une somme du coût de ma rémunération (3685,56€ pour six mois) et celui des dépenses ayant eu lieu dans mon projet. Celles-ci comprennent principalement l'utilisation pour des expérimentations de deux cellules de conversion standards coûtant 200€ chacune en tant que prototype (leur production à l'échelle industrielle devrait plutôt coûter aux alentours de 30€ par cellule).

Si l'on ne compte pas les coûts concernant le lieu de travail (amortissement du matériel, chauffage, éclairage...), on obtient donc un coût total de projet de 4085,56€.

RESULTATS OBTENUS EN REGARD DU CAHIER DES CHARGES

Les trois livrables ont été réalisés de manière complète au cours du stage :

- Un guide de recommandations pour une conception électronique favorable à la réparation
- Un guide de conseils et de recommandations pour la réparation
- Un indicateur évaluant la réparabilité sous forme de tableau

Comme prévu, ces documents ont été construits en s'appuyant sur un travail de recherche documentaire et d'enquête auprès de réparateurs, et se sont appuyés sur une mise en application sur un cas pratique sur une cellule standard de conversion du G2ELAB.

On peut donc dire que les résultats ont été pleinement atteints, néanmoins on peut souligner des limites ou approfondissement qui seraient nécessaires :

- Le manque de données, de rencontre de réparateurs et de concepteurs sur ce type d'appareil, n'a pas permis de proposer des informations intéressantes sur la réparation et la conception en vue de la réparabilité d'appareils d'électronique de puissance de haute puissance type « Bus Bar ». Nous pensons que cela nécessiterait un travail à part entière, les enjeux de conception étant relativement différents.
- Un travail de relecture et d'évaluation des livrables par des experts de la conception et la réparation est nécessaire pour être certain de leur pertinence, notamment la pondération de l'indicateur de réparabilité. Ce travail a été entamé mais n'a pas été poussé plus loin par manque de temps (les réponses demandant un temps long à revenir et être traitées).
- Les recommandations de modification du design du cas d'application de la cellule standard de conversion, et de son power converter array (la carte électronique dans laquelle elle est combinée à d'autres cellules) n'ont pas été mises en pratique. Il aurait été intéressant de reconcevoir la cellule dans le but de la réparation mais cela demande plus de maturation, et nécessite d'être combiné à une modification de conception portant d'autres enjeux pour en valoir le coût. En effet, les modifications de design proposées sont mineures. Nous préférons laisser aux futurs concepteurs, le guide de conception en vue de la réparabilité et nos recommandations, pour qu'ils effectuent eux-mêmes au mieux cette mise en application sur la prochaine version de la cellule.

Tableau 6 : résultats obtenus par rapport au cahier des charges

Livrable	Attendus	Résultats obtenus
Guide pour une conception d'EP réparable	<i>Comment concevoir pour rendre la réparation accessible à un niveau faible</i> • Ergonomie de lecture, sommaire, etc. • Confrontation aux réalités des pratiques de conception • Différenciation Bus Bar et PCB • Conseils de conception mécanique quantifiés • Conseils de conception électronique quantifiés • Conseils de documentation pertinente pour aider le diagnostic, le désassemblage/réassemblage, la réparation, à trouver les pièces détachées, des ressources et des réparateurs • Méthode d'évaluation quantitative (indicateurs) • Bonnes pratiques	<i>Guide Recommandations pour une conception électronique favorable à la réparation</i> • Sommaire et organisation du guide selon le processus de conception • Recommandations n'entrant pas en oppositions avec la plupart des enjeux de conceptions (à l'exception de la miniaturisation, où un compromis doit être fait) • Conseils de conceptions mécaniques et électroniques, sans quantification particulière (c'est plus le rôle de l'indicateur) • Conseils de documentation pertinente pour aider le diagnostic, le désassemblage/réassemblage, la réparation, à trouver les pièces détachées, des ressources et des réparateurs • Méthode d'évaluation quantitative dans l'indicateur de réparabilité • Bonnes pratiques
Guide de réparation de l'EP	• Différenciation Bus Bar et PCB • Version professionnelle, version particuliers • Niveau de qualification requis en fonction des réparations • Pratiques de sécurité + sécurité de l'équipement • Explications des grandes familles de circuits pour les particuliers • Méthodes de diagnostic guidées & pannes courantes (hiérarchisation. Pré-diagnostic, composants critiques) • Outils courants	<i>Guide de conseils et recommandations pour la réparation</i> • Version PCB uniquement par manque de données pour les Bus Bar • Classement des procédures en termes de difficultés et de niveau de qualification requises • Pratique de sécurités précisées • Ebauche d'explication des grandes familles de circuits • Méthodes de diagnostic guidées & pannes courantes • Outils courants
Indicateur de réparabilité adapté à la conception en électronique de puissance	• Différenciation Bus Bar et PCB • Structure similaire à l'indice français/compatibilité • Vocation technique → informer le concepteur • Listes de critères complets et sans intersection • Quantifications précises des critères & méthodes d'évaluation quantitative (au maximum) • Grille de points équilibrée et seuil/niveaux minimum	<i>Tableau d'évaluation de la réparabilité</i> • Version PCB uniquement par manque de données pour les Bus Bar • Structure similaire à l'indice français, avec des critères supplémentaires • Permet de dégager des solutions techniques pour le concepteur • Listes de critères complets et sans intersection • Quantification précisée des critères et méthodes d'évaluation un maximum quantitative • Grille de points équilibrée, mais à faire revoir par plus d'experts de la réparation et l'électronique de puissance

IMPACT DU PROJET POUR LE LABORATOIRE

Mon travail de recherche exploratoire sur les enjeux en termes de réparabilité en électronique de puissance devrait avoir un impact intéressant pour mon projet de recherche, mes collègues, mon laboratoire, et peut-être à une échelle plus large. Il a permis de dégrossir ce sujet et de donner des recommandations pratiques pour atteindre des objectifs de réparabilité.

J'espère ainsi que mon travail aura un maximum d'utilité pour mes collègues du projet VIVAE cherchant des informations sur la réparabilité. Mon tuteur de stage souhaitant pérenniser ce travail, un sujet de thèse, lié au projet VIVAE et aux enjeux de circularité va être ouvert, et intégrera entre autres les enjeux de réparabilité en électronique de puissance. Mon travail pourra donc servir de base pour des recherches plus approfondies sur le sujet.

De manière plus large, le travail effectué va servir de base de recommandation pour les futures conceptions visant (ou non) la réparabilité. Je vais avoir l'occasion de présenter mon travail quelques jours avant ma soutenance pour diffuser les enseignements que j'ai pu en tirer. J'espère ainsi qu'il sera intégré à des processus de conception de chercheurs du G2ELAB.

De plus, les livrables, et notamment l'indicateur d'évaluation de la réparabilité va être publié sur le site du G2ELAB. Ces documents seront donc accessibles par n'importe qui cherchant des informations sur le sujet de la réparabilité, tout en conservant la modestie qu'ils doivent avoir : il ne s'agit là que d'un travail exploratoire de quelques mois, sur un sujet qui mériterait plusieurs années d'études.

Une partie des données récoltées intéresse également les réparateurs que j'ai pu rencontrer au sein de mon travail d'enquête.

Au-delà de cet apport en termes d'outils, j'espère avoir pu, grâce à ces mois de recherche, contribuer à ouvrir des passerelles entre les concepteurs et les réparateurs, mais aussi entre différents secteurs : industriels, académiques, associatifs, professionnels. Étant donné l'importance et la complexité des enjeux auxquels nous faisons face, d'un point de vue écologique, cette collaboration et ces liens sont nécessaires si l'on veut pouvoir trouver des solutions pertinentes, efficaces et impactantes face au ravage écologique.

CONCLUSION

Le travail de recherche effectué au cours de ces 6 mois de projet de fin d'étude au sein de l'équipe d'électronique de puissance du G2ELAB a permis de donner des clefs de compréhensions documentées pour comprendre les pratiques et méthodes de réparation en électronique de puissance, et pour cerner les pratiques de conceptions aidantes pour permettre à un appareil d'électronique de puissance d'être réparé. Le projet a été l'occasion de créer des outils (deux guides et un indicateur sous forme de tableau) qui pourront être utilisés pour faire avancer le secteur de l'électronique de puissance sur la voie de la circularité. Le cas pratique autour de la Cellule Standard de Conversion du laboratoire a permis de montrer l'utilité de ces outils, et de travailler à une meilleure réparabilité de ce convertisseur. Le cahier des charges du projet a pu être respecté de manière pleinement satisfaisante, malgré quelques écarts, conformes aux réalités pratiques du secteur et du cadre de mon travail de recherche. Ce travail pourra être approfondi, en précisant les procédures de réparation en électronique de puissance, en confrontant les documents créés à l'épreuve d'autres regards, et en explorant d'autres scénarios.

Je suis fier d'avoir pu contribuer au projet VIVAE à l'aide de mon tuteur, mes collègues et l'ensemble des réparateurs rencontrés, et très heureux, sur le plan personnel, d'avoir pu monter en compétences autour de l'électronique de puissance et de la réparation. J'ai particulièrement apprécié le cadre de ce stage permettant une approche systémique des enjeux qui le traversait, en complétant les réflexions autour des problèmes techniques rencontrés par des réflexions autour des enjeux psychologiques, sociaux, économiques et structurels.

Cela aussi été pour moi l'occasion de découvrir le monde de la recherche, tout en collaborant avec des industriels et en rencontrant de nombreuses personnes travaillant dans le secteur de la réparation. J'ai aussi pu mettre en place des pratiques de travail en autonomie, en m'organisant moi-même pour arriver à des résultats satisfaisants pour ma recherche durant les 6 derniers mois, avec l'aide de mon tuteur et de mes collègues que je remercie vivement, ainsi que toutes les personnes que j'ai rencontrées durant mon enquête.

J'ai donc l'impression de ressortir enrichi de cette expérience, qui m'aura apporté des compétences et connaissances utiles pour mes projets futurs.

- ADEME. (2018). *Benchmark international du secteur de la réparation*.
- ADEME. (2020). *Les Français et la réparation, perceptions et pratiques - Edition 2019*. Harris interactive.
- Ateliéphémère. (2016). *Guide pour apprendre à réparer ses appareils électroménagers et électroniques soi-même*. Saint-Etienne: Autoédition.
- Bracquené, E., Brusselaers, J., Dams, Y., Peeters, J., Schepper, K. D., Duflou, J., & Dewulf, W. (2018). *Repairability criteria for energy related products*. Ku Leuven.
- Dangal, S., Faludi, J., & Balkenende, R. (2022). Design Aspects in Repairability Scoring Systems: Comparing Their Objectivity and Completeness. *Sustainability*, 14.
- Falck, J., Felfemacher, C., Rojko, A., Liserre, M., & Zacharias, P. (2018). Reliability of Power Electronics Systems, an industry perspective. *IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS MAGAZINE*, 24-35.
- Fang, L., Lefranc, P., & Rio, M. (2023). Barriers for eco-designing circular Power Electronics Converters. *30th CIRP Life Cycle Engineering Conference* (pp. 287–292). Elsevier.
- Go, T., Wahab, D., & Hishamuddin, H. (2015). Multiple generation life-cycles for product sustainability: the way forward. *Journal of cleaner production - Elsevier*, 16-29.
- Greenpeace report. (2017). *Guide to greener electronics*.
- Gu, P., & Sosale, S. (1999). Product modularization for life cycle engineering. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 15, 387-401.
- HOP. (2019). *50 mesures pour une consommation et une production durable*.
- Liegeois, S. (s.d.). *Chaine youtube*. Récupéré sur Youtube: <https://www.youtube.com/@SimonLiegeoisOfficiel>
- Masclet, C., Azudie, J., & Boujut, J. (2023). Barriers and opportunities to repair in repair cafes. *Proceedings of the Design Society*, 3, 727-736.
- Maximin Blanc, Y. L.-P. (2019). Dual Active Bridge (DAB) pour la conversion continu-continu. *Techniques de L'ingénieur*, E3975 V1.
- Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires. (2023, juin 19). *Indice de réparabilité*. Récupéré sur [ecologie.gouv.fr](https://www.ecologie.gouv.fr/indice-reparabilite): <https://www.ecologie.gouv.fr/indice-reparabilite>
- Ramamoorthy, C. V. (1967). A structural theory of machine diagnosis. *Spring Joint Computer Conf.*, 743-756.
- Roussilhe, G. (s.d.). *Eau et puces électroniques, l'avenir climatique et industriel de Taiwan*. Récupéré sur gauthierroussilhe.com: <https://gauthierroussilhe.com/articles/eau-et-puces-electroniques-l-avenir-climatique-et-industriel-de-taiwan>
- Roussilhe, G. (s.d.). *Explication sur l'empreinte environnementale du numérique*. Récupéré sur gauthierroussilhe.com: <https://gauthierroussilhe.com/articles/explication-sur-l-empreinte-environnementale-du-numerique>
- Sonego, M., Echeveste, M. E., & Debarba, H. G. (2022). Repair of electronic products: Consumer practices and institutional. *Sustainable Production and Consumption* 30, 556-565.
- Song, Y., & Wang, B. (2013). Survey on Reliability of Power Electronic Systems. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL. 28, NO. 1, , 591-604.

Spareka. (s.d.). Récupéré sur Indice de réparabilité : <https://www.indicereparabilite.fr/>

Spiliotopoulos, C., Alfieri, F., La Placa, M., Bracquené, E., Laps, E., Van Moeseke, T., . . . Balkenende, R. (2022). *Product Repairability Scoring System: Specific application to Smartphones and Slate*. Luxembourg: Office of the European Union.

SystExt. (2021). *Controverse Minière*. Récupéré sur <https://www.systext.org/controverases-minieres>

Turkbay, T., Alix, T., Lembeye, Y., Perry, N., & Crebier, J.-C. (2023). Towards circular power electronics in the perspective of modularity. *Elsevier*.

Turkbay, T., Fang, L., Rio, M., Alix, T., Melot, J., & al., e. (2023). Évaluation de la démontabilité des convertisseurs électroniques de puissance pour une circularité améliorée. *SYMPOSIUM DE GENIE ELECTRIQUE SGE*. Lille: HAL Open Science.

Vanegas, P., Peeters, J. R., Cattrysse, D., Tecchio, P., & Ardente, F. (2018). Ease of disassembly of products to support circular economy strategies. *Resources, Conservation & Recycling*, 323-334.

Wang, H., Liserre, M., Blaabjerg, F., Rimmen, P. d., Jacobsen, J. B., Kvisgaard, T., & Landkildehus, J. (2014). 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, 97-114.

Yang, S., Bryant, A., Mawby, P., Xiang, D., Ran, L., & Tavner, P. (2011). An Industry-Based Survey of Reliability in Power Electronic Converters. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, VOL. 47, NO. 3, 1441-1451.

Yasushi Umeda, S. F. (2008). Product modularity for life cycle design. *CIRP Annals, Manufacturing technology* 57, 13-16.

ACRONYMES ET LEXIQUE

ANR – Agence Nationale de la Recherche

BOM – Bill of Material : Nomenclature. En conception de carte électronique, ce sera donc la liste des composants et l'ensemble des informations les concernant.

Bus Bar : Type de connecteur composé d'un conducteur métallique sur lequel on vient fixer (souvent à l'aide de vis) des composants, câbles, fils électrique. Par extension, cela design dans le langage courant du laboratoire les convertisseur haute puissance utilisant ce type d'architecture plutôt qu'un PCB.

CSC - Conversion Standardized Cell : cellule de conversion standard, module de convertisseur effectuant une conversion standard. Le modèle utilisé dans ce projet était un convertisseur DAB DC – DC 20V, bidirectionnel qui permettait de créer une isolation galvanique, et d'effectuer des conversions de courant et de tension selon s'il était combiné en parallèle ou en série.

DAB – Dual Active Bridge : Topologie bidirectionnel de conversion DC/DC de la CSC utilisée comme cas d'étude dans le projet, comportant deux onduleurs en ponts et un élément inductif (transformateur).

EP – électronique de puissance : champs de l'électronique porté sur les systèmes de traitement et de conversion de l'énergie électrique.

G2ELAB – Laboratoire de Génie électrique de Grenoble : laboratoire au sein duquel j’ai pu effectuer mon stage, situé sur la presqu’île à Grenoble, dans le bâtiment GreEn-ER.

PCA – Power Converter Array : Architecture de carte électronique permettant de combiner des CSCs en parallèle et/ou en série, pour atteindre les bons niveaux de tension et d’intensité.

PCB – Printed Circuit Board : Circuit imprimé, un des modèles de conception électronique utilisé en électronique de puissance.

Repair Café : Associations et ateliers d’autoréparation ou d’aide à la réparation, se voulant lieu de convivialité et de transmission de savoir auprès des particuliers.

VIVAE - InnoVative life cycles to retain the VAlue of power Electronics : projet de recherche ANR sur la circularité des convertisseurs d’électronique de puissance. Mon stage s’est fait dans le cadre de ce projet de recherche.

ANNEXE 1 : QUESTIONNAIRE D'ENQUETE UTILISE AUPRES DES REPARATEURS.

Fichier joint **A1_QuestionnaireReparateur**

ANNEXE 2 : SYNTHESE DU QUESTIONNAIRE

Fichier joint **A2_SynthèseEnquête**

ANNEXE 3 : GUIDE DE CONSEILS ET DE RECOMMANDATION POUR LA REPARATION

Fichier joint **A3_GuideConseilsRecommandationsReparation**

ANNEXE 4 : MEMOIRE REDIGE POUR LE MASTER TRANSITIONS ECOLOGIQUES DE L'IEP DE GRENOBLE, SUR L'ETAT DES LIEUX ET LES PERSPECTIVES DU SECTEUR DE LA REPARATION A GRENOBLE

Fichier joint **A4_MemoireIEP**

ANNEXE 5 : GUIDE DE RECOMMANDATIONS POUR UNE CONCEPTION ELECTRONIQUE FAVORABLE A LA REPARATION

Fichier joint **A5_RecommandationConceptionFavorableReparation**

ANNEXE 6 : TABLEAU INDICATEUR DE LA REPARABILITE D'APPAREILS D'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE (PCB)

Fichier joint **A6_TableauDEvaluationDeLaReparabilite**

ANNEXE 7 : APPLICATION DE L'INDICATEUR DE REPARABILITE SUR LA CELLULE STANDARD DE CONVERSION DAB ACTUELLE, DANS UNE HYPOTHESE PESSIMISTE

Fichier joint **A7_EvaluationReparabiliteCSC**

ANNEXE 8 : APPLICATION DE L'INDICATEUR DE REPARABILITE SUR LA CELLULE STANDARD DE CONVERSION DAB EN PROPOSANT DES SOLUTIONS POUR AMELIOREE LA NOTE DE CHAQUE CRITERE

Fichier joint **A8_EvaluationReparabiliteCSCAmelioree**

ANNEXE 9 : FICHIER AIDANT A LA REPARATION DE LA CSC DAB

Fichier joint **A9_ProcédureRéparationCSC**

ANNEXE 10 : ETUDE AUTOUR DU DIAGNOSTIC DE LA CSC, DIAGRAMME DES DEFAILLANCES ET SOURCES DE DEFAILLANCES POSSIBLES EN FONCTION DU DIAGNOSTIC EXTERNE DE LA CSC DAB

Fichier joint **A10_EtudeDiagnosticDefaillancesCSC**

ANNEXE 11 : TABLEAU DES RESULTATS DES SIMULATIONS DE DEFAILLANCE DE LA CELLULE CSC SUR PSIM

Fichier joint **A11_ExperiencesDefaillanceTab**

ANNEXE 12 : TABLEAU DES RESULTATS DES EXPERIENCES DE DEFAILLANCE DE LA CELLULE CSC EN MODIFIANT DIRECTEMENT UNE CARTE

Fichier joint **A12_ExperienceDefaillanceReelsTab**