Economie circulaire en électronique de puissance : opportunité de la conception Multi-cellulaire

Boubakr Rahmani

▶ **To cite this version:**

Boubakr Rahmani. Economie circulaire en électronique de puissance : opportunité de la conception Multi-cellulaire. Energie électrique. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2022. Français. NNT : 2022GRALT106 . tel-04051634

HAL Id: tel-04051634
https://theses.hal.science/tel-04051634

Submitted on 30 Mar 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

École doctorale : EEATS - Electronique, Electrotechnique, Automatique, Traitement du Signal (EEATS)
Spécialité : GENIE ELECTRIQUE
Unité de recherche : Laboratoire de Génie Electrique

Economie circulaire en électronique de puissance : opportunité de la conception Multi-cellulaire.

Circular economy in power electronics: Multi-cellular design.

Présentée par :

Boubakr RAHMANI

Direction de thèse :

Yves LEMBEYE Professeur des universités, UGA	Directeur de thèse
JEAN-CHRISTOPHE CREBIER Directeur de recherche, CNRS	Co-directeur de thèse
Maud RIO Maitre de Conférences, Grenoble INP	Co-directrice de thèse

Rapporteurs :

Nicolas PERRY
PROFESSEUR DES UNIVERSITES, ENSAM
Bruno ALLARD
PROFESSEUR DES UNIVERSITES, INSA de Lyon

Thèse soutenue publiquement le **15 décembre 2022**, devant le jury composé de :

Nicolas PERRY PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Arts et métiers	Président
Laurent DUPONT CHARGE DE RECHERCHE, Univ. Gustave Eiffel	Examinateur
Peggy ZWOLINSKI PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Grenoble INP UGA	Examinatrice
Bruno ALLARD PROFESSEUR DES UNIVERSITES, INSA de Lyon	Rapporteur

Invités :

Maud Rio
MAITRE DE CONFERENCE, UGA
Jean-Christophe Crébier
DIRECTEUR DE RECHERCHE, CNRS
Yves LEMBEYE
PROFESSEUR DES UNIVERISTES, UGA

*« **Eppur si muove !** » Galilée 1633*

Remerciements :

Une thèse avant d'être un diplôme universitaire, c'est une expérience humaine complète qui va du conflit à l'épanouissement ! Dans ces quelques lignes je vais essayer de citer l'ensemble, sans y parvenir réellement, des personnes que je souhaite remercier.

Je souhaite tout d'abords remercier les rapporteurs Pr. Bruno Allard et Pr. Nicolas Perry qui ont accepté de rapporter ma thèse, merci aussi à Laurent Dupont et Peggy Zwolinski d'avoir fait partie de la soutenance de thèse en qualité de jury. J'ai apprécié vos commentaires, remarques et questionnements qui ont permis d'avoir un échange riche.

J'ai aussi eu l'immense chance d'être encadré par un trio brillant, militant et surtout humain, je cite alphabétiquement pour ne pas révéler mes favoris : Jean-Christophe Crebier, Maud Rio et Yves Lembeye. Comment puis-je oublier nos premières réunions où on construisait sans le savoir ce qui allait devenir un nouveau champ de recherche en EP au G2Elab. Des réunions parfois difficiles mais j'étais tellement épanoui scientifiquement et c'est ce qui compte ! Je crains ne pas retrouver une équipe aussi passionnée comme vous. J'aurais aussi aimé être témoin davantage des pas de danse de JC et YL aux weekend à Autrans. Maud je te remercie particulièrement pour ta persévérance et ton effort d'intégration en EP, pour ton enthousiasme et ton positivisme contagieux. Jean-Christophe, je te remercie pour ta passion et ta rigueur en science que tu as su me transmettre. Et finalement Yves, le guide suprême, je venais vers toi chercher conseil et orientation et tu as toujours su trouver les bons mots même quand c'était difficile pour toi. MERCI.

Passons maintenant à toutes les personnes au sein du laboratoire, je remercie Hugot pour ces débats, André et Théo de m'avoir intégré à l'équipe, Antoine et Damien d'être de superbes collègues. Et à tous les nouveaux qui ont animé l'équipe, Clément, Goulven, Lucas, Jean-Pierre, Eloane, Pedro, Nicolas, Fadel, Fatima, Heitor… Je remercie aussi mes brillants stagiaires, Alexandre, Titouan, Mathilde et Mahéry. Je remercie chaleureusement Tugce et Li pour m'avoir aidé dans les derniers instants de la thèse. Je remercie Fabien de m'avoir permis d'enseigner à l'IUT.

Un énorme remerciement à Glauber De Freitas Lima, mon ami et mon camarade des difficultés avec qui j'ai passé des moments inoubliables.

Concernant mon cercle proche qui a contribué à ma survie mentale durant les 3 ans, Mon cœur Kelly qui m'a aidé à la fin à garder la motivation, mes très bons amis : Yoan, Mathilde, Aimie, Ling, Luka, Linn, Elena, Aurore, Flavien, Vivien, Yanis, Saphia, Julian, Johan, Marco, Katiana, tous mes amis Erasmus, de mon club de natation et de waterpolo ainsi que mes chers choristes du CUG et d'ailleurs, je vous aime !

Et finalement le plus grand des remerciements revient à ma famille, particulièrement à mes parents, Merci Maman de m'avoir transmis ta force, ton savoir vivre et tes valeurs ! Merci Papa d'être à l'écoute, d'avoir toujours les bons mots. Merci pour votre persévérance de l'école primaire chez les sœurs jusqu'à la thèse de doctorat, vous pouvez être fier vous êtes de réels héros. Je suis très chanceux de vous avoir ! Taha et Imane vous êtes mes anges et je vous aime énormément malgré l'éloignement, Bientôt vous aussi vous serez docteurs et je serai fier à mon tour.

La thèse m'a paru durer une éternité, une éternité que je renouvèlerai sans regrets si j'en avais les moyens.

Table des matières

Introduction générale 12

Chapitre 1 : La valeur résiduelle en électronique de puissance ... 20

1. Bref historique des indicateurs de la valeur 20
   - 1.1- Introduction 20
   - 1.2- Exemple de l'industrie automobile 22
   - 1.3- Indicateurs de la valeur résiduelle pour la prise de décision en fin de vie : exemple des batteries lithium ion 26
2. La valeur résiduelle en électronique de puissance 29
   - 2.1- La chaîne de valeur en électronique de puissance 29
   - 2.2- Approche générale 32
   - 2.3- Standardisation au service du calcul de la valeur résiduelle 36

Chapitre 2 : L'impact du désassemblage sur les composants 41

1. La physique de la défaillance 41
   - 1.1. Introduction 41
   - 1.2. Théorie de la fiabilité 42
     - 1.2.1. Les bases de la fiabilité 42
     - 1.2.2. Mécanismes de pannes et modèles d'accélération du vieillissement 45
     - 1.2.3. Tests de vieillissement accélérés 48
2. Les mécanismes du désassemblage des composants en EP 49
   - 2.1. Les défis de la réutilisation des composants 50
   - 2.2. Les étapes en vue de la réutilisation 53
     - 2.2.1. Les moyens de désassemblage 54
     - 2.2.2. Les défauts liés à l'extraction 58
3. L'impact du désassemblage sur les composants d'électronique de puissance 60
   - 3.1. Introduction 60
   - 3.2. Désassemblage des condensateurs électrolytiques CMS 61
   - 3.3. Désassemblage des transformateurs HF planaires CMS 68

Chapitre 3 : Estimation de la durée de vie restante avant désassemblage 79

1. Introduction 79
2. Suivi de la durée de vie des composants en électronique de puissance 81

2.1. Revue des méthodes de suivi de la durée de vie 81
2.2. Comparaison des méthodes de suivi de l'état de santé 83
3. Approche de suivi de la durée de vie restante d'un convertisseur de puissance 86
3.1. Introduction 87
3.1.1. Etapes principales de la méthode de suivi de la durée de vie 88
3.1.2. Modèles de fiabilité 91
3.2. Plan d'expérience 96
3.2.1. Description du banc d'essais et des variables mesurables 96
3.2.2. Traitement d'images et extraction de la température du composant 102
3.3. Modélisation statistique de prédiction du comportement thermique du convertisseur 105
3.3.1. Introduction à la modélisation statistique 105
3.3.2. Modélisation des résultats du traitement des images thermiques 108
3.4. Prédiction en temps réel de la durée de vie restante 112
3.4.1. Algorithme de calcul de la durée de vie résiduelle 112
3.4.2. Tolérance du calcul par rapport au pas de calcul 117
4. Cas d'étude 119
4.1. Description du cas d'étude 119
4.2. Résultats et analyse 125
5. Conclusion 126
Conclusion générale de la thèse 128
Perspectives 130
Références 131

Liste des tableaux

Tableau 1 :Les types de tests de vieillissement. 48
Tableau 2 : Les différentes méthodes d'assemblage. 54
Tableau 3 : Les différents effets à long et court termes dus au désassemblage. 59
Tableau 4 : Les caractéristiques du condensateur électrolytique choisi [55]. 65
Tableau 5 : Les indicateurs de vieillissement et leur dispersion initiale. 66
Tableau 6 : Les caractéristiques du transformateur coilcraft choisi. 68
Tableau 7 : Les dispersions des valeurs des indicateurs de vieillissement à chaque mesure. .. 74
Tableau 8 : Différentes méthodologies de suivi d'état de santé de composants actifs en électronique de puissance. 81
Tableau 9 : Comparaison des différentes méthodologies d'estimation de la température pour le suivi d'état de santé de composants électroniques. 85
Tableau 10 : Les modèles FIDES de taux de défaillance pour certains composants du convertisseur DC/DC DAB. 92
Tableau 11 : BOM du DAB choisi pour l'expérimentation. 97
Tableau 12 : spécifications électriques et thermiques du convertisseur DAB du G2Elab 98
Tableau 13 :Plages de variation des variables des points de fonctionnement électriques et thermiques du convertisseur. 98
Tableau 14 : Listes des appareils de mesure, les variables mesurées et les détails de mesure. 101
Tableau 15 : Représentation sous la forme d'un tableau de la base de donnée. 104
Tableau 16 : Comparaison des trois modèles de régression de la température par rapport au point de fonctionnement par leurs erreurs quadratiques et le R2 (les cases noircies sélectionnent le modèle pour chaque composant). 110
Tableau 17 : Comparaison des différents capteurs de courants 119
Tableau 18 : Temps de réponse thermique des composants dans le DAB. 121
Tableau 19 : les différents types de mémoire. 123

Liste des figures

Figure 1 : Les métaux principaux en électronique, leur localisation et leur risque d'approvisionnement du plus important (en rouge) au moins risqué (vert) [2] 13
Figure 2 : Calendrier des faits marquant depuis 1968 de prise de conscience au niveau international des impacts environnementaux causés, notamment vis-à-vis de la perturbation climatique, par les sociétés industrielles 14
Figure 3 : Les différents mix énergétiques correspondants aux quatre scenarios sociétaux élaborés lors de l'étude de l'ADEME [9] En ordonnée : déploiements des filières éolienne, photovoltaïque, et nucléaire pour les 5 scénarios de Transition 2050 (parc installé, en GW) . 16
Figure 4 : Besoin annuel de quelques métaux selon les scénarios de transition énergétique établis dans le rapport de l'ADEME en 103 tonnes [9] 17
Figure 5 : Les compositions chimiques des composants d'électronique de puissance, une certaine hétérogénéité est notable, à titre illustratifs, les carreaux verts correspondent aux matériaux les plus recyclables jusqu'au noir pour les éléments les moins recyclables dans ces systèmes. 18
Figure 6 : La variation de l'OPEX et le CAPEX 20
Figure 7: La dépréciation de la valeur du modèle Renault Kangoo boite de vitesse manuelle 5 portes, valeurs issues de la cote Argus [30]. 23
Figure 8 : L'amortissement de la valeur résiduelle par rapport au temps d'usage et des différentes réparations à t1,t2 et t3. 25
Figure 9 : Scénario de fin de vie d'une batterie de véhicule électrique pour une seconde vie dans une application stationnaire 27
Figure 10 : Évolution du SOH d'une batterie d'un véhicule électrique et les seuils de tolérance pour chaque application (60% pour l'automobile, 20% pour le stationnaire, ce seuil dépend du contexte : de la pression sur les matériaux, des risques d'approvisionnement, des avancées technologiques). 27
Figure 11 : Évolution de la valeur le long du cycle de vie du convertisseur, l'encadré orange étant la phase de fin de vie, première vie ou fin d'usage du convertisseur. 31
Figure 12 : Principales étapes de diagnostic en fin de vie d'un convertisseur et valeurs résiduelles créées 32
Figure 13 : Les grandes étapes de calcul de la valeur résiduelle durant le diagnostic d'un convertisseur 34
Figure 14 : Exemple d'évolution de la valeur résiduelle d'un composant dans un convertisseur de puissance selon les choix réalisés au cours du temps, ponctué d'étapes de diagnostic. 35
Figure 15 : Les différents modules constituant un convertisseur PEBB 36
Figure 16 Un exemple de convertisseur PEBB et son assemblage étape par étape en différents modules [39] 37
Figure 17 : Un exemple d'un convertisseur MMC trois phases à deux bras symétriques [54] 38
Figure 18 : Gauche : image d'une cellule standard de conversion unique (CSC) basée sur la topologie DAB. Droite : image d'un réseau de convertisseurs de puissance (PCA), composé de 16 CSCs [59]. 39
Figure 19 : Cycle de vie général 42
Figure 20 : Taux de fiabilité, la courbe dite "courbe en baignoire" 44
Figure 21 : Les causes principales de vieillissement des composants en électronique de puissance, la couleur violette correspond à la température et cyclage thermique [7]. 45

Figure 22 : Les niveaux de vibration en fonction de leurs fréquences. 48
Figure 23 : Les acteurs de la chaine de valeur de la réparation et leurs besoins [18]. 50
Figure 24 : A gauche un profil de refusion classique, à droite le schéma du la structure d'un four à refusion avec les différents secteurs qui correspondent aux différentes étapes du profil de refusion. 56
Figure 25 : Abaques de choix des alliages de brasure [37]. 57
Figure 26 : Abaque de choix des flux 58
Figure 27 : Exemple de l'évolution de la fiabilité d'un transformateur HF avec ou sans désassemblage. 59
Figure 28 : La distribution des défauts au niveau des composants dans un convertisseur de puissance standard [41]; 61
Figure 29 : Photo et Schéma d'un condensateur électrolytique aluminium à montage en CMS [43]; 62
Figure 30 : Zoom sur le cercle rouge de la figure précédente, l'interface cathode-anode [44]; 62
Figure 31 : Modèle théorique d'un condensateur; 63
Figure 32 : Causes, mécanismes et effets de défaillance d'un condensateur. 64
Figure 33 : Protocole expérimental des passages au four des condensateurs CMS 65
Figure 34 : Evolution de ESR et C Pour les condensateurs CMS à l'aluminium par rapport à un nombre de passages au four à refusion. 66
Figure 35 : Evolution de la moyenne de l'ESR et de C des condensateurs CMS après 10 passages au four. 67
Figure 36 : Vue éclaté d'un transformateur planaire Coilcraft. 69
Figure 37 : Schémas électrique équivalent et de principe d'un transformateur magnétique. .. 70
Figure 38 : Causes, mécanismes et effets des défauts pour des transformateurs planars. 71
Figure 39 : Les étapes du plan expérimental, 10 passages au four entre chaque mesure à l'impédance mètre et le test de décharges partielles. 72
Figure 40 : Les schémas de principe et équivalent électrique d'une décharge partielle située dans une cavité de l'isolant. 73
Figure 41 : Le schéma simplifié du montage de mesure des décharges partielles [65]. 73
Figure 42 : Résumé des différentes mesures effectuées sur les transformateurs après chaque période de cyclage thermique. 74
Figure 43 : Inductance magnétisante, inductance de fuites, capacité primaire-secondaire et tension de seuil de décharge partielle de l'isolant par rapport au nombre de cycle de refusion. 75
Figure 44 : Illustrations non-exhaustives de défauts visibles visuellement sur un transformateur vieilli. 76
Figure 45 : Les grandes étapes de diagnostic d'un système électronique; 80
Figure 46 : capteurs thermiques IR. 83
Figure 47: Images IR d'un convertisseur DC/DC opérant à différents points de fonctionnement (Caméra Fluke, à température ambiante de 23°C); 89
Figure 48 : Le convertisseur DAB DC/DC développé au G2Elab à gauche la face recto, à droite la face verso; 89
Figure 49 : Le processus de collecte de données et du calcul afin d'obtenir la MTBF à partir du vécu de chaque composant. 91
Figure 50 : Cartographie de la MTBF en % de durée de vie par rapport à la température de jonction maximale d'un cycle et le nombre de cycles thermiques. 95
Figure 51 : Structure classique d'un DAB (Dual Active Bridge) 97

Figure 52 : Vue de dessus du banc de test et de mesure de la température et des points de fonctionnement du convertisseur..... 99
Figure 53 : Vue en coupe du banc de test et de mesure de la température et des points de fonctionnement du convertisseur (emplacement de la caméra thermique et des différents capteurs). 99
Figure 54 : Pièces pour la construction du banc de test ; En haut une vision sur plusieurs angles de toutes les pièces imbriquées, en bas à gauche l'entonnoir de maintien de la caméra thermique, en bas à droite le canal d'air avec la fenêtre de la dimension du convertisseur DAB, le tout mis dans le banc de test où la température et la vitesse de l'air sont contrôlées..... 100
Figure 55 : Schématisation thermique simplifiée du package du MOSFET. 102
Figure 56 : Schématisation thermique simplifiée, à gauche de l'induction et à droite celle de transformateur. 102
Figure 57 : Protocole de capture d'image avec la caméra thermique utilisée dans l'expérimentation. 103
Figure 58 : Image IR recto verso du convertisseur avec détection automatique des principaux composants. 104
Figure 59 : Protocole expérimental complet résumé. 105
Figure 60 : La température de surface du PCB complet (moyenne des valeurs des pixels de température du convertisseur entier) par rapport au courant de sortie du DAB..... 106
Figure 61 : La base de données complète pour l'inductance uniquement, le nuage de points de la température maximale de surface de l'inductance par rapport au point de fonctionnement et à la vitesse de l'air, pour une température ambiante de 23°C 108
Figure 62 : Vérification en amont de la « propreté » des données et leur compatibilité à la logique physique avec un échantillon de données..... 109
Figure 63 : En Bleu les données expérimentales des températures de l'inductance à plusieurs points de fonctionnement différents, en jaune les points issus des modèles statistiques. (Cette figure est à titre observationnel)..... 111
Figure 64 : Explication du calcul pas à pas de la contrainte thermique accumulée et depuis ce calcul l'obtention de la MTBF équivalente à chaque accumulation. 113
Figure 65 : Profil de mission simple périodique. 114
Figure 66 : A gauche la fiabilité par rapport aux heures de fonctionnement pour un profil de mission périodique, à droite la différence entre la fiabilité avec et sans monitoring. 114
Figure 67 : Profil de mission simple périodique à 2 phases. 115
Figure 68 : A gauche la fiabilité par rapport aux heures de fonctionnement pour un profil de mission périodique à 2 phases, à droite la différence entre la fiabilité avec et sans monitoring. 115
Figure 69 : Profil de mission simple périodique à 3 phases de durées différentes. 116
Figure 70 : A gauche la fiabilité par rapport aux heures de fonctionnement pour un profil de mission périodique à 3 phases de durées différentes, à droite la différence entre la fiabilité avec et sans monitoring. 116
Figure 71 : Un profil de mission fictif vs. un profil de mission réaliste avec de l'inertie thermique. 117
Figure 72 : En haut un profil de mission en puissance périodique sur 100h, la courbe bleue est un profil de mission sous-échantillonné, En bas la fiabilité de l'inductance du DAB selon chaque profil de mission. 118
Figure 73 : Le banc de test du monitoring sur un convertisseur DC/DC DAB..... 121
Figure 74 : A gauche l'évolution de la température du régulateur de tension en fonction du temps sous différents points de fonctionnement, à droite l'évolution de la température de

l’inductance en fonction du temps pour différents échelons de pertes produits par différents points de fonctionnement 122
Figure 75 : Schéma de synthèse des étapes du monitoring mettant en jeu la carte de mesure et le microcontrôleur PIC. 124
Figure 76 : En haut la durée de stockage mémoire possible en années par rapport au pas de calcul, en bas l’erreur d’estimation de la MTBF par rapport à celle faites avec le pas de changement de phase réel. 126

Liste des abréviations

EP	Electronique de puissance	**CEM**	Compatibilité électromagnétique
DEEE	Déchets d'équipements électriques et électroniques	**RLT**	Remaining lifetime
VR	Valeur résiduelle	**CSC**	Cellule standard de conversion
CAPEX	capital expenditure	**MTBF**	Mean time between failure
OPEX	operational expenditure	**FA**	Facteur d'accéleration
SOC	State of charge	**CMS**	Composants montés en surface
SOH	State of health	**PCB**	Printed circuit board
BMS	Battery management system	**SAC**	Etain-Argent-Cuivre
HF	Hautes fréquences	**IGBT**	Insulated Gate Bipolar Transistor
ESR	Equivalent series resistance	**IR**	Infrarouge
EPR	Equivalent paralel resistance	**DAB**	Dual active bridge
CD	Circuit de découplage	**ANOVA**	Analysis of variance
IHM	Interface homme-machine	**PIC**	Peripheral Interface Controller
MOSFET	transistors à effet de champ à semi-conducteur en oxyde de métal	**SSC**	Système de suivi de convertisseur

Introduction générale

Les modèles économiques linéaires conçus à la base pour un monde ayant une infinité de ressources se heurtent à la réalité des impacts sur les écosystèmes du système Terre que leurs extractions toujours croissantes et nécessitant d'avantage d'énergie génère [1]. Les modes de consommation des sociétés modernes nécessitent un nombre de métaux et de minerais conséquents et cela dans tous les domaines : le transport, les technologies de l'information, l'agriculture, la médecine, les infrastructures, etc. Il y a quelques siècles l'humanité n'utilisait principalement que quatre métaux (Fer, Cuivre, Argent et Or). Au fil du temps, les métaux qui étaient, par le passé, utilisés pour des domaines tels que l'aviation et le spatial, se sont vu mobilisés dans des applications tous publics. Ainsi, presque l'intégralité du tableau périodique des éléments est couverte pour subvenir à nos modes de vie fortement liées à l'activité industrielle et suivant l'évolution des technologies.

Dans le cas des équipements électriques et électroniques, la pénurie de 2021 des composants électroniques venant d'Asie a révélé la dépendance de l'industrie aux ressources correspondantes et un risque de défaut d'approvisionnement croissant. Ce risque est principalement lié à la diminution alarmante des concentrations de métaux et de minerais dans les mines depuis quelques années. Extraire une quantité équivalente nécessite toujours d'avantage de ressources, y compris d'énergie. Mais cette situation est aussi causée par les conflits géopolitiques, les intérêts politiques des nations et la multiplication des domaines industriels ayant besoin d'une même ressource. La figure ci-dessous recense les métaux principaux utilisés dans les équipements électriques et électroniques, leurs principales provenances et leur criticité d'approvisionnement. Les matériaux en rouge sont les métaux considérés par l'Union européenne comme présentant le risque de générer un défaut d'approvisionnement depuis 2020 (cela ne signifie pas toujours qu'ils sont rares), les métaux en jaune constitueront un risque potentiel dans quelques années. Les éléments en vert ne présentent aucun risque d'approvisionnement pour l'instant. Notons que les métaux référencés sur la carte ne présentaient pas de risque important il y a quelques décennies. L'Union européenne a récemment inscrit 30 substances comme étant à très haut risque d'approvisionnement incluant des métaux indispensables pour l'électronique comme le cobalt, le silicium, le lithium, le tantale.

A cette liste s'ajoutent les « terres rares » telles que le néodyme et le dysporium utilisés dans les aimants permanents dans les moteurs des véhicules électriques ou dans les générateurs des éoliennes.

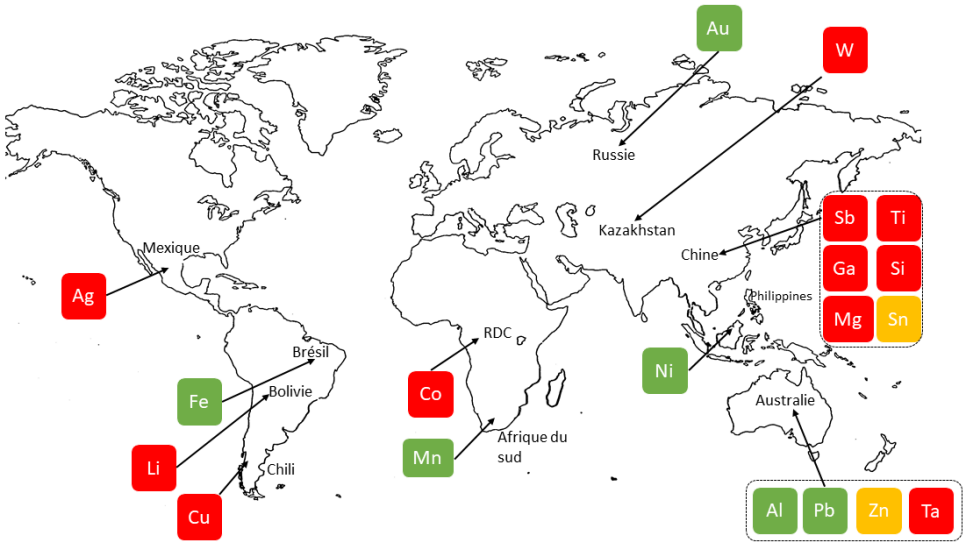


Figure 1 : Les métaux principaux en électronique, leur localisation et leur risque d'approvisionnement du plus important (en rouge) au moins risqué (vert) [2]

Les procédés d'extraction de ces métaux, principalement monopolisés par la chine à 72% en moyenne, sont des procédés polluants utilisant des procédés hydrométallurgiques qui rejettent une grande quantité des métaux lourds, d'acides et d'éléments radioactifs. Les gaz à effet de serre provenant des machines d'extraction, de purification et de production de ces métaux, s'ajoutent à ces émissions dans l'air.

Ces rejets ont pour conséquences directes la pollution des nappes phréatiques et une atteinte aux écosystèmes fragiles et à la biodiversité. Les premières conséquences apparentes de nos modes de production sur l'environnement font apparaitre une conscience des « limites planétaires » [3] dont les phénomènes du « dérèglement climatiques » dans les domaines de la recherche du journalisme, de la politique et, plus récemment, de la population après les différents chocs pétroliers consécutifs (1973, 1980, 2008), et les différents faits environnementaux marquants [4]. Le calendrier dans la figure ci-dessous recense un bref historique des premiers lanceurs d'alertes et des premières initiatives prises par l'OCDE, le G7 ou l'Union européenne.

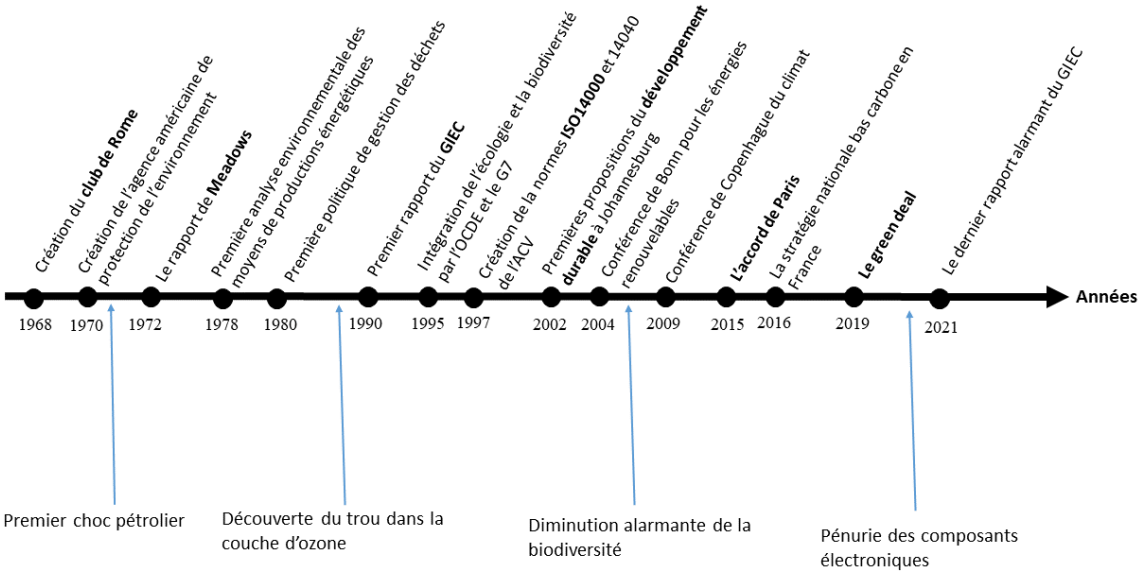


Figure 2 : Calendrier des faits marquant depuis 1968 de prise de conscience au niveau international des impacts environnementaux causés, notamment vis-à-vis de la perturbation climatique, par les sociétés industrielles

Les bouleversements systémiques du fonctionnement des écosystèmes qui conditionnent l'habilité de la Planète pour les êtres vivants, dont les humains font partie, sont tels aujourd'hui, que les Nations unies engagent des programmes internationaux visant à réduire l'inertie des changements en cours, et, si possible, empêcher ces dérèglements de franchir des seuils (« tipping point ») au-delà desquels les effets seront davantage problématiques [5]. Parmi les Objectifs du Développement Durable (ODD) [6], « décarboner les modes de production de l'énergie » est un appel à l'introduction de l'électrique pour transformer les modes de production et de consommation de nos sociétés.

Selon cette vision (controversée) d'une transition énergétique engagée par les Nations unies, la finitude des métaux à l'horizon 2050 pour certaines technologies d'éolien et de panneaux photovoltaïques, va poser problème.

Le cuivre est le matériau « socle » de toutes les technologies permettant la transition énergétique. Les composants électriques n'échappent à ce matériau : les câblages, les rotors, les enroulements de transformateur, etc.

La réserve mondiale est estimée à 870 millions de tonnes, ce qui peut être considéré comme étant relativement abondant comparé à d'autres métaux. Mais cela n'exclut pas le potentiel de pénurie accru par des niveaux de consommation élevés, l'industrie utilise à peu près 20 millions de tonnes de cuivre issu d'extraction minière, ce qui laisserait 40 années d'abondance sur ce modèle.

Le photovoltaïque et l'éolien à eux seuls ont un besoin de cuivre estimé à 6,5 tonnes par MW installé. Ce qui est équivalent à 5 millions de tonnes pour un niveau de développement de 650GW/an pour le photovoltaïque et 450GW/an pour l'éolien jusqu'à 2050.

Le développement du secteur photovoltaïque est limité aussi par les réserves d'argent estimées à 560 000 tonnes avec une consommation annuelle de 27 000 tonnes. Les cellules photovoltaïques cristallines qui constituent la grande partie du marché solaire utilisent 10% de la demande mondiale en argent par an. Or la « transition énergétique » dépend de l'usage de ces métaux pour atteindre les objectifs de neutralité carbone en 2050 voté en 2016 lors de la cop 21. Questionnant avec la société civile les plans de décarbonation en France, l'ADEME a publié en novembre 2021 un rapport d'étude consacré à l'élaboration de scénarios de décarbonation de la société [7]. Il en résulte 4 scénarios principaux.

Le premier scénario appelé « génération frugale » : prône la sobriété et le développement de nouvelles pratiques de consommation par la limitation individuelle et collective, sans impliquer de moyens de captage et de stockage de carbone encore incertain. La diminution de l'extraction des ressources apparait nécessaire.

Dans le deuxième scénario appelé « coopération territoriale » : le partage se généralise au niveau de l'habitation, du transport, etc. Une meilleure cohésion territoriale pour augmenter l'efficacité des systèmes de production et une réindustrialisation progressive est nécessaire.

Le troisième scénario appelé « technologies vertes » : vise à développer les énergies renouvelables et à introduire plus de numérique pour permettre d'augmenter l'efficacité de l'utilisation énergétique et matérielle.

Le quatrième et dernier scénario est « le pari réparateur » : où les modes de vie ne changent pas et les sociétés font confiance à leurs capacités à réparer et gérer les systèmes sociaux et écologiques endommagés par des moyens matériels.

La figure ci-dessous illustre les moyens de production et les puissances à installer pour chaque scénario. Ce rapport de l'ADEME était précurseur au rapport de RTE [8] de juin 2021 présentant des scénarios de mix de production d'électricité française envisageables selon des logiques ou stratégies plus ou moins sobres de réduction des quantités produites, utilisées et des émissions de dioxyde de carbone équivalent, associés à des moyens de production de ces énergies de différentes natures (nucléaire, hydraulique, charbon, gaz naturel, éolien, photovoltaïque, hydrolien, …).

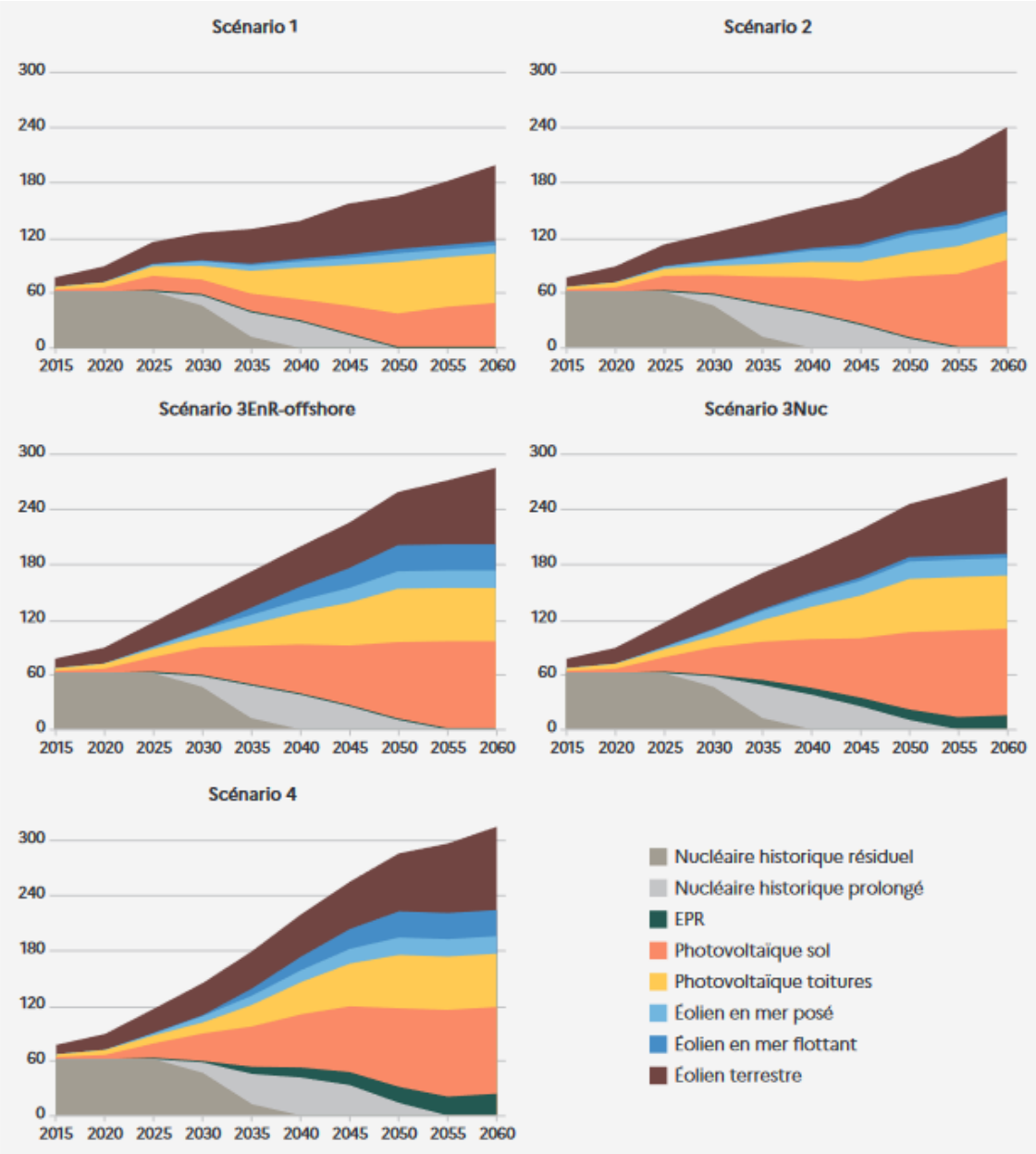


Figure 3 : Les différents mix énergétiques correspondants aux quatre scenarios sociétaux élaborés lors de l'étude de l'ADEME [9] En ordonnée : déploiements des filières éolienne, photovoltaïque, et nucléaire pour les 5 scénarios de Transition 2050 (parc installé, en GW)

Tous les scénarios sont confrontés à des besoins élevés en métaux déstabilisant ainsi leur mise en œuvre. Prenons l'exemple des graphite, nickel, cobalt, lithium et silicium. La figure ci-dessous montre les besoins annuels de ces métaux pour les différents scénarios de l'ADEME :

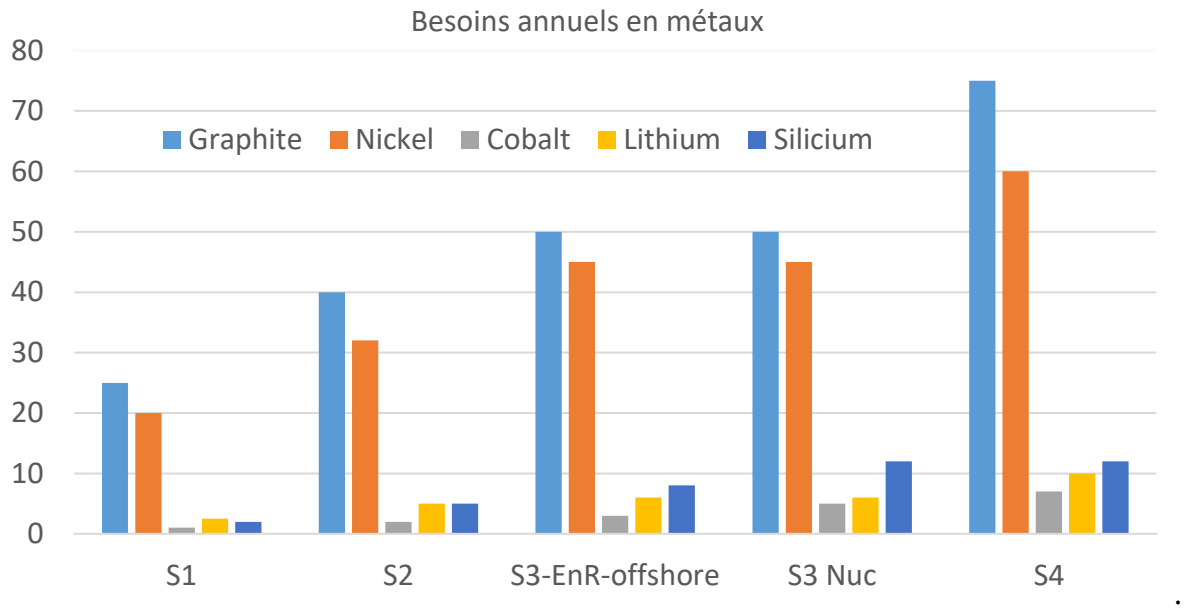


Figure 4 : Besoin annuel de quelques métaux selon les scénarios de transition énergétique établis dans le rapport de l'ADEME en 103 tonnes [9]

Le pari de la décarbonation et les besoins grandissants en métaux se heurte donc aux futures pénuries de métaux, que ces pénuries soient physiques par la rareté ou géopolitique par la volonté de souveraineté des nations mondiales, selon les stratégies suivies.

Quelques soient les scénarios envisagés, les leviers pour affronter le problème de la finitude des métaux reposent sur :

1. La sobriété et la rupture de notre approche de consommation.
2. L'accroissement de la circularité et la création de chaînes de valeurs soutenables.

Ces travaux de thèse traitent du deuxième levier de la circularité pour le domaine de l'électronique de puissance qui est une partie importante des technologies permettant la transition énergétique, et ce, quel que soit le scénario envisagé.

Pour pouvoir arriver à agir sur le deuxième levier, il faut agir sur la conception de ces convertisseurs de puissance et sur sa chaine de valeur du berceau au tombeau. Pour l'instant l'intégration de critères de circularité dans les étapes de conception est quasi inexistante. Les paramètres clés de conception restent pour l'instant le rendement du convertisseur, sa fiabilité, son cout général et sa densité massique ou volumique. (Voir annexe 1 pour une explication pas à pas d'une méthode de conception en EP)

Les convertisseurs de puissance sont des systèmes hétérogènes : au niveau des composants dimensionnés, des méthodes d'assemblage suivies, du niveau d'intégration sélectionné, des stratégies de commandes prises, etc. À chaque application correspond un convertisseur spécifique et il n'existe pas de méthodologie universelle de conception. Il existe cependant des standards et des bonnes pratiques guidant le concepteur dans ses étapes de conception.

Pour résumer, en électronique de puissance, il existe plusieurs familles de composants qui utilisent presque l'intégralité des métaux du tableau périodique. Ci-dessous un exemple de convertisseur et les principaux métaux, plastiques et résines qui constitue chaque famille de composant :

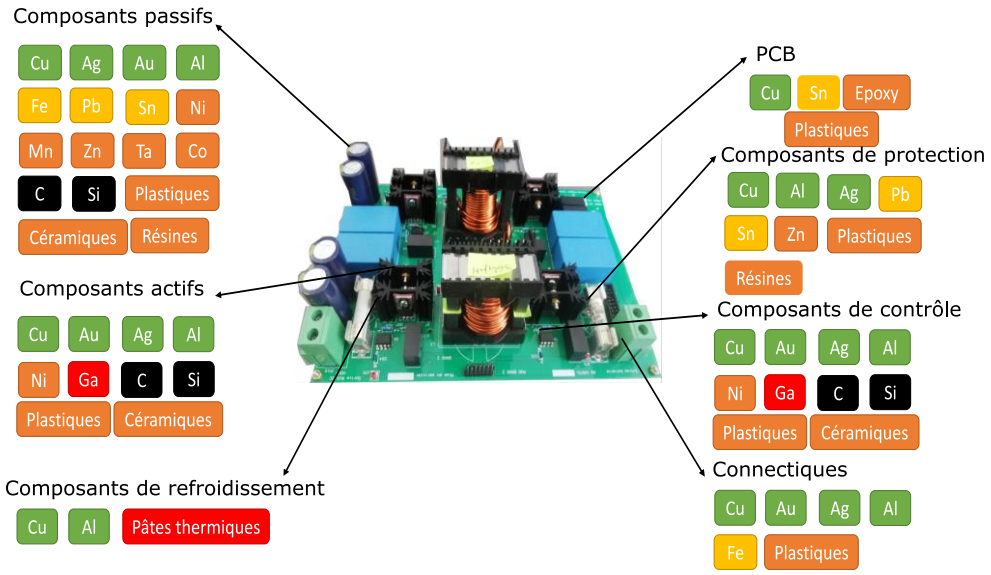


Figure 5 : Les compositions chimiques des composants d'électronique de puissance, une certaine hétérogénéité est notable, à titre illustratifs, les carreaux verts correspondent aux matériaux les plus recyclables jusqu'au noir pour les éléments les moins recyclables dans ces systèmes.

Lorsque ces convertisseurs arrivent en fin de vie fonctionnelle, une gestion optimale de leur recyclage se heurte à plusieurs difficultés : la difficulté de tri puis le recyclage de fractions de composants ayant une composition métallique (et plastique) hétérogène. Des problématiques concrètes de gestion et de valorisation se posent aux acteurs des filières de traitement des Déchets Electriques Et Electroniques (DEEE). Chaque alliage et métaux n'est pas (encore) valorisé de manière optimale.

Avant que le système ne soit broyé, l'une des difficultés rencontrées par les acteurs intervenants en amont de la chaîne de valorisation, est d'effectuer un diagnostic de ces systèmes fortement hétérogènes, lorsqu'ils sont défectueux. Il s'agit ensuite de proposer un schéma adapté de de maintien, de réutilisation, de réparation ou de reconditionnement, des convertisseurs (spécifiquement).

Ainsi connaître la valeur résiduelle des composants permettrait à cet acteur clé diagnostiquant l'état du convertisseur, d'orienter au plus optimal, son scenario de fin de vie.

Ainsi, la <u>question de recherche</u> posée dans ces travaux de thèse est la suivante :

Comment aider/supporter/outiller techniquement l'électronicien pour calculer puis conserver la valeur fonctionnelle, environnementale et économique des convertisseurs de puissance pendant plusieurs cycles d'usage ?

- **L’organisation de la thèse :**

Afin de répondre à la question de recherche, ces travaux de recherche investissent le champ de la valeur résiduelle dans d’autres contextes que celui de l’électronique de puissance. Puis il s’agira de proposer des indicateurs d’aide à la prise de décision pendant le diagnostic en fin d’usage des convertisseurs de puissance. Cette étude est divisée en trois parties:

1. **La première partie** présente le contexte, analyse des exemples de calcul de la valeur résiduelle dans des domaines connexes à l’électronique de puissance dans le génie électrique. In fine, cela permet **de proposer une formulation de la valeur résiduelle** des composants électroniques ou sous-systèmes de convertisseurs le long de leurs usages. Les paramètres nécessaires pour calculer cette valeur seront détaillés dans les deux parties suivantes, avec une étude spécifique sur deux paramètres cruciaux.
2. **La deuxième partie** traite d’un des **paramètres** de la valeur résiduelle qui est le **taux de réutilisation** d’une fraction dans un ensemble électronique (le taux de réutilisation est le nombre de fois qu’un composant peut-être réutilisé). Dans cette partie, il s’agit de proposer des exemples de **protocoles expérimentaux de mesure du taux de réutilisation grâce à des essais permettant d’évaluer le vieillissement induit par les procédés d’extraction du composant en vue sa de réutilisation**.
3. **La troisième partie** traite d’un second paramètre de la valeur résiduelle qui est **la durée de vie utile restante**. Dans cette partie il s’agit de proposer une **méthode de surveillance de la durée de vie restante des composants** afin d’alimenter la formule de la valeur résiduelle et prendre ainsi des décisions sur la fin de vie du composant.

Le but de ces 3 parties est **d’argumenter** la prise de décision du choix des scénarios de fin de vie des composants d’électronique de puissance par le calcul de leurs valeurs résiduelles à un certain instant de leur vie, par des concepteurs en électronique, en se focalisant sur deux paramètres clés, mais en laissant des perspectives de recherche ouverts sur d’autres paramètres clés.

Chapitre 1 : La valeur résiduelle en électronique de puissance

1. Bref historique des indicateurs de la valeur

La valeur résiduelle est un concept économique utilisé largement par les macro-économistes pour la prise de décision. Dans cette partie une définition de la valeur résiduelle est donnée dans 1.1 et deux exemples d'applications dans l'automobile et les batteries sont illustrés dans 1.2 et 1.3.

1.1- Introduction

Le coût associé à un composant est communément divisé en deux catégories : le coût intrinsèque (CAPEX) et le coût opérationnel (OPEX). Le CAPEX apparaît simplement par l'acquisition d'un composant alors que l'OPEX n'apparaît que pendant l'utilisation ou les différentes phases de transports non inclues dans les étapes de production gérées par le constructeur.

La figure 1 montre la possible variation des différents coûts d'un équipement et les paramètres affectant ces coûts.

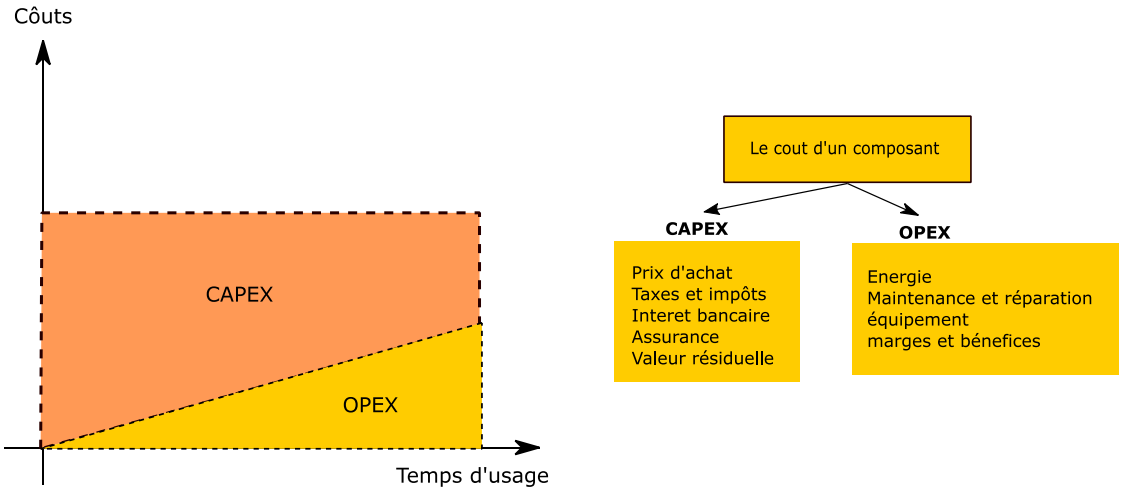


Figure 6 : La variation de l'OPEX et le CAPEX

Le coût OPEX d'un équipement s'accumule au fil du temps ce qui réduit l'intérêt de possession de ce dernier jusqu'à ce qu'il devienne économiquement plus intéressant de se débarrasser du

produit que de le garder. La durée entre la vente et l'obsolescence est aussi appelée « la vie utile » ou « la vie économique ».

Le coût à un instant t devient une valeur résiduelle, selon l'économiste Mitchell précisé dans les travaux de thèse de Lucko [10] « la valeur résiduelle d'un équipement est le montant monétaire auquel il peut se vendre à un certain point de sa vie ».

Le principe de valeur résiduelle se retrouve dans plusieurs domaines d'ingénierie, mais aussi en médecine de catastrophe avec le principe de la « valeur de la vie » qui est une notion économique qui attribue une valeur monétaire à une vie humaine qui permet par la suite d'évaluer l'efficacité des stratégies politiques de prévention [11]. L'économiste Jacques Drèze a créé le concept de capital humain et a formulé la valeur résiduelle humaine ainsi :

$$VR = \frac{CAP}{r} \qquad (1.1)$$

VR étant la valeur résiduelle, CAP combien les organismes de santé sont prêts à payer pour une réduction de r de la probabilité de décès. Par exemple si un individu malade consent à payer 2000 euros pour réduire sa probabilité de décès de 1/10000 alors sa valeur résiduelle est de 5 millions d'euros. Ce concept a été amplement généralisé par Dublin et Lotka (1947) [12]. Selon cette théorie, la valeur d'un individu est la différence de sa contribution à la société et à ses dépenses pour lui-même. Selon cette définition la valeur résiduelle d'une vie est obtenue de la façon suivante dans l'équation 2 :

$$V_{ia} = \sum_{n=a}^{\infty} (Y_n - C_n) P_a^n \, (1+r)^{-(n-a)} \qquad (1.2)$$

Où V_{ia} est la valeur de l'individu i à l'âge a, Y_n est le revenu brut de l'individu à la période n, C_n est la consommation à la période n, P_a^n est la probabilité à l'âge a de vivre jusqu'à l'âge n et r est le taux d'actualisation selon la situation du pays où l'individu vit. Cette valeur permet de prendre des décisions médicales quand le flux de patients est grand et les moyens médicaux sont insuffisants. C'est une valeur macroéconomique qui ne concerne pas le cas spécifique d'un individu, mais plutôt le cadre de choix sur un groupe d'individus.

Dans d'autres domaines qui ne se heurtent pas à l'éthique de la vie humaine, mais qui sont pour autant inscrits dans le courant économique du 20e siècle, tel le génie civil, le principe de valeur résiduelle est communément utilisé pour donner une valeur monétaire à un bâtiment et ainsi faire le choix entre sa destruction pour en construire un nouveau ou sa rénovation. Cette notion fut développée en 2002 par Kastens [13] qui propose une formule simplifiée pour la compréhension :

$$VR = K.\left(P.\frac{1}{\sqrt{\frac{Temps\ d'occupation}{1000}}} - C_R \right) \qquad (1.3)$$

VR étant la valeur résiduelle, K un facteur d'ajustement, P le prix initial d'achat du bien et C_R le coût de la rénovation.

Ces notions de valeurs sont encore utilisées par les macroéconomistes pour prendre des décisions d'investissement dans la remise à l'état de plusieurs produits et infrastructures tels un parc automobile, d'anciens sites de production ou encore un cargo de transport de fret.

Cette notion qui est apparue après la Seconde Guerre mondiale avait pour but d'évaluer l'effort nécessaire pour retrouver la fonction des infrastructures et du patrimoine, jadis, détruits ou détériorés. Ainsi la valeur résiduelle ne concernait que les systèmes et produits ayant des montants d'investissements initiaux (CAPEX) très importants tels les grands chantiers gouvernementaux.

Le marché de l'occasion a pris de l'importance dans nos sociétés industrielles où la valeur fonctionnelle de biens et de services est monétarisée, ainsi la notion de valeur résiduelle s'est élargie au fil des années à d'autres systèmes tout publics, dont l'emblématique secteur industriel de l'automobile et les systèmes électroniques. Les deux parties suivantes traitent deux exemples de produits communs pour lesquels la théorie de la valeur résiduelle a déjà été développée.

1.2- Exemple de l'industrie automobile

Dans le domaine de l'automobile, un véhicule est considéré de seconde main en France quand ce dernier dépasse six mois à la date de livraison et a parcouru plus de 6 000km [14]. Depuis les 30 glorieuses, le marché de l'automobile a connu une domination des véhicules d'occasion sur les véhicules neufs, par exemple en mars 2011, plus de 510 000 véhicules d'occasion ont été immatriculés contre seulement 257 000 voitures neuves [15]. Cette pratique a commencé bien avant grâce à la cote Argus publiée depuis 1927 par Paul Rousseau dans le magazine automobile « L'argus ». L'Argus a pour but de donner aux véhicules d'occasion une valeur de référence dans le marché français à destination des professionnels et du grand public. La « Cote Argus » sert de valeur monétaire de référence de négociation pour les professionnels de l'automobile pour effectuer des reprises de véhicule à un particulier. Cette cote peut aussi être utilisée comme base de négociation pour l'achat et la vente d'un véhicule d'occasion entre particuliers correspondant à un prix indicatif de transaction. Une autre application de « la cote Argus » est dans le domaine de l'assurance ; les assureurs l'utilisent pour quantifier les réparations nécessaires sur un véhicule après un incident ou pour fixer une fourchette de prix de rachat s'il n'est pas réparable. Au fil des années « la cote Argus » s'est étendue à de différents engins : agricoles, caravanes, autocars …

Au début de sa création, « la cote Argus » se traduisait par un *court moyen Argus* qui donnait une valeur correspondant à un véhicule en état de marche ayant un contrôle technique en cours de validité exempt de toute anomalie, indexée par le kilométrage parcouru par le véhicule et le

type de véhicule. Cette valeur était couplée à une courbe de dépréciation établie en fonction de multiples paramètres du marché, du contexte économique et fiscal. Cette courbe était ajustée à mesure que les employés de l'Argus obtenaient les chiffres de vente du véhicule, des retours clients.

Actuellement, la cote Argus est devenue personnalisée, ajustée au caractère propre de chaque véhicule. Par exemple, si le kilométrage parcouru est inférieur à un standard, la cote Argus est majorée. Si le propriétaire a fait ajouter au véhicule des équipements supplémentaires en option, cela majorera la valeur du véhicule. Si pendant l'examen technique obligatoire, les techniciens révèlent un état inférieur au standard Argus, la cote Argus est dépréciée sous forme de frais supplémentaires de remise en état d'estimation.

Il existe plusieurs études sur l'amortissement de dépréciation de la valeur de plusieurs gammes de véhicules en France, mais aussi dans d'autres pays [16] [17] [18]. Selon Boiteux, « la pratique la plus courante en matière d'amortissement consiste à affecter forfaitairement une durée de vie n à chaque équipement et à amortir chaque année un $n^{ième}$ de la valeur CAPEX initiale » [19].

Dans le marché de l'automobile, la dépréciation annuelle est beaucoup plus importante au cours des premières années de vie qu'elle ne l'est au cours des dernières [19]. Et cela est révélé par les différentes valeurs Argus publiées depuis 1927 pour différents modèles.

Ci-dessous figure 2 une dépréciation de la valeur de la Renault Kangoo publiée par le magazine Argus [20].

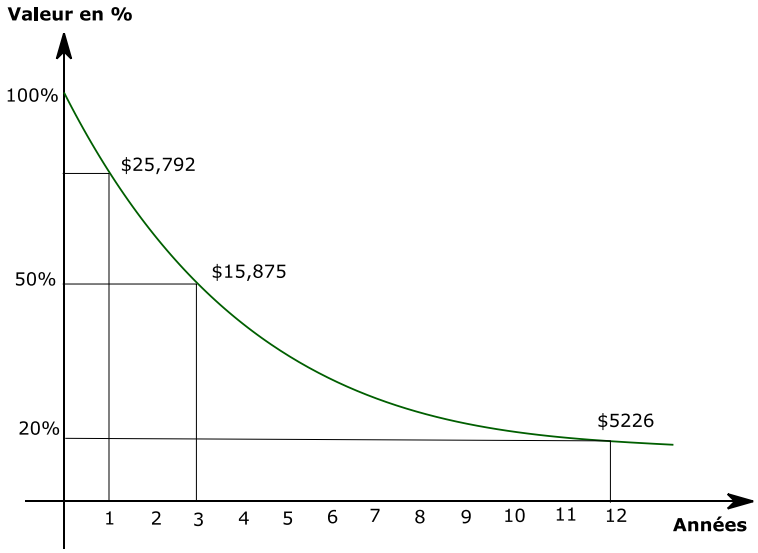


Figure 7: La dépréciation de la valeur du modèle Renault Kangoo boite de vitesse manuelle 5 portes, valeurs issues de la cote Argus [30].

Il existe d'autres indicateurs de valeur résiduelle des véhicules d'occasion dans d'autres pays. Dans les pays de l'ALENA (l'accord de libre-échange nord-américain), un manuel similaire à l'Argus appelé « the Kelley Blue book » [21] est couramment utilisé par les grands constructeurs automobiles américains pour évaluer la dépréciation d'un modèle de véhicule

d'occasion. Cette indication assume l'hypothèse que la valeur d'un véhicule décroît en loi exponentielle. Ce qui donne la formule ci-dessous :

$$V(t) = V_0 e^{-kt} \qquad (1.4)$$

Où V_0 est la valeur initiale du véhicule neuf et k est le taux de dépréciation du véhicule qui est lié au modèle du véhicule. Le « Kelley Blue Book » étend la définition de la valeur résiduelle dans le cas où le véhicule a connu durant sa vie des procédés de réparation ou de remanufacture. Si par exemple le véhicule a été acheté à t_0, nous supposons que le véhicule a connu n réparations d'une valeur de $R_1, \dots, R_n$. La valeur résiduelle - vue par l'assureur ou le concessionnaire - du véhicule d'occasion revendu au temps t devient [22] :

$$VR(t_0, t) = V(t_0) e^{-k(t-t_0)} - \sum_{t_0 \leq t_j \leq t} R_j \qquad (1.5)$$

La valeur résiduelle pendant une procédure de vente et achat après la réparation du véhicule vue par le possesseur du véhicule est comme suit :

$$VR(t_0, t) = V(t_0) e^{-k(t-t_0)} + \sum_{t_0 \leq t_j \leq t} R_j \qquad (1.6)$$

La valeur résiduelle d'un véhicule (sauf véhicule de collection) ne fait que chuter après son achat à t_0 jusqu'à ce que sa valeur soit totalement perdue. Dans ce cas si le propriétaire souhaite se séparer de son véhicule, celui-ci est mis en décharge ou bien revendu dans d'autres circuits de revente non officiels.

On peut schématiser cette dépréciation de la valeur d'un véhicule par rapport à la formule 5 comme suit dans la figure ci-dessous.

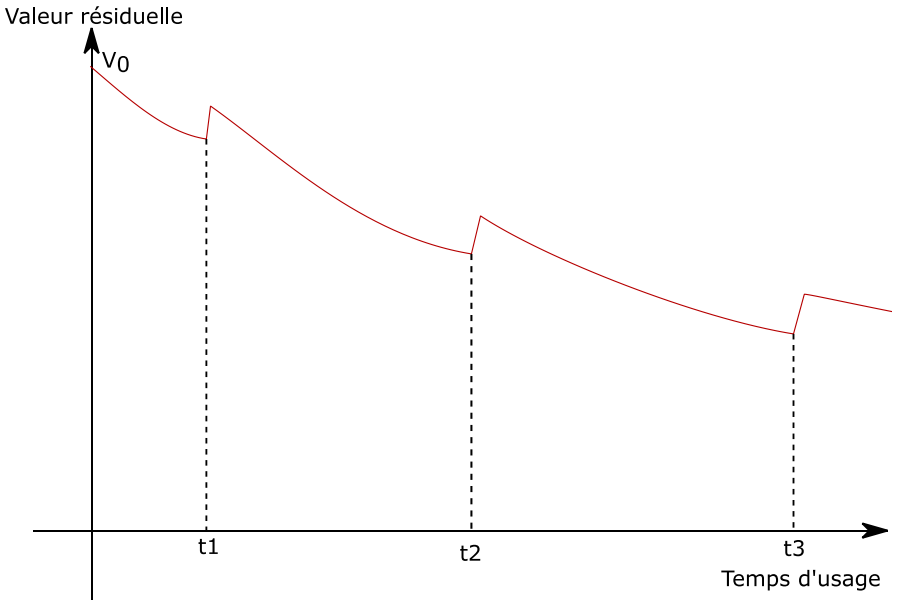


Figure 8 : L'amortissement de la valeur résiduelle par rapport au temps d'usage et des différentes réparations à t1,t2 et t3.

Les véhicules électriques, n'ayant pas encore suffisamment de retours d'expérience et n'étant pas encore démocratisés il n'existe pas encore de cote officielle, pourtant, ils n'échapperont potentiellement pas à la décroissance de leurs valeurs avec le temps des véhicules thermiques comme étudié dans cette étude prédictive de la valeur de plusieurs modèles (Nissan Leaf, Renault Zoe, …) [23].

Le marché des véhicules d'occasion est déjà amplement développé et établi [24] [25]. Il existe également toute une filière structurée autour de nombreux acteurs. Les indicateurs de valeurs sont adoptés par tous les acteurs ce qui permet de créer un rapport de confiance entre les revendeurs et les acheteurs [26]. Ce marché de seconde-main a ouvert de nouvelles perspectives de fin de vie au domaine de l'automobile. Même les constructeurs s'emparent de ces idées pour restructurer leur modèle économique qui s'adapte aux tendances de la clientèle qui s'est habituée au marché de l'occasion [27]. Cela se fait en incluant la réparation, en mettant à disposition des pièces de rechange et les données pour une mise en œuvre et une maintenance correcte pour garder son véhicule à sa plus haute valeur.

Un autre paramètre sociologique fait évoluer la valeur résiduelle du véhicule de manière différente de celle prédite par les modèles de dépréciation ; le paramètre qu'on appelle ici « émotionnel ». L'appréciation de plusieurs modèles de véhicules pendant des moments de l'histoire fut très liée aux habitudes de consommation et aux comportements sociologiques d'une société. Par exemple, la valeur résiduelle du modèle Renault R4 est restée quasi stable grâce à son exposition médiatique importante durant des évènements sportifs. Les propriétaires de ces modèles peuvent se permettre d'introduire de lourds changements et réparations, car la dépréciation est quasi nulle.

A l'image de cette valeur résiduelle « émotionnelle », quantifier la valeur « fonctionnelle » résiduelle à tout moment des véhicules d'occasion réparés, voire upgradés, permettra d'organiser un marché d'occasion plus en accord avec les objectifs de l'UE en matière d'économie circulaire. En particulier :

- Face à la pénurie ou l'importance croissante de la valeur des matières premières dans la production de nouveaux véhicules, ou de pièces de rechange, les 3R (Réparation, Réemploi et Remanufacture) et l'upgrading, prendront plus de place dans le marché.
- L'interdiction de l'usage de véhicules au-delà de certains seuils d'émissions de particules fines et de gaz de combustion (dont le CO2)[1], amène les équipementiers à proposer des échanges standards de moteurs moins polluants [28], voire des échanges de technologies thermiques vers électriques. Dans ces cas, la dépréciation du véhicule en fonction de ses étapes dites de réparation, devra être repensée par une nouvelle cotation fonctionnelle du véhicule.

1.3- Indicateurs de la valeur résiduelle pour la prise de décision en fin de vie : exemple des batteries lithium ion

Les batteries, comme tout équipement électrique, sont susceptibles de vieillir et donc de perdre de leur valeur. Reboucler les scénarios de fin de vie vers l'usage est de plus en plus important d'autant plus que les métaux utilisés dans les batteries sont classés par l'Union européenne comme étant « métaux à fort risque d'approvisionnement » et que la capacité globale installée des batteries est de plus en plus importante (de 200 GWh en 2022 à 1000 GWh en 2030) [29]. Différents scénarios de fin de vie existent pour la batterie, du plus dégradant de la valeur fonctionnelle au moins : le recyclage, la réutilisation, la réaffectation ou la remanufacture. La figure 4 illustre un exemple de scénarios de fin de vie d'une batterie pour véhicule électrique.

[1] Les certificats qualité de l'air sont obligatoires pour les véhicules circulants dans les zones à faibles émissions mobilité décidées par les collectivités ; cf. critères limitant la circulation des catégories de véhicules, sur le site du ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires (consultation septembre 2022) : https://www.certificat-air.gouv.fr

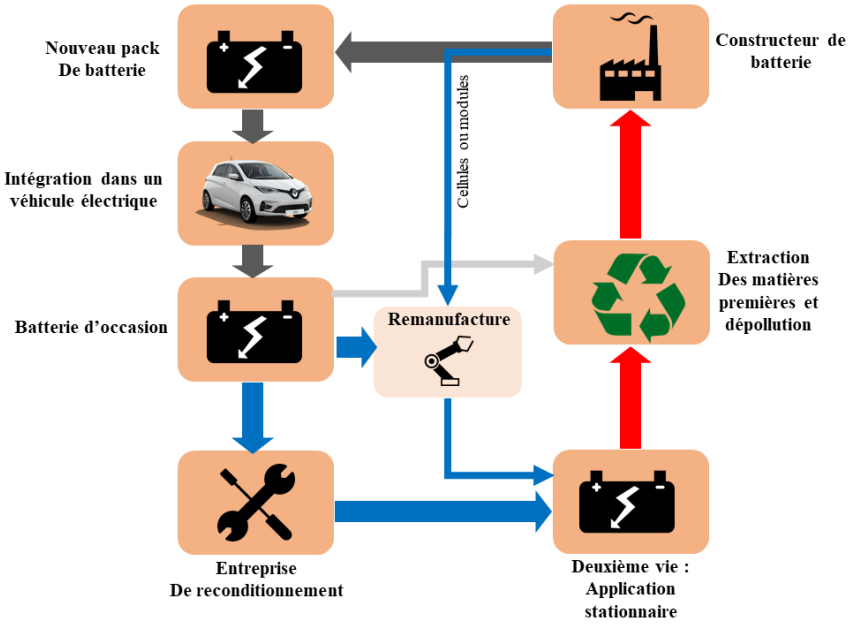


Figure 9 : Scénario de fin de vie d'une batterie de véhicule électrique pour une seconde vie dans une application stationnaire

L'indicateur de valeur résiduelle n'est pas toujours indexé sur une valeur monétaire. Elle peut être une valeur sociale, une valeur énergétique ou une valeur environnementale [30] [31]. Dans le cas des batteries, l'indicateur SOH (State of Health) donne l'état de santé d'une batterie et fixe ainsi la valeur résiduelle et permet d'être un indicateur de décision pour les scénarios de fin de vie de la batterie.

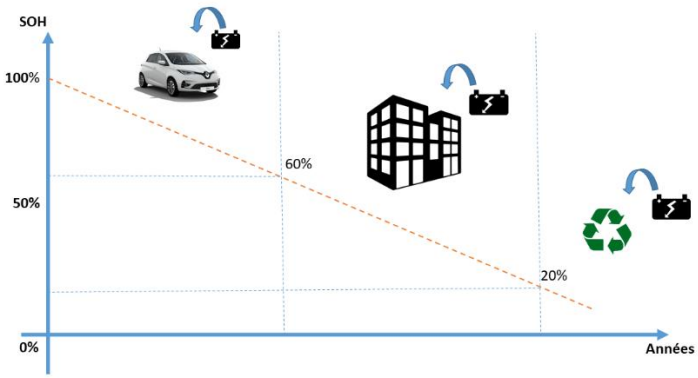


Figure 10 : Évolution du SOH d'une batterie d'un véhicule électrique et les seuils de tolérance pour chaque application (60% pour l'automobile, 20% pour le stationnaire, ce seuil dépend du contexte : de la pression sur les matériaux, des risques d'approvisionnement, des avancées technologiques).

L'indicateur SOC a été initialement pensé comme étant des outils de gestion de charge et décharge de batterie. En effet, une estimation exacte du SOC peut éviter que la batterie ne soit

déchargée au-delà de la limite ou surchargée. Cela permet un encadrement de l'usage de la batterie et permet à la batterie d'être plus durable et plus fiable. Le couplage coulométrie et SOC permet également de rendre compte de l'autonomie restante de la batterie par rapport à celle initiale définissant ainsi le SOH, qui est une information importante dans de nombreuses applications.

Il existe plusieurs études sur les différentes technologies de batteries qui essayent de quantifier, suivre l'état de santé des batteries [32] [33] [34] [35]. Ces méthodes nécessitent la mesure du courant et de la tension au cours des cycles de charge et de décharge du pack de batterie entier et dans certains cas la mesure de la température de différentes parties du pack. Les trois méthodes principales d'estimation du SOC sont « méthode par mesure de courant », « méthode par mesure de tension » et « méthode du filtre de Kalman » [36] [37] [38].

La méthode par mesure de courant, aussi appelée « méthode par comptage de coulomb », est la plus commune en littérature [39] [40]. Cette technique utilise l'intégrale du courant mesuré pour déterminer la capacité de charge restante et le SOC est exprimé ainsi :

$$SOC(t) = SOC(t_0) + \frac{1}{C_{nominale}} \int_{t_0}^{t_0+t} I\, dt \qquad (1.7)$$

$C_{nominale}$ correspond à la capacité nominale de la batterie,

Cette méthode calcule la capacité restante en accumulant la charge transférée dans ou hors de la batterie. Cette méthode dépend grandement de la connaissance précise du courant entrant et sortant à chaque moment de la vie de la batterie, mais aussi de la connaissance de l'état de charge initial. L'existence d'un offset de mesure du courant peut à la longue introduire un biais important à l'estimateur. Pour améliorer l'estimation de l'état de charge, on utilise des seuils de tension représentatifs d'un certain niveau de charge. Cela permet de recaler l'état de charge.

L'état de santé (SOH) peut être exprimé de telle sorte en faisant apparaitre la valeur de la capacité restante.

$$SOH = \frac{C_{restante}}{C_{nominale}} 100\% \qquad (1.8)$$

La connaissance de la capacité restante de la batterie permet de déterminer si cette dernière est toujours adéquate pour son application. Par exemple pour une application dans l'automobile, le SOH doit rester supérieur à 60% comme illustré sur la figure 5. En dessous, la batterie doit être remplacée pour des questions d'autonomie et de confort d'usage [41].

La batterie perd de sa capacité de stockage initiale, il est important de connaitre le SOH pour maitriser le vieillissement cyclique et calendaire et ainsi ajuster son usage.

Dans un véhicule électrique, les batteries sont souvent garanties en moyenne 8 ans ou 160000km pour un SOH supérieur à 60%. Le constructeur s'engage à remplacer la batterie quand cette dernière perd 40% de sa capacité initiale dans les 8 ans de garantie.

Le SOH est donc devenu un indicateur de référence dans le marché des véhicules électriques d'occasion, il est pris en compte pour estimer la valeur ces dernières.

Dans le cas de la batterie Lithium Ion des véhicules électriques, le choix de scénario de fin de vie qui domine dans la littérature est de passer d'une application de stockage mobile à un autre

stationnaire. En effet, lorsque le SOH diminue, la densité massique d'énergie stockée diminue, rendant l'autonomie moins importante. En revanche, pour des applications stationnaires ou le poids de l'élément de stockage n'est pas une donnée critique, la capacité résiduelle de la batterie est tout à fait acceptable. Ce choix est justifié par le coût initial qui reste élevé pour des applications stationnaires 300-500 €/kWh [42], la valeur résiduelle d'une batterie qui voit son état de charge chuter de 40% est en dessous des 200 €/kWh ce qui rend plus intéressant l'usage des batteries de seconde main dans de telles applications.

L'indicateur SOH est actuellement communément présent dans les systèmes de gestion de batteries pour véhicules électriques (Battery management system ; BMS) [43]. L'Europe ambitionne de réutiliser 80% de la capacité globale des batteries installées dans les flottes de véhicules électriques dans d'autres applications stationnaires d'ici 2030 en utilisant des estimations précises de l'état de santé pour optimiser ce processus de prise de décision en fin de vie [44].

Il est possible d'imaginer plusieurs vies moins contraignantes suivants la deuxième vie. Mais à un certain point le recyclage devient plus intéressant et donc la batterie bifurque vers un scénario de démantèlement et la réutilisation directe de sous-ensembles ou une extraction des matériaux par des procédés d'extraction.

2. La valeur résiduelle en électronique de puissance

Dans la même optique que les exemples cités dans les parties précédentes, il s'agit d'appliquer le concept de valeur résiduelle aux systèmes de l'électronique de puissance. Une description brève de la chaîne de valeur en électronique [45] est faite dans la section 2.1 et une formulation de la valeur résiduelle est proposée pour la réutilisation des composants d'électronique de puissance et les hypothèses de sa construction expliquée dans la section 2.2. Finalement la section 2.3 illustre, par la standardisation, la mise en œuvre du calcul proposé dans ces travaux pour la préservation de la valeur résiduelle.

2.1- La chaîne de valeur en électronique de puissance

La valeur d'un convertisseur évolue tout le long de son cycle de vie. Dès l'extraction des matériaux nécessaires à la confection des composants, ces matériaux prennent de la valeur fonctionnelle durant les processus de transformation (purification, effilage…). Ces mêmes matériaux qui permettent de produire des composants auxquels sont associées une ou plusieurs fonctionnalités, forment un ensemble gagnant en valeur ajoutée. Celle-ci est liée à la fonction à proprement parler, aux savoir-faire du constructeur et dans une moindre mesure aux coûts engagés pour sa construction (moyens humains, ressources énergétiques, impacts générés dans l'air, le sol et l'eau, procédés, coproduits, etc.). Cette valeur s'ajoute ensuite à tous les gains en valeurs liés à l'assemblage des composants, la création du packaging qui forment à leur tour des fonctionnalités multiples et complexes. Enfin, l'introduction de services, tels que l'IHM ou encore le monitoring introduit de nouvelles valeurs ajoutées. Par exemple, la manufacture (de

la matière première au convertisseur complet) des chargeurs de téléphones Samsung contribue à la valeur totale monétaire du produit vendu à hauteur de 50% approximativement [46]. La logistique et la distribution contribuent aussi au gain de valeur puisque cela constitue un service rendu aux différents acteurs de la chaîne. Finalement, la mise en marché (Marketing) ajoute une valeur sociale qui s'inscrit dans la logique de l'offre et la demande du marché. Les techniques marchandes peuvent ajouter jusqu'à 20% de valeur au produit comme quantifié dans l'étude pour les chargeurs de téléphone Samsung [47]. D'autres paramètres peuvent augmenter la valeur d'un convertisseur. Il s'agit des différents tests de qualification de sécurité, CEM, fiabilité, amenant aux certifications des exigences normatives, telles que les normes environnementales relatives à l'éco-conception des produits électroniques, etc. qui peuvent octroyer au produit une labélisation lui permettant de viser un marché et de gagner en valeur.

Durant les premières phases de vie avant l'usage du convertisseur, sa valeur résiduelle ne fait qu'augmenter jusqu'à arriver à sa valeur de vente auprès de l'usager.

Dans la société actuelle et de manière générale, la valeur économique des produits électroniques est dépréciée au cours du temps d'utilisation. La valeur monétaire des convertisseurs vue par le réparateur décroit dès sa vente et s'arrête à sa destruction totale en fin de vie. Ainsi les étapes suivants l'usage diminuent la valeur monétaire du convertisseur mais augmente la valeur fonctionnelle de ce dernier, car ces étapes ajoutent des coûts de remise à niveau, mais augmentent la valeur résiduelle environnementale et fonctionnelle, car le convertisseur peut être conçu pour être recyclé, et voit sa fonction améliorée ou simplement sauvegardée [48] incluant le coût de la main-d'œuvre, le coût des équipements, le coût des consommables, le coût de stockage, le coût des procédés de traitement de fin de vie pour extraire de la ressource matérielle (à minima). La figure 6 ci-dessous résume de manière schématique les différents gains et pertes de valeurs de différentes natures, durant le cycle de vie d'un convertisseur.

V_{MP} étant la valeur ajoutée de la transformation des matières en première en matières utilisables, V_F est la valeur ajoutée liée à la fabrication, V_A est la valeur ajoutée liée à l'assemblage des composants et des modules pour constituer le convertisseur complet, V_T est la valeur ajoutée des tests et qualifications du convertisseur, V_D est la valeur ajoutée par la distribution et le marketing. Toutes ces valeurs ajoutées constituent ce qui est communément appelé dans les théories économiques d'évaluation « la valeur intrinsèque » V_i [49]. Cette valeur influence directement la valeur monétaire finale et aussi le prix de possession.

$$V_i = V_{MP} + V_F + V_A + V_T + V_D \qquad (9)$$

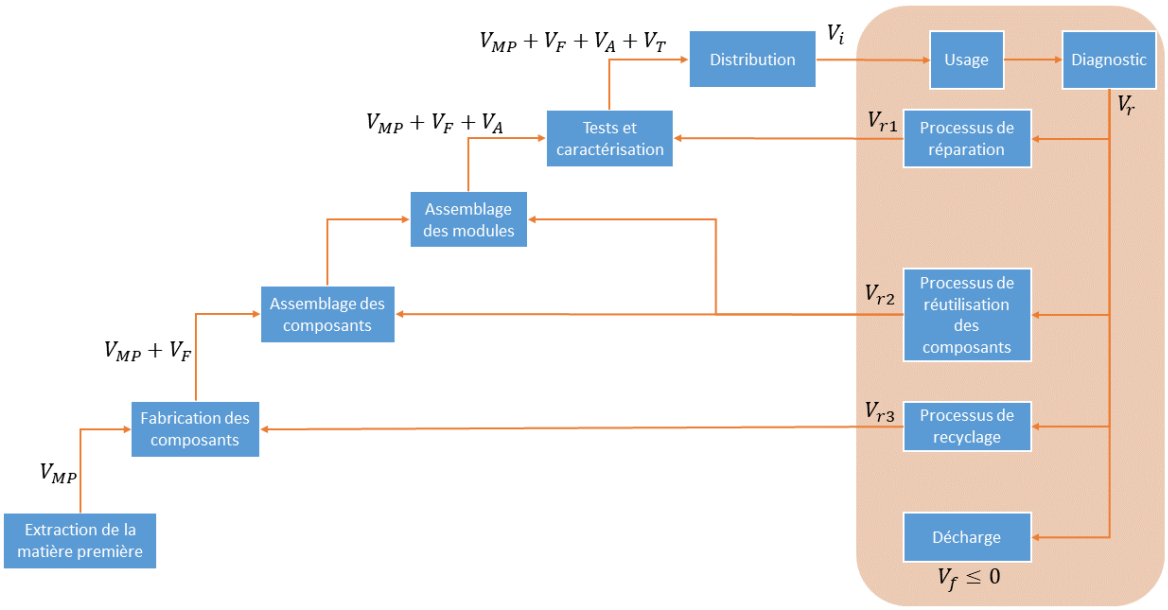


Figure 11 : Évolution de la valeur le long du cycle de vie du convertisseur, l'encadré orange étant la phase de fin de vie, première vie ou fin d'usage du convertisseur.

L'estimation de la valeur résiduelle d'un convertisseur nécessite qu'une opération de diagnostic ait lieu en fin d'usage. La valeur résiduelle comme définie plus haut permettrait à ce moment-là de la vie du convertisseur aux acteurs concernés (utilisateurs, responsables des infrastructures électriques, organismes de collectes et de traitement des DEEE, revendeurs et réparateurs de produits électroniques, systèmes de SAV, etc.) de prendre des décisions au niveau des scénarios de fin d'usage du convertisseur. Chaque scénario (réparation, réutilisation, recyclage …) inclut des coûts d'extraction, de reconditionnement et de requalification. Ces coûts réduisent la part de valeur résiduelle monétaire du produit en fin d'usage, mais potentiellement augmentent la part de valeur fonctionnelle et environnementale résiduelle [50]. Et donc la valeur résiduelle monétaire d'un produit après le processus de requalification pourrait être formulée ainsi :

$$V_{Rm} = V_r - C_{processus} \quad (1.10)$$
$$V_{Rf} = V_r + C_{processus}$$

Avec V_{Rm} étant la valeur résiduelle monétaire et V_{Rf} est la valeur résiduelle fonctionnelle

$$avec\ V_r = \alpha V_i \quad \alpha\ est\ le\ facteur\ de\ dépreciation$$
$$i\ les\ différentes\ types\ de\ valeurs\ associées\ aux\ procédés\ impliqués\ aux\ étapes\ du\ cycle\ de\ vie$$

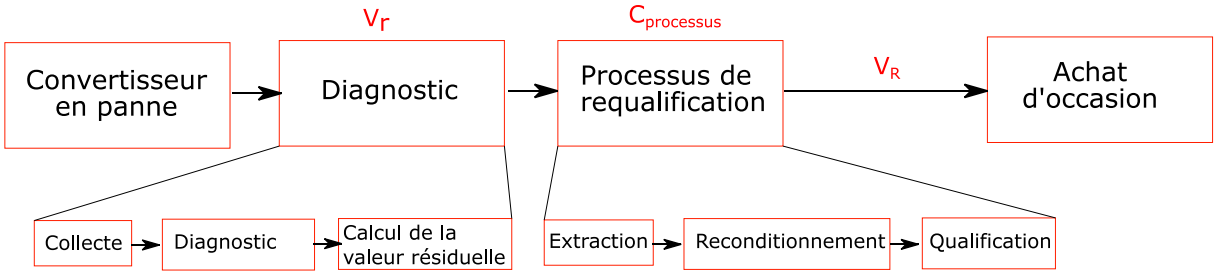


Figure 12 : Principales étapes de diagnostic en fin de vie d'un convertisseur et valeurs résiduelles créées

Si les coûts des scénarios de fin de vie sont connus, les valeurs résiduelles après chaque scénario peuvent être estimées et donc aider les acteurs compétents à choisir un circuit de requalification, par exemple, celui potentiellement le moins impactant sur la valeur de différente nature (monétaire, environnementale, fonctionnelle…).

En effet, les coûts des scénarios de fin de vie introduits sont souvent caractérisés suivant le prisme financier. Ces coûts peuvent bien aussi être des coûts environnementaux incluant plusieurs coûts de dommages écologiques, sur la santé humaine, incluant les écosystèmes. Les effets étant systémiques, les relations sont combinées et se propage avec une inertie au cours du temps. Plusieurs catégories de dommage sont utilisées par les méthodes de calculs en analyse d'impact environnemental, tels que :

Les dommages écologiques, écosystémiques : gaz à effet de serre, acidification, écotoxicité aquatique, perte de la biodiversité, etc.

Les dommages sur la santé : destruction de la couche d'ozone, radiation ionisante, oxydation photochimique, etc.

Les dommage sur les ressources : consommation de ressources abiotiques, épuisement de l'eau, épuisement des ressources naturelles, etc.

Ainsi, un ensemble de travaux scientifiques visent à exprimer des valeurs monétaires aux services écosystémiques et ainsi une valeur résiduelle du composant par rapport aux coûts des dommages environnementaux épargnés sont parfois présentés, et font polémique. Cette valeur pourrait être monétaire ou sous la forme d'un ratio par rapport à une référence moyenne. Ceci étant, ces considérations ne sont pas étudiées dans ce travail de thèse.

2.2- Approche générale

La formulation de la valeur résiduelle des composants en électronique de puissance nécessite de s'appuyer sur les hypothèses suivantes (choisies dans ces travaux):

1. La valeur résiduelle d'un composant d'électronique de puissance est basée sur le temps d'usage et le temps fonctionnel restant, selon une loi de dépréciation liée à son taux de fiabilité.

2. Les coûts des processus de requalification sont des coûts additionnels considérés comme des facteurs de diminution de la valeur monétaire et d'augmentation de la valeur résiduelle fonctionnelle.
3. Si l'extraction d'un composant ou d'un module de son convertisseur est jugée impossible ou endommageant, la valeur de ce composant est nulle.
4. La valeur peut être rectifiée grâce à un coefficient de rectification durant des épisodes singuliers liés au contexte socio-économique, difficulté d'approvisionnement (ex. : contraintes géo-politiques).

Depuis ces hypothèses et en partant de la formulation d'équation 5, nous proposons de quantifier la valeur résiduelle d'un composant d'électronique de puissance comme suit dans l'équation 11 :

$$VR(t_0, t) = k\left(VR(t_0)e^{-\frac{(t-t_0)}{RLT}} + \sum_{t_0 \le t_j \le t} R_j\right).N_{extraction} \qquad (1.11)$$

Avec

$\boldsymbol{k}$ *est le coeficient réctificateur*

$\boldsymbol{VR(t_0)}$ *est la valeur résiduelle au temps* t_0, *si* $t_0 = 0$ *alors* $VR(t_0) = V_i$

$\boldsymbol{RLT}$ *est le temps fonctionel restant*

$\sum_{\boldsymbol{t_0 \le t_j \le t}} \boldsymbol{R_j}$ *est la somme des couts des étapes de requalification*

$$\boldsymbol{N_{extraction}} = \frac{Nombre\ d'extractions\ restantes}{Nombre\ d'extractions\ possibles}$$

La quantification de la valeur résiduelle s'effectuerait pendant le diagnostic post-défaillance du convertisseur. Grâce au calcul des valeurs résiduelles des composants constituant le convertisseur, des actions de réparation, de réutilisation, de remanufacture pourrait être menées conformément aux valeurs résiduelles obtenues. Ainsi, la valeur résiduelle brute avant le diagnostic visuel et technique du composant serait égale à la valeur intrinsèque de ce dernier dépréciée par l'exponentiel du rapport du temps vécu et le temps restant à vivre comme indiqué dans l'équation 12 :

$$V_r = V_i e^{\frac{-(t-t_0)}{RLT}} \qquad (1.12)$$

Ce diagnostic permettrait par la suite de quantifier les coûts des processus de remise à niveau nécessaires (extraction, nettoyage, tests, remanufacture…) et de décider si, avec les techniques de désassemblage actuellement disponibles, la démarche est viable et si le composant est réutilisable ou pas. Ce diagnostic permettrait d'obtenir la valeur de $N_{extraction}$ et d'estimer les coûts de requalification. La figure ci-dessous résume le processus de calcul de la valeur résiduelle durant le diagnostic du convertisseur défectueux qui est proposée.

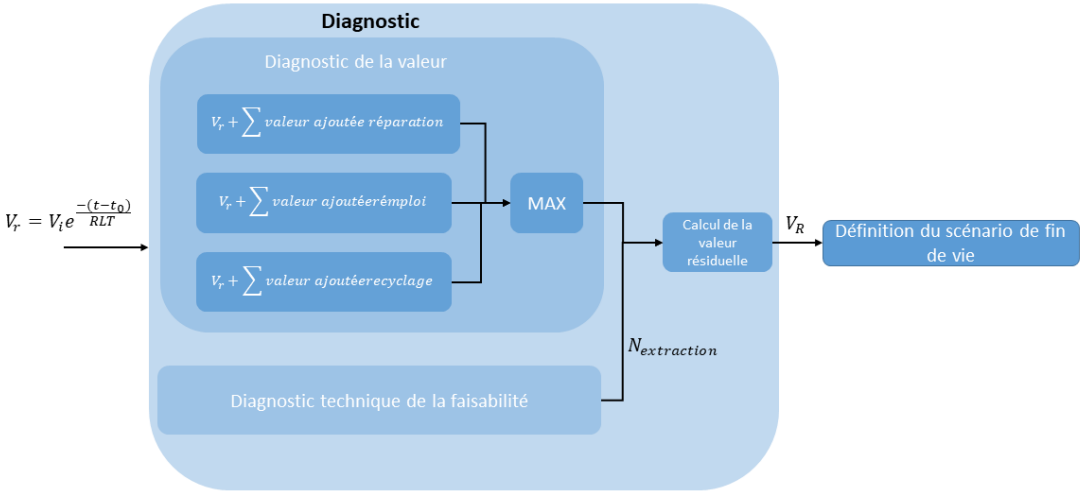


Figure 13 : Les grandes étapes de calcul de la valeur résiduelle durant le diagnostic d'un convertisseur

➢ Exemple illustratif de l'estimation de la valeur résiduelle

Pour mieux comprendre le calcul de la valeur résiduelle, nous proposons d'étudier un exemple de convertisseur qui a connu deux pannes durant sa vie utile. La première panne étant peu sévère elle n'a pas affecté gravement les composants. Nous faisons l'hypothèse que les composants sont désassemblables une seule fois pour ne pas endommager l'état du convertisseur complet. La deuxième panne est irréversible et il est nécessaire d'identifier la valeur restante et de l'extraire de ce convertisseur qui n'est plus fonctionnel.

1. La valeur résiduelle du convertisseur depuis le début de son utilisation à l'instant t_0 au moment de sa panne est dépréciée en fonction du temps fonctionnel restant, le facteur RLT.
2. Le premier diagnostic a révélé que le convertisseur était repérable et que ces composants pouvaient résister au processus de requalification. Les coûts des différents scénarios de fin de vie sont calculés et le scénario qui conserve la valeur résiduelle la plus élevée est choisi.
3. Le convertisseur est remis en état de marche à t_2 et sa valeur résiduelle poursuit son évolution au cours du temps avec une déperdition avec le temps jusqu'à une seconde panne cette fois-ci plus sévère.
4. Le diagnostic cette fois-ci fait état d'une impossibilité de réparation, donc seulement deux scénarios restent possibles. Le constructeur (via le SAV qui a permis ce diagnostic) peut choisir d'envoyer le convertisseur au recycleur si sa valeur a atteint un seuil de tolérance avant recyclage systématique. Dans une logique « d'urban mining » le seuil de tolérance pourrait correspondre à minima à la valeur de la matière première contenue, si donc le convertisseur arrive à la même valeur que la matière première, il aurait atteint le seuil de tolérance.

Ces étapes sont illustrées dans la figure 9 ci-dessous. Ce schéma n'est qu'à titre qualitatif et ne prend pas en compte les pentes et les durées de chaque étape représentative de la réalité. Et si aucun processus de réparation ou de remploi n'est effectué, la valeur du convertisseur devient nulle directement.

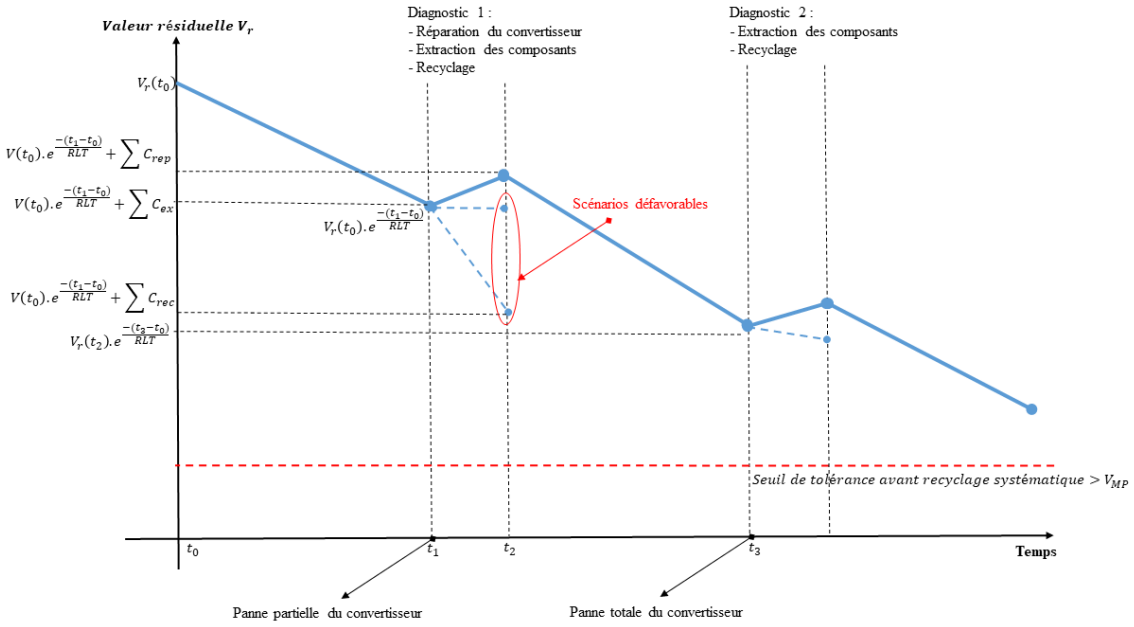


Figure 14 : Exemple d'évolution de la valeur résiduelle d'un composant dans un convertisseur de puissance selon les choix réalisés au cours du temps, ponctué d'étapes de diagnostic.

La possibilité de calculer la valeur résiduelle d'un composant en fin d'usage ne garantit pas la vente puis la réutilisation par la suite. Car si un marché de composants d'occasion n'existe pas, la valeur de ces composants ne peut pas être exploitée.

L'un des moyens de créer un marché d'occasion est de standardiser les composants et les méthodes de conception en électronique de puissance. Ainsi la demande et l'offre de ces composants seraient théoriquement créées par les usages sociétaux.

Les gains de cette approche de standardisation résident non seulement dans la traçabilité des matériaux utilisés, mais aussi dans la facilité à imaginer un flux circulaire des matériaux, composants et sous-systèmes constitutifs.

Cela permet également, d'augmenter la capacité de contrôler et de maîtriser, en conception et lors de l'usage. L'impact sur l'environnement généré pendant le cycle de vie et d'intégrer les contraintes de réparabilité et de réutilisabilité. La partie suivante présente quelques d'exemples de conception standardisant les usages grâce à la modularité de convertisseurs de puissance qui de par leur conception simplifient la quantification de la valeur résiduelle.

2.3- Standardisation au service du calcul de la valeur résiduelle

Dans le cas où les constructeurs tendent vers des systèmes de plus en plus standards avec l'utilisation de plus ou moins les mêmes composants, modules, sous-systèmes et étapes de conception, le concept de valeur résiduelle commence à faire sens puisque les composants extraits d'un convertisseur peuvent être introduits dans un marché de composants d'occasion ou la demande pour ces composants existe pour des convertisseurs similaires.

Dans la littérature en électronique de puissance, trois concepts de standardisation font l'objet de recherche pour plusieurs applications :

1. **PEBB :** « Power electronics building blocks » qui divise le convertisseur en plusieurs fonctions (mesure, cellule de commutation, contrôle, filtrage…) afin qu'ils soient assemblés par la suite par des interconnexions. Chaque module a une fonctionnalité définie et des interfaces matérielles et de contrôle standardisées. L'adoption d'un ou de plusieurs modules, pouvant être utilisés pour de multiples applications, permet de produire en grande quantité, de réduire les efforts d'ingénierie, les essais de conception, l'installation sur site et les travaux de maintenance. Dans ces cas la valeur résiduelle peut être calculée au niveau du module ou du composant. Cette approche hautement modulaire permet également de préserver la valeur résiduelle d'une partie du convertisseur.

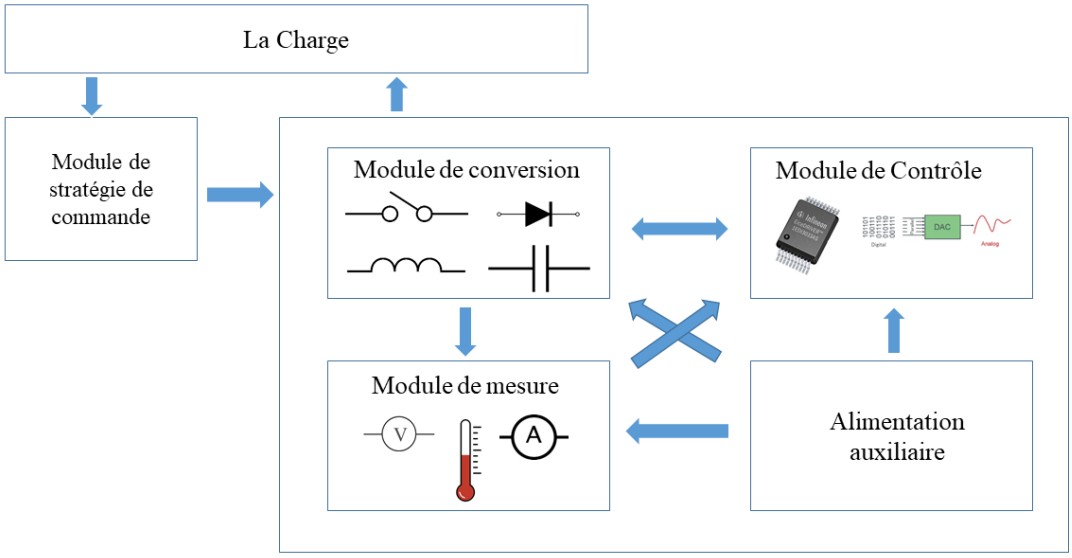


Figure 15 : Les différents modules constituant un convertisseur PEBB

Les modules principaux dans un PEBB, comme ils apparaissent dans la figure 11 ci-dessus, sont :

- Le module de conversion : correspondant à la partie de puissance du convertisseur, incluant les cellules de commutation, le refroidissement et les filtres.
- Le module de mesure : incluant les différents capteurs de tensions, courant et température.
- L'alimentation auxiliaire : alimentant les capteurs, les amplificateurs, le module de commande et de contrôle.
- Le module de contrôle : incluant le driver, les convertisseurs AD-DA et les systèmes de protection.
- Le module de stratégie de commande : faisant interface entre la charge et le convertisseur pour donner des consignes de commandes pour s'aligner au besoin de la charge.

Cette liste de modules n'est pas exhaustive, mais elle reste la plus commune dans la littérature. Dans des cas spécifiques le module filtrage est séparé du module de conversion, dans d'autres cas le module de mesure est intégré dans le module de contrôle.
L'architecture PEBB est conseillée dans les bonnes pratiques de conception de convertisseur de IEEE [51], car elle invite à respecter un cadre méthodologique dans la conception de convertisseurs plus standards.

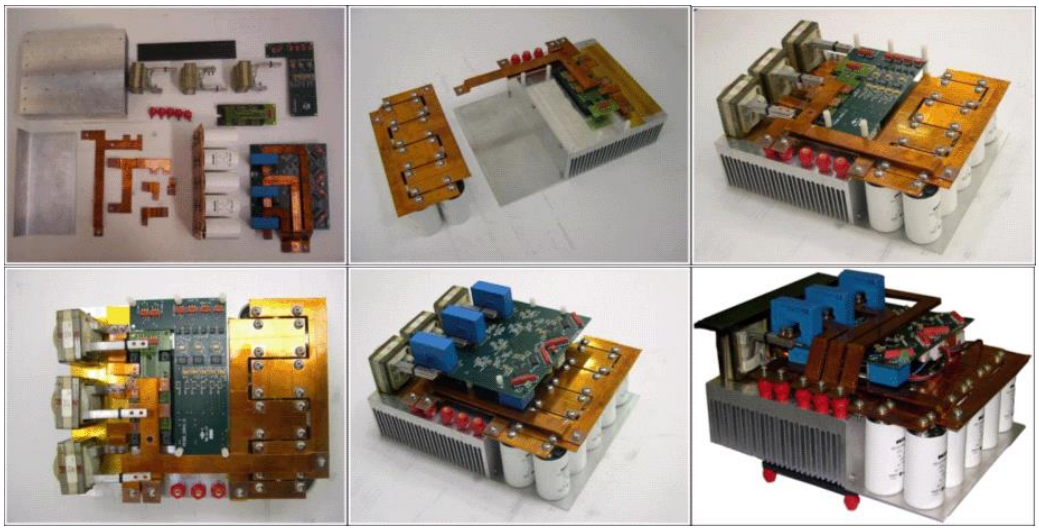


Figure 16 Un exemple de convertisseur PEBB et son assemblage étape par étape en différents modules [39]

2. **MMC :** « Modular multi-cell converter » utilise le principe de l'extensibilité, en assemblant plusieurs modules de puissance pour monter en puissance et répondre à différents cahiers des charges. Il a été proposé pour la première fois par Lesnicar et Marquardt en 2002 [52]. En 2010, ce convertisseur innovant a été utilisé pour la première fois par Siemens [53]. Depuis son introduction, le MMC a fait l'objet d'une attention et d'un développement considérables en

raison de ses avantages prometteurs, tels qu'une excellente performance de sortie, une grande modularité, une évolutivité simple et une faible demande en maintenance.

La configuration commune d'un MMC triphasé est composée d'un bornier DC, d'un bornier AC et d'une partie de conversion impliquant trois branches de phase, comme le montre la figure 13. Chaque branche/phase possède deux bras symétriques appelés bras supérieur et bras inférieur. Le bras supérieur et le bras inférieur contiennent un groupe de sous-modules identiques connectés en série avec une inductance de calage pour filtrer les composantes hautes fréquences dans le courant du bras.

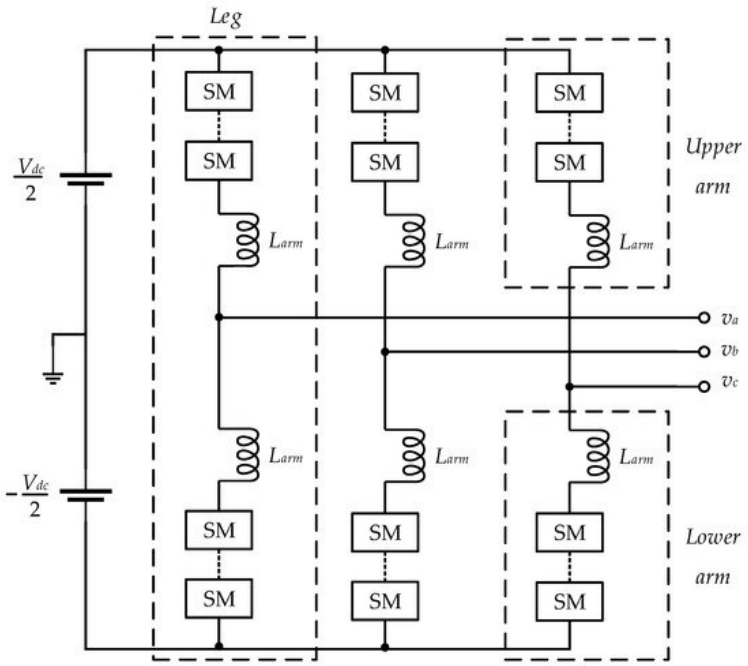


Figure 17 : Un exemple d'un convertisseur MMC trois phases à deux bras symétriques [54]

3. **PCA :** « Power converter array » : est un concept développé au laboratoire G2Elab qui mixte le principe d'extensibilité des MMC et le principe de brique fonctionnelle des PEBB. L'approche de conception type PCA permet de concevoir et produire divers convertisseurs par assemblages en grands nombres de Conversion Standard Cells (CSC) toutes identiques. La même CSC utilisée permet, par associations, de répondre à une pluralité de cahiers des charges. Cette approche limite fortement la diversité des composants utilisés et des technologies d'assemblage et d'interconnexion entre les composants et sous-ensembles. Elle est organisée sous la forme d'une plateforme technologique qui apporte un cadre et un formalisme pour la conception et la production [55]. Elle encadre totalement les techniques d'assemblage et la liste exhaustive des composants et des matériaux mis en œuvre. Il devient dès lors possible et intéressant de tirer le meilleur parti de cette standardisation vis-à-vis du cycle de vie et de la circularité. Les gains de cette approche modulaire et hautement standardisée résident non seulement dans la traçabilité des matériaux utilisés,

mais aussi dans la facilité à imaginer un flux circulaire des matériaux, composants et sous-systèmes constitutifs. Cela permet également d'augmenter la capacité de contrôler et de maîtriser, en conception et lors de l'usage, l'impact sur l'environnement généré pendant le cycle de vie (plusieurs dizaines d'années) de chaque convertisseur conçu, fabriqué et mis en œuvre par l'approche modulaire. Dans la figure 14 ci-dessous se trouve la CSC développée par le G2Elab et la société MAATEL [56][57][58]. Cette cellule permet de faire une conversion DC/DC avec un gain unitaire et d'une puissance de sortie de 100W. Le convertisseur complet PCA est une association de plusieurs CSC et d'une carte de contrôle à base de briques fonctionnelles également le plus standardisé.

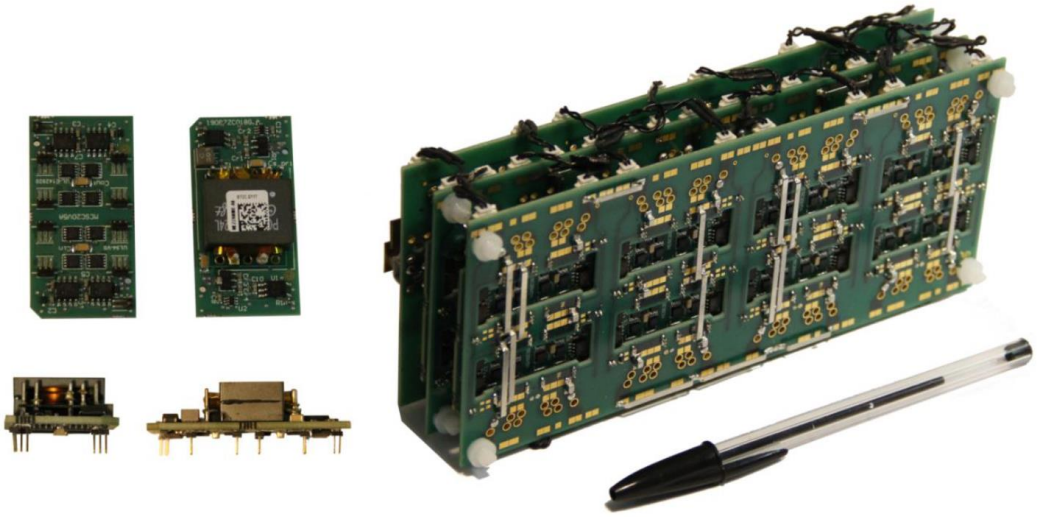


Figure 18 : Gauche : image d'une cellule standard de conversion unique (CSC) basée sur la topologie DAB. Droite : image d'un réseau de convertisseurs de puissance (PCA), composé de 16 CSCs [59].

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

Conclusion du chapitre

Pour conclure, la valeur résiduelle a été définie dans la partie 2, en indiquant certains de ses paramètres d'évaluation clé. La valeur résiduelle proposée ne doit pas être interprétée comme une valeur monétaire, mais plutôt comme une valeur d'empreinte inhérente qui peut potentiellement aider à estimer un coût résiduel. En outre, cette proposition crée un lien entre la technologie et le savoir-faire « métier » en EP et les choix d'évolution tout au long du cycle de vie au gré des usages successifs possibles dans la société, des systèmes conçus.

En plus d'être une méthodes d'aide à la prise de décision de choix de scénario de fin d'usage, l'estimation de la valeur résiduelle peut aussi être utilisée comme indicateur de conception. Le concepteur peut faire des choix qui minimiseront la dépréciation de cette valeur au fil du temps

et communiquer avec d’autres acteurs concernés de la chaine de valeur du produit conçu et utilisé.

Pour réintroduire ces composants dans d'autres convertisseurs similaires ou les vendre sur un marché existant de composants d'occasion, les convertisseurs doivent être normalisés/standards, en ce qui concerne leur BOM et les processus de démontage/assemblage engagés.

Chapitre 2 : L’impact du désassemblage sur les composants

1. La physique de la défaillance

1.1. Introduction

La pénétration de l'électronique de puissance dans les réseaux électriques grâce aux énergies renouvelables a permis une utilisation plus efficace et un contrôle plus flexible de l'énergie électrique [1]. L’électrification de nombreux autres domaines, par exemple le secteur automobile (chargeurs de véhicules électriques, contrôle des moteurs...) [2], ou le secteur aérospatial dans les solutions d'avions électriques hybrides a également permis la diffusion de l’électronique de puissance [3]. 80% de l’énergie mondiale va passer par des systèmes incluant de l’électronique de puissance. Dans ce contexte, la fiabilité et la durabilité des systèmes électroniques de puissance constituent de nouveaux défis dans ces diverses applications, en particulier lorsqu'ils fonctionnent de longues heures dans des conditions environnementales difficiles combinées à des cyclages brutaux de ces conditions.

De plus en plus d'efforts sont investis pour rendre l'électronique de puissance plus fiable afin de garantir différents objectifs :

- Réduire l'impact écologique du cycle de vie en rendant le système plus durable.

- Réduire le coût du cycle de vie en atténuant le LCOE (Leverage cost of energy).

- Assurer une haute disponibilité, une maintenance réduite et la satisfaction du client.

- Assurer une utilisation sûre du système pour les êtres humains et leur environnement.

- Assurer une garantie légale du produit

La conception de l'électronique de puissance pour la fiabilité (DfR Design for Reliability) est souvent associée aux contraintes mécaniques, électriques et logicielles héritées de l'environnement d'utilisation. Dans ces travaux, la définition de la fiabilité est étendue sur l’intégralité du cycle de vie des composants. La fiabilité des composants en seconde vie devient le résultat de tous les facteurs contributifs (mission du profil d'utilisation, processus d'assemblage et de désassemblage, processus des fournisseurs...).

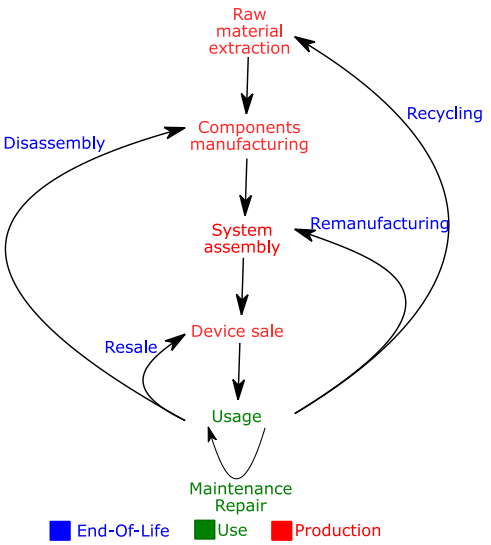


Figure 19 : Cycle de vie général

Chaque phase du cycle de vie d'un produit en électronique de puissance affecte sa fiabilité. C'est pourquoi nous proposons de quantifier les effets de vieillissement de l'usage, du désassemblage et du diagnostic sur les composants en électronique de puissance dans les deux chapitres suivants. Dans ce chapitre, la théorie de la physique de la défaillance et de la fiabilité est d'abord expliquée, Suivie par une étude de l'impact du désassemblage sur deux familles de composants passifs communs.

1.2. Théorie de la fiabilité

Cette partie introduit les bases de la théorie de la physique de la fiabilité, les différents modèles de vieillissement des composants en électronique de puissance et le principe d'essais de vieillissement accélérés. Cette partie sert de base théorique pour les chapitres 2 et 3.

1.2.1. Les bases de la fiabilité

La fiabilité notée R(t) est la capacité d'un composant à remplir sa fonction sur une période donnée. Elle est caractérisée par la probabilité que le composant fonctionne dans des conditions données sur une période.

$$R(t) = Prob\{\, Aucune\ panne\ de\ \ [0,t]\} \qquad (2.1)$$

Un composant donné peut se trouver dans deux états, un état de fonctionnement (il respecte toutes les spécifications de sa fiche technique) et un état de défaillance (au moins une spécification n'est pas respectée). T est la variable aléatoire qui représente le temps écoulé entre

la mise en service d'un composant et sa première défaillance. La fiabilité au temps t est la probabilité qu'un composant ne soit pas défaillant sur la période [0, t] définie par

$$R(t) = Prob\{\ t < T\} \qquad (2.2)$$

La fonction de distribution de la variable aléatoire T est équivalente à la fonction F(t) (la probabilité de défaillance du système à l'instant t) :

$$F(t) = Prob\{t > T\} = 1 - R(t) \qquad (2.3)$$

La fonction f (t) est la densité de probabilité de F(t) et est donnée par :

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \qquad (2.4)$$

La fonction de distribution F(t) et la fonction de fiabilité R(t) sont exprimées à partir de la fonction de densité f (t) dans les relations suivantes :

$$F(t) = \int_0^t f(l)dl \qquad (2.5)$$

Le taux de défaillance, λ(t), est une caractéristique de la fiabilité. La valeur λ(t)dt représente la probabilité conditionnelle d'avoir une défaillance dans l'intervalle de temps [t, t+dt], sachant qu'il n'y a pas eu de défaillance dans l'intervalle [0, t]. Ainsi, λ(t) s'écrit :

$$\lambda(t)dt = \frac{Prob\{defaut\ entre\ [t,t+dt]\ ,sans\ défaut\ entre\ [0,t]\}}{Prob\{\ sans\ défaut\ entre\ [0,t]\}} \qquad (2.6)$$

$$\lambda(t) = \frac{\frac{Prob\{défaut\ entre\ [t,t+dt]\} - Prob(défaut\ entre\ [0,t])}{dt}}{Prob\{\ sans\ défaut\ entre\ [0,t]\}} \qquad (2.7)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} \qquad (2.8)$$

La fiabilité peut également être exprimée à partir du taux de défaillance :

$$R(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(l)\ dl\right] \qquad (2.9)$$

Pour caractériser la fiabilité des composants, d'autres grandeurs existent et sont communément utilisées dans l'industrie. On peut citer en particulier la MTBF (Mean Time Between Failure), ou durée moyenne de fonctionnement avant défaillance :

$$MTBF = E(T) = \int_0^\infty tf(t)dt = \int_0^\infty R(t)dt \qquad (2.10)$$

E(T) représente l'espérance mathématique de la variable aléatoire T.

Le taux de fiabilité des systèmes électriques λ est généralement décrit par la courbe dite de la baignoire, qui décrit l'évolution du taux de défaillance en fonction du temps et permet de mettre en évidence empiriquement trois phases d'un produit.

- La période de garantie : les pannes qui apparaissent durant cette période sont le résultat de la production du produit et ne sont pas prises en compte dans les études de fiabilité, par exemple, pour les modules photovoltaïques, les fabricants garantissent 5 ans en moyenne pour les pannes mécaniques.

- La période utile : correspond à la majorité de la vie d'un produit, la fatigue et l'usure n'ont pas encore commencé.

- La période de vieillesse : le taux de défaillance durant cette période augmente rapidement car les phénomènes d'usure se déclenchent.

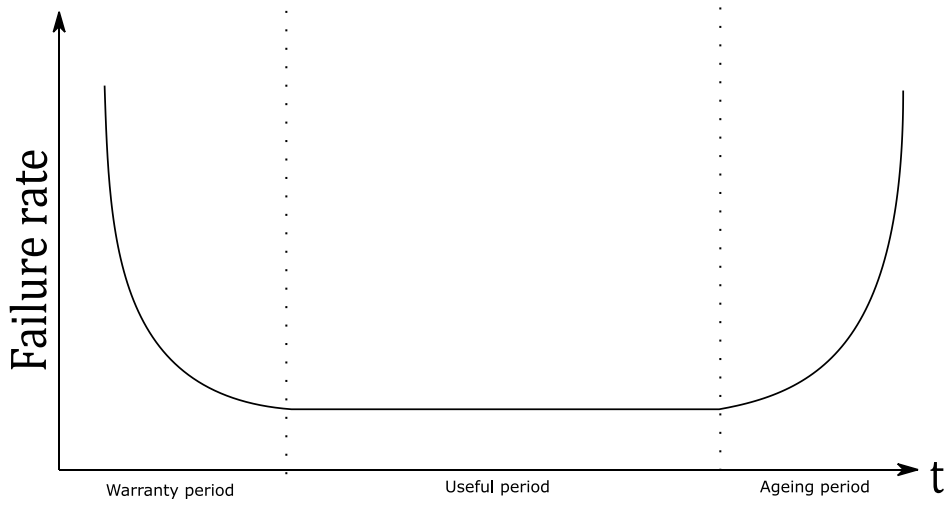


Figure 20 : Taux de fiabilité, la courbe dite "courbe en baignoire"

La fiabilité est une valeur qui nécessite la connaissance des distributions de durée de vie, ces distributions doivent prendre en compte tous les mécanismes de défaillance associés aux différentes technologies.

Ainsi remarquons que la connaissance de R(t) nécessite celle de f(t) et donc celle de $\lambda(t)$. Il s'agit donc d'obtenir grâce à des essais de vieillissement la distribution des durées de vie (variable aléatoire T) pour déterminer toutes les grandeurs relatives à la fiabilité. Les lois de distributions les plus communes dans la littérature [4][5][6] sont la loi exponentielle, la loi de Weibull et la loi log-normale.

Ainsi pour connaitre la durée de vie moyenne d'un composant, il faut avoir au préalable effectué des tests de vieillissement accéléré sur le composant afin de déterminer les modèles des facteurs de vieillissement et la distribution de la durée de vie de ce composant λ.

$$MTBF_{composant} = \frac{1}{\lambda_{nominal} \times \sum FA} \qquad (2.11)$$

$\lambda_{nominal}$ est le taux de fiabilité pour un fonctionnement dans la zone d'opération nominale du composant.

$\sum FA$ est la somme des facteurs d'accélération du vieillissement du composant.

Les parties suivantes traitent ces deux points. La partie 1.2-2 recense les différents modèles existants des facteurs d'accélération du vieillissement. La partie 1.2-3 explique comment les essais de vieillissement accéléré permettent d'obtenir les grandeurs de fiabilité.

1.2.2. Mécanismes de pannes et modèles d'accélération du vieillissement

Regardons à présent plus en détail de quoi il retourne pour le domaine de l'électronique de puissance et en particulier, pour certaines illustrations, les composants actifs de puissance pour lesquels de nombreuses études ont été réalisées. Les composants vieillissent plus rapidement lorsqu'ils sont soumis à des températures élevées, à des cycles de température importants ou à des contraintes mécaniques et chimiques telles que les vibrations, la corrosion ou l'humidité. On peut classer les causes du vieillissement en quatre familles [7] :

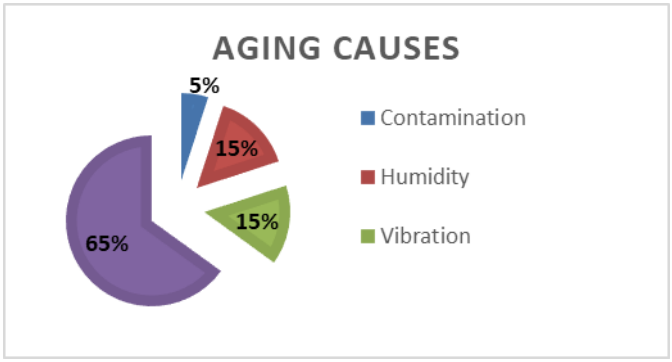


Figure 21 : Les causes principales de vieillissement des composants en électronique de puissance, la couleur violette correspond à la température et cyclage thermique [7].

La température et les cycles thermiques représentent à eux seuls environ 65 % du processus de vieillissement. Dans les systèmes protégés contre les vibrations et l'humidité, l'élévation de la température devient la principale cause de défaillance des composants de l'électronique de puissance. Rappelons ci-dessous comment sont exprimées les contraintes liées à ces facteurs de vieilissement.

- **Contraintes thermiques et thermoélectriques :** L'accélération apportée par la température aux mécanismes de défaillance est modélisée par la loi d'Arrhenius [8] qui est générale et valable pour tous les composants électroniques, le facteur d'accélération est multiplicatif à la durée de vie et permet de réduire cette dernière quand les contraintes sont élevées :

$$FA = \left(\frac{1}{S_{ref}} \times \frac{V_{appliquée}}{V_{nominale}}\right)^{p} e^{\frac{E_a}{k_B}\left[\frac{1}{T_1}-\frac{1}{T_2}\right]} \qquad (2.12)$$

FA : est le facteur d'accélération
E_a : est l'énergie d'activation (obtenue suite au essais accélérés de vieillissement), elle quantifie l'énergie nécessaire pour activer une réaction (comme un début de corrosion, une diffusion d'un métal dans un autre…)
K_B : la constante de Boltzmann = 8,614.10-5 eV/K
T_1 : est la température de référence
T_2 : les températures d'applications.
S_{ref} : est le niveau de référence pour la contrainte thermoélectrique à 20°C et à $V_{nominale}$ ($la\ tension\ nominale\ de\ fonctionnment\ du\ composant\ trait\acute{e}$)
$p:$ est une variable accélératrice pour la contrainte thermoélectrique obtenue suite au essais accélérés de vieillissement

Les essais de vieillissement accéléré permettent d'obtenir l'énergie d'activation et les paramètres du modèle d'Arrhenius.

Concernant les contraintes de cyclage thermique, aussi appelées « contraintes thermomécaniques », leurs apports à l'accélération des mécanismes de fatigue sont modélisés par le modèle de Norris-Landzberg [9]. Ce modèle permet de prendre en compte que la durée et la fréquence du cycle thermique affectent la fiabilité des composants électroniques du fait de l'activation du phénomène de fluage (comme la déformation de la structure de la brasure).
Norris et Landzberg ont proposé que la plage de déformation plastique est proportionnelle à la plage thermique du chargement cyclique (ΔT). Ils ont également modifié l'équation pour tenir compte des effets de la fréquence du cycle thermique (f) et de la température maximale (Tmax) du cycle.

$$FA = \delta.\left(\frac{1}{\Delta T}\right)^{\beta_1}.\left(\frac{1}{f}\right)^{\beta_2}.\exp\left(\frac{E_a}{k_B}.\frac{1}{T_{max}}\right) \qquad (2.13)$$

β1 et β2 sont des paramètres ajustés. Ils sont déterminés expérimentalement. Par exemple, pour le facteur de vieillissement de la brasure SnPb, ils sont respectivement de 1/3 et 1,9 [10].

- **Contraintes liées à l'humidité :** le taux d'humidité est le rapport entre la pression de vapeur d'eau contenue dans l'air et la pression de vapeur saturante. L'accélération apportée par le couple humidité-température sur les mécanismes de défaillances est modélisé par le modèle de Peck [11].

$$FA = \frac{a}{RH^p} . \exp\left(\frac{E_a}{k_B} . \frac{1}{T_{ambiant}}\right) \qquad (2.14)$$

RH étant le taux d'humidité,
a et p sont des paramètres empiriques issus des essais de vieillissement accéléré.

- **Contraintes liées aux vibrations (contraintes mécaniques) :** Plus le niveau de vibration est élevé, plus il y a des risques de panne sur les composants et la carte électronique. Les mécanismes de défaillance peuvent être par exemple des fissurations (substrat, boitier…), des problèmes d'adhérence (défaut de collage, délaminations…). Le modèle de Basquin [12] est souvent utilisé pour modéliser ce genre de mécanismes.

$$FA = \frac{a}{(G_{rms})^n} \qquad (2.15)$$

Grms est le niveau de vibration efficace dans l'environnement considéré,
a et n sont des paramètres ajustés obtenus par les essais de vieillissement accélérés.

Le niveau de vibration Grms efficace est calculé de la façon suivante. Le niveau de vibration est l'intégrale du niveau d'excitation mécanique sur toute la bande de fréquence.

$$\sqrt{aire} = G_{rms} \qquad (16)$$

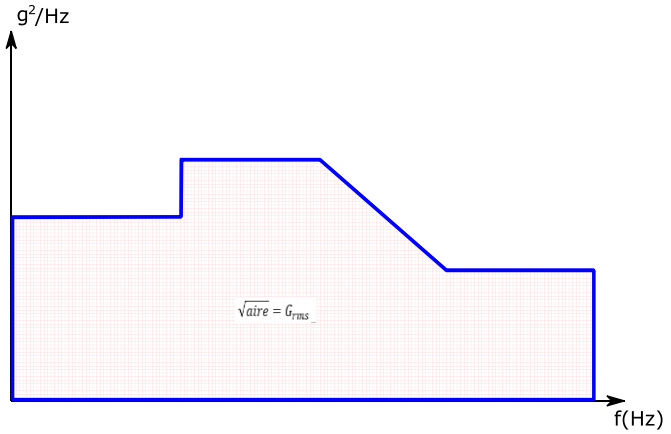


Figure 22 : Les niveaux de vibration en fonction de leurs fréquences.

Nous disposons à présent d'un ensemble de relations mathématique qui expriment les facteurs d'accélérations du vieillissement vis-à-vis des contraintes thermiques, mécaniques et du taux d'humidité. Il faut maintenant quantifier les différents paramètres. Pour cela des études en vieillissement accélérés sont réalisées.

1.2.3. Tests de vieillissement accélérés

D'après les parties précédentes, la fiabilité d'un composant en électronique de puissance est caractérisée par une loi de distribution statistique de la durée de vie et d'un modèle paramétrique des facteurs de vieillissement. L'obtention de ces modèles et lois est conditionnée par la disposition de données expérimentales de durées de vie. Ces données sont obtenues en testant le composant sous des conditions aboutissant à son vieillissement.

Les mécanismes de défaillances sont des phénomènes longs. Ainsi pour atteindre la rupture des composants dans une période courte, il faut accélérer les tests de vieillissement en augmentant l'amplitude des facteurs de vieillissement. Ce genre de tests est nommé « tests de vieillissement accéléré ». En industrie il existe deux types de tests de vieillissement décrit dans le tableau ci-dessous [13]:

Tableau 1 :Les types de tests de vieillissement.

Types de tests de vieillissement	**Spécificité**	**Utilité**
Tests de vieillissement Qualitatifs	Des tests très sévères, allant au-delà du de rupture du composant.	- Identifier les points faibles. - Identifier les principaux mode et mécanismes de défaillance. - N'est pas utilisé pour la prédiction de la durée de vie

Tests de vieillissement quantitatifs	Des tests sous des conditions plus contraignantes que les conditions nomi ces contraintes doivent être connues et choisies comme étant les principaux fa De vieillissement et limiter les Mécanismes de vieillissement Parasites.	- Prédire la durée de vie moyen - Etablir les modèles de des fact De vieillissement.

La durée de vie des composants est ainsi estimée à l'instant où une propriété du composant se dégrade au-delà d'un pourcentage donné et choisi pour l'application. Par exemple le pourcentage de réduction de la tension de claquage des isolants des transformateurs ou inductances peut-être un critère d'arrêt des essais de vieillissement.

Les études qui suivent se basent toutes sur les modèles et les principes de la théorie de la fiabilité. La partie suivante introduit les mécanismes de désassemblage des composants d'électronique de puissance en vue de leur réutilisation. Comprendre ces mécanismes permettra par la suite de choisir des cycles de température adaptés aux désassemblage des composants testés et ainsi réaliser des essais de vieillissement accéléré qualitatifs de ces procédés de désassemblage, appliqués dans la partie 3.

2. Les mécanismes du désassemblage des composants en EP

Dans cette partie seront exposées les étapes et les technologies existantes pour le désassemblage des composants. Nous verrons également les contraintes thermomécaniques induites par les différents procédés de désassemblage, nettoyage, diagnostic et requalification. Il est important de préciser à ce stade que nous n'aborderons que le cas du désassemblage et contraintes associées dans le cas de composants montés en surface (CMS) soudés sur des PCB en FR4.

La réutilisation est une pratique vertueuse pour garder la valeur résiduelle du produit à son maximum. Mais lorsque le réemploi est partiel, et qu'il n'est pas possible que via une étape d'extraction, il n'est pas sans effets négatifs sur la fiabilité du composant ou du système où ce composant sera intégré.

La réutilisation est donc une action qui agit sur la fiabilité des composants et qui cause une dispersion statistique des valeurs de ses paramètres électriques. Ce chapitre introduit la faisabilité d'une extraction pour le cas d'un transformateur HF monté en surface sur une carte PCB en vue d'en prolonger son usage. EN effet, dans le cas d'étude, le transformateur est un composant générique, il représente 40% du cout du convertisseur, 50% de la masse et sa durée de vie, annoncée par le constructeur, est très importante [14]. Il est donc tout à fait intéressant d'en étudier l'extraction en vue du réemploi car la durée de vie du composant est sensiblement supérieure à celle de la moyenne de la carte électronique. Son réemploi fait donc du sens.

Dans l'autre direction, certains composants ont des durées de vie plus faibles que la durée de vie moyenne des composants de la carte. Pouvoir extraire le composant à faible durée de vie, dans un contexte de maintenance prédictive par exemple, peut permettre de prolonger

sensiblement du durée d'usage globale du convertisseur. Nous verrons cela à travers l'exemple du condensateur électrochimique, monté en surface sur une carte PCB.

Les étapes de réparation sont rendues difficiles à cause de la miniaturisation et intégration des composants [15]. Le passage à la brasure sans plomb a aussi ajouté des contraintes thermiques dues à la température de refusion élevée, comparée à celle de la brasure avec plomb [16].

Par le biais des deux exemples sur lesquels seront testés les procédés de désassemblage (Transformateur HF et condensateur électrolytique) un indicateur de réutilisabilité des composants extraits sera construit.

Dans un premier temps, Les défis généraux de la réutilisation seront exposés. Ensuite, les étapes de la réutilisation ainsi que les effets de chaque étape sur la fiabilité seront exposées.

2.1. Les défis de la réutilisation des composants

Avant de détailler les obstacles de la réutilisation des composants, il faut d'abord se familiariser avec le secteur de la fin de vie en électronique et ses acteurs. Une réutilisation a lieu si un besoin est exprimé par le propriétaire et si une filière de réutilisation est disponible. Ce qui fait du propriétaire du dispositif EEE et du reconditionneur les acteurs agissant le plus directement sur l'action de la réparation et à son succès.

Pour réaliser une réutilisation, le couple propriétaire-reconditionneur est souvent confronté à une dépendance à son environnement pour l'approvisionnement en pièces de rechange, le transport et la collecte des dispositifs. Pour cela il fait appel un ensemble d'acteurs aussi importants incluant les équipementiers et les fabricants de composants, les reconditionneurs de composants et les logisticiens. Il n'existe pas encore de modèle de chaine de valeur incluant tous les acteurs de manière institutionnelle et organisée. Ce sont souvent des accords entre les entreprises sous forme de contrats de service ou d'argument de vente promouvant la réutilisation [17].

Figure 23 : Les acteurs de la chaine de valeur de la réparation et leurs besoins [18].

La réutilisation de composants en électronique de puissance peut prendre plusieurs formes :

- Par le constructeur lui-même ou inter-constructeurs si l'accès aux documentations est ouvert à toutes les entreprises et si les produits ont atteint un haut niveau de standardisation, la réutilisation peut se faire par n'importe quel constructeur maitrisant la technologie mise en œuvre dans le produit.
- Par un professionnel du reconditionnement qui serait une entité indépendante du constructeur initial. Elle peut traiter avec un client particulier ou un professionnel du domaine l'électronique de puissance. Ce service détient des techniques et un outillage important permettant un désassemblage plus rigoureux avec une garantie d'utilisation.
- Par un non professionnel de la réparation, principalement via des tutoriels DIY ou des « repair café ». Cette forme artisanale de réutilisation fait l'objet de beaucoup de recherches mais reste un marché de niche et ne peut pas garantir un fonctionnement robuste de l'équipement après ces procédés [19].

Dans ce chapitre nous parlerons des deux premières formes de réutilisation plus industrialisables et automatisables et qui permettent d'envisager des volumes d'activité conséquents à même de réduire les impacts environnementaux du domaine. La réutilisation se heurte à plusieurs obstacles :

- Obstacles liés au manque d'organisation des acteurs de la chaine de valeur.
- Obstacles liés à la conception du produit.
- Obstacles réglementaires.

La partie suivante détaille chaque obstacle.

➢ Les potentiels défis de la réutilisation

La réutilisation contrairement au recyclage garde le convertisseur et/ou ses composants à leurs plus hautes valeurs fonctionnelles mais cette pratique reste minoritaire et ne représente que 9% des demandes des clients pour l'électronique au sens large [20], ce qui pose la question de ce qui pourrait empêcher la pénétration de cette pratique dans la chaine de valeur des convertisseurs de puissance.

- **Les obstacles liés aux acteurs :**

  L'un des obstacles de la réutilisation des convertisseurs ou de ses composants est le cout associé à la main d'œuvre et aux pièces de rechange [21]. L'article montre qu'au-delà de 20% du cout de remplacement, le propriétaire d'un dispositif électronique au sens large préfère en racheter un nouveau.

  Au-delà du cout, un manque de confiance entre les acteurs pèse sur la chaine de valeur. Par exemple le propriétaire du convertisseur ignore souvent la durée de vie résiduelle post-usage alors que les nouveaux produits proposent de nouvelles excellentes propriétés avec une garantie en clé.

  Le manque de données sur les effets au long terme des procédés de réutilisation des composants et celui sur les techniques de désassemblage impliquent une baisse de confiance des acteurs sur la validité des procédés de réutilisation.

  La possibilité, le cout et la durée du diagnostic pour la réutilisation peut être un obstacle affectant principalement le consommateur/client. En effet, pour certaines applications, l'indisponibilité de l'appareil n'est pas envisageable et donc selon la durée plus ou

moins longue de reconditionnement, l'utilisateur du convertisseur préférera acheter un neuf [22] (par exemple un onduleur photovoltaique doit être disponible à tout moment si l'utilisateur est dépendant de ce convertisseur pour sa consommation journalière énergétique dans le cadre d'une autoconsommation).
Et finalement, le manque de labélisation et de communication entre les acteurs sur les procédures à suivre et les interlocuteurs à viser pour une réparation réussie rapidement et à moindre cout ne permet à aucun acteur de la chaine de valeur de s'y retrouver. Dans le cadre d'un contrat de maintenance B2B, la situation est différente car le contrat émet des conditions qui crée une confiance mutuelle entre les deux entreprises qui réutilise leurs produits [23].

- **Les obstacles liés à la conception et de la fabrication du produit :**
  Les obstacles liés à la conception du convertisseur sont principalement d'ordre technique. Durant la phase de développement, le concepteur fait des choix de matériaux, de composants, de topologie, d'architecture et de méthode d'assemblage qui peuvent rendre le désassemblage plus ou moins difficile.
  Par exemple pour les composants CMS, l'ajout de la colle en polymère pour faire tenir les composants lors de brasure sur les PCB double face compliquera l'extraction future des composants. J'ajout de colles pour assurer une meilleure tenue mécanique pour les composants massifs montés en CMS ou pouvant subir des vibrations sera également un obstacle à l'extraction de la valeur résiduelle. Ou encore la suppression du plomb dans la crème à braser à fait augmenter les températures d'assemblage dans les fours à refusion et cela implique directement les performances du désassemblage.
  Ces contraintes issues de la conception et de la fabrication impliquent pour les acteurs qui vont prendre place dans la suite de la vie du produit (réparateur, extracteurs, reconditionneurs, recycleur) d'avoir en leur possession des outils et des méthodes de désassemblage spécifiques, des schémas de circuit, des spécifications plus détaillées sur le composant et son intégration au système.
  En plus des obstacles liés à la conception du hardware, d'autres problématiques liées au software (contrôle, capteurs…) sont aussi importants à noter. Ainsi, le changement d'un composant ou d'un convertisseur par un autre de seconde main peut affecter la structure générale et donc une mise à jour de la stratégie de commande ou du contrôle du convertisseur peut être nécessaire et cela peut se faire seulement si le concepteur met à disposition les fichiers source et que les codes soient facilement upgradables, sous-entendu que le produit intègre cette fonctionnalité. On touche ici un problème fondamental, lié à la fois à la sécurité des données et savoir-faire mais également à intégrité du produit et aux risques liés à de mauvais usages en lien avec une reprogrammation trop accessible.
- **Les obstacles réglementaires :**
  L'Union Européenne ainsi que quelques pays membres ont développé plusieurs régulations et réglementations comme « the EU Green Deal » ou encore « EU Eco-Design-Directive » pour favoriser la circularité dans les équipements électriques et électroniques. Cependant ces réglementations visent principalement les gros électroménagers et les appareils tous publics (réfrigérateurs, machines à laver, télévisions, téléphones, ordinateurs) et ne proposent pas de directive pour le véhicule

électrique, les onduleurs PV, les convertisseurs pour le chauffage résidentiel électrique ou les équipements industriels … [24]
Par ailleurs les fabricants de composants n'ont, actuellement, pas encore l'obligation formelle de mettre à disposition les pièces de rechange pour leurs équipements ou de proposer à la vente les outils spécialisés permettant le désassemblage pour des raisons de propriétés intellectuelles [25].

2.2. Les étapes en vue de la réutilisation

La réutilisation des composants issus d'un convertisseur à l'échelle industrielle n'est pas encore une pratique commune en électronique de puissance [26]. Il n'y a donc pas assez d'exemples industriels pour pouvoir déterminer les étapes précises de la réutilisation spécifique à l'électronique de puissance. Cependant il est possible de considérer le domaine de la mécanique comme un exemple car, dans ce domaine, la réutilisation est déjà établie et organisée [27].

On trouve plusieurs étapes dans le processus de réutilisation qui introduisent chacune du vieillissement des composants et des coûts supplémentaires.

Quand un système incluant de l'électronique de puissance tombe en panne, il s'agit d'abord d'effectuer un diagnostic de la carte dans son ensemble pour déterminer l'origine et la criticité du défaut. Ensuite, si la carte n'est pas réparable ou réutilisable dans son ensemble, il faut isoler les composants qui semblent être à l'origine de la panne ainsi que les composants affaiblis par cet évènement. Dans le cas où l'inspection visuelle permet de déterminer la gravité du ou des défauts, le composant a deux scénario de fin de vie.

Si l'opérateur juge que visuellement le composant est irrécupérable, ce dernier va dans un scénario de recyclage ou remanufacture. Dans le cas contraire, le composant est désassemblé de la carte, nettoyé et repasse à nouveau un dernier diagnostic évaluant son état après l'extraction.

Dans la littérature [28][29], la fiabilité des composants est souvent calculée par rapport au profil de mission du composant sans compter les processus d'assemblage et de désassemblage si celui-ci a lieu. Il est donc important de tester le composant après son extraction.

Dans certains cas les composants sont collés au PCB avec des colles Polymère ou recouverts de vernis pour plusieurs raisons :

Industrielle : Pouvoir assembler et braser les composants dans le cas d'un PCB double face ou éviter le mouvement des composants dans la chaîne d'assemblage [30].

Thermomécanique : permet de fixer correctement le composant dans le bon sens de l'air forcé pour éviter les vibrations liées au refroidissement du convertisseur, augmenter le contact pour l'extraction de la chaleur due aux pertes ou atténuer les vibrations dans le composant [31].

Ces colles doivent donc être dissoutes ou désolidarisées du composant chimiquement ou thermiquement.

La connexion électrique en forme de brasure dans la plupart des cas en électronique de puissance doit être fondue afin d'extraire le composant manuellement ou à l'aide d'un bras robotisé [32]. S'en suit le nettoyage des broches du composant et de son boitier. Dépoussiérer

le composant ou le circuit imprimé avec une brosse, un aspirateur ou un souffleur. Nettoyer les parties oxydées des broches ou du circuit imprimé si visuellement ils ont une couleur verdâtre ou brune constitués de carbonates et de sulfures dus à une atmosphère corrosive ou à la salinité. Nettoyer les fuites d'électrolyte ou des couches de graisse avec de l'alcool isopropylique.

Un nettoyage à l'eau et la brosse accompagné d'un séchage peut être suffisant dans certains cas et peut être une alternative pour des composants qui ne tolèrent pas certains alcools ou diluants comme les condensateurs électrolytiques avec le nettoyant trichloréthylène.

Pour extraire le composant il existe différentes méthodes qui seront décrites dans la partie suivantes.

2.2.1. Les moyens de désassemblage

Afin d'extraire un composant ou un sous-ensemble de composants d'un circuit imprimé, il faut faire fondre la brasure pour désolidariser les broches des « pads » du circuit imprimé. Le tableau 2 ci-dessous recense les différentes méthodes existantes d'assemblage qui peuvent aussi être utilisées pour le désassemblage, incluant leurs avantages et inconvénients [33] [34] :

Tableau 2 : Les différentes méthodes d'assemblage.

Méthodes	Outils	Avantages	Inconvénient
Découpe de surface	Sécateur	-Non-polluant -Efficace pour les composants volumineux	-Le circuit imprimé hôte est détruit -Nécessite un nettoyage -le composant est encore solidaire d'une partie du PCB
Manuelle	Fer à souder + tresse à souder	Facile à implémenter.	-Nécessite de la main d'œuvre -Lent et inefficace pour les petits composants.
Air chaud	Fer à air chaud	Rapide, non polluant	-Contrôle peu précis -Mauvaise efficacité énergétique -montée en température du composant
Radiateur infrarouge	Radiateur + vibration	Rapide, sans contact	-dommages causés par la chaleur
Four à refusion	Four à refusion + vibration	Rapide à la chaine, efficace pour les grands volumes de cartes défectueuses.	Chaleur non ciblée
Chimique	Solutions de traitement Epoxy ou de dissolution d'alliages d'étain.	-Vise directement la brasure -faible main-d'œuvre	-Polluant -Risque d'endommager le composant
Automatique	Bras robotisé	-Chaleur ciblée	faible débit et couteux [35]

Dans cette partie nous nous concentrons sur la technique du four à refusion car c'est la méthode la plus utilisée pour l'assemblage des composants CMS. Aussi dans ce cas, les machines et les méthodes sont déjà existantes dans les infrastructures des constructeurs. Il faut préciser que pour utiliser le four pour le désassemblage il faut y apporter quelques modifications pour automatiser l'extraction. Ajoutant à cela que le profil de refusion de toutes les techniques de désassemblage est plus ou moins similaire, elles diffèrent dans la température maximale de refusion et les durées de chaque phase du cycle. L'étude sur l'impact du four à refusion peut être donc extrapolée pour les autres techniques.

Le processus de refusion pour l'assemblage des composants comporte quatre phases. Chaque phase a sa consigne de température et son temps de maintien de cette température. Le profil de la consigne en température dépend de plusieurs paramètres, généralement de la nature du composants CMS, de la composition de la brasure et de la configuration du circuit imprimé.

Le début du cycle : Il s'agit de la phase où le PCB est monté graduellement de la température ambiante jusqu'à environ 150°C avec une certaine marge de tolérance entre 0.75°C et 2°C. La température du circuit imprimé se rapproche donc de la température de refusion. Le but d'arriver à ce premier palier est de prévenir le choc thermomécanique et d'évaporer les substances chimiques existantes sur le PCB.

Le préchauffage (trempage) : C'est la phase de l'égalisation de la température de tous les composants et du circuit imprimé. Dans cette phase la température n'augmente quasiment pas ou simplement légèrement. A cette étape le flux contenu dans la crème à braser est activé et élimine la couche d'oxyde se trouvant à la surface des broches et des « pads » ce qui permet un bon contact électrique.

Refusion : Pendant cette phase les grains de la poudre de brasure fondent et forment des liaisons métalliques entre les broches des composants et les pistes en cuivre du PCB. La température doit donc atteindre le pic permettant à l'étain de passer d'un état solide à un état liquide.

Refroidissement : à ce moment le PCB refroidit naturellement grâce à un ventilateur pour arriver à température ambiante. Cette phase est la plus longue car elle doit être effectuée avec précaution pour ne pas causer de chocs thermo-mécaniques ou décoller les composants et ainsi obtenir un joint de soudure fort et propre. Cette étape est seulement présente pendant l'assemblage, elle est moins essentielle pour le désassemblage.

La figure 24 schématise un four à refusion et son profil de température. Celui-ci comprend plusieurs zones séparées et un tapis roulant contrôlant le temps de passage de la carte d'une zone à une autre. Il existe d'autres technologies de four à refusion, des fours à refusion plus compacts avec seulement une zone ou la résistance thermique est contrôlée pour obtenir les différentes phases. Le four multizones est le plus utilisé car il permet de traiter les circuits imprimés à la chaîne.

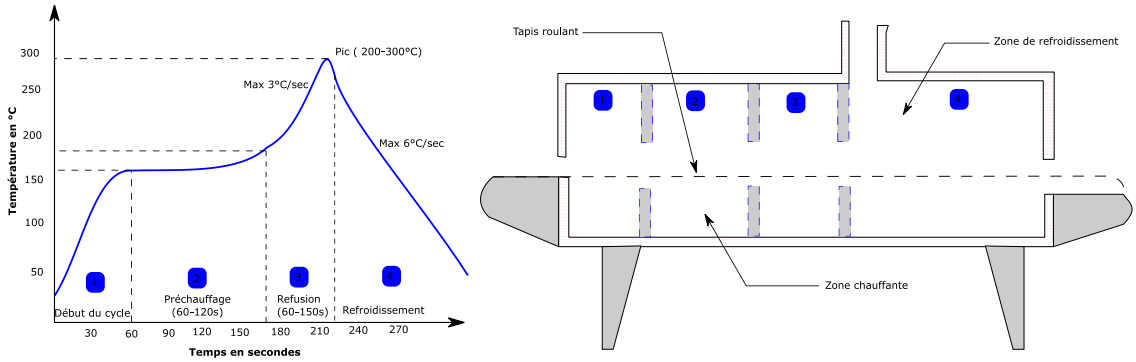


Figure 24 : A gauche un profil de refusion classique, à droite le schéma du la structure d'un four à refusion avec les différents secteurs qui correspondent aux différentes étapes du profil de refusion.

Le four à refusion est paramétré selon la taille des composants, le nombre de connexions, la taille du PCB mais aussi et surtout le type de la crème à braser.

Il existe deux grandes familles de brasure, l'une contient du plomb, l'autre n'en contient pas. Ainsi chaque type de brasure diffère dans son comportement pendant le processus de refusion.

Brasure avec Plomb : Les alliages contenant du Plomb fondent généralement à une température relativement basse aux alentours de 180°C, un trempage de 120s maximum et le cycle de refusion total dure 6min. Les brasures au plomb offrent plusieurs avantages notamment la température de refusion basse en comparaison avec le SAC (Etain-Argent-Cuivre) [36]. Dans plusieurs applications domestiques le Plomb fut interdit après l'apparition, en 2011, de la directive européenne RoHS qui vise à limiter l'utilisation de quelques substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques. Ces alliages sont souvent constitués de 60% d'étain et de 40% de plomb. (Sn62Pb36Ag2 ou Sn63Pb37). Ajoutant à cela, la soudure offre d'autres avantages économiques et aussi commerciaux avec l'aspect brillant de cette soudure.

Brasure Sans Plomb : Ce sont les alliages compatibles avec la directive RoHS. Ces alliages sont souvent composés de 90% d'étain et fondent à une température plus élevée jusqu'à 270°C et sont plus onéreux. Le temps de trempage augmente aussi de 30s en moyenne et la durée de refusion double (de [10s-30s] à [20s-40s]). Les alliages sans plombs gardent cependant les mêmes caractéristiques de pente de monté et de descente en température que ceux contenant le plomb (3°C/s pour le préchauffage et 6°C/s pour le passage de la température de refusion à la température ambiante)

L'industriel sélectionne donc l'alliage et le type de flux adéquat pour son application. Le graphique ci-dessous place les alliages dans un abaque de sélection les triant selon quatre paramètres (conductivité thermique, résistance mécanique, énergie d'activation et la température de refusion)

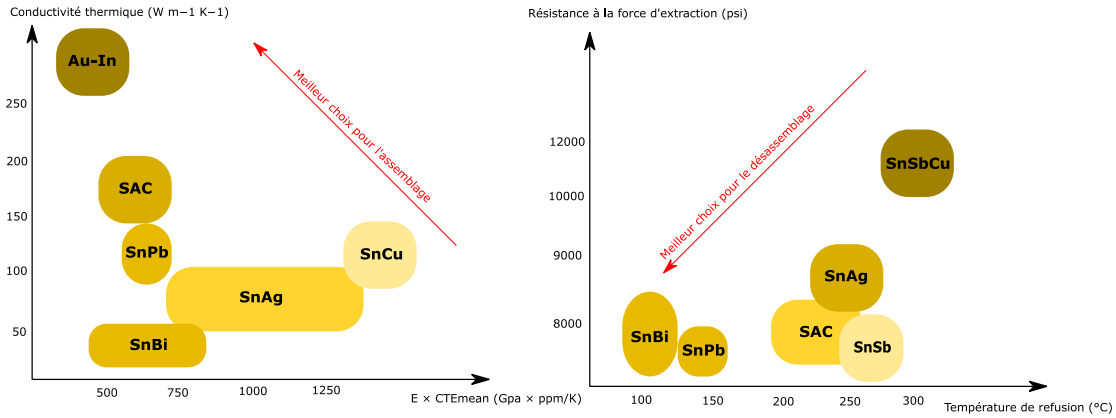


Figure 25 : Abaques de choix des alliages de brasure [37].

Le choix de l'alliage est conditionné par quatre paramètres, le pourcentage en plomb, la température de refusion, le diamètre des grains des particules et la résistance mécanique des joints de soudure. Le pourcentage de plomb, la résistance mécanique ainsi que la température de refusion vont ensemble pendant le choix. La figure 25 permet de faire ce choix. Concernant le diamètre des grains métalliques, l'utilisation de gros grains rend l'impression des traces de brasure plus difficile et compromet la qualité et la précision des traces. Cependant les plus petits grains sont plus couteux.

La pâte à braser est souvent accompagnée de flux qui permet d'accélérer la création de liaisons entre l'étain et les broches en cuivre du composant et évite l'oxydation du cuivre en même temps. Choisir un flux adéquat est donc très important. Il existe trois grandes familles de flux (des flux à base de résine R, des flux inorganiques NR et des flux hydrosolubles WS). Les paramètres de choix de flux sont le degré d'activité et la facilité de nettoyage.

Quelques flux ne peuvent pas rester actifs pendant des profils de refusion long et certains peuvent être facilement nettoyés à l'eau. Les flux hydrosolubles sont populaires car ils ne sont pas soumis à la taxe pollution et son efficacité pendant la refusion est haute. La figure 26 ci-dessous résume cela en forme d'abaque de choix. Les flux à base de résine ne nécessitent quasiment aucun nettoyage.

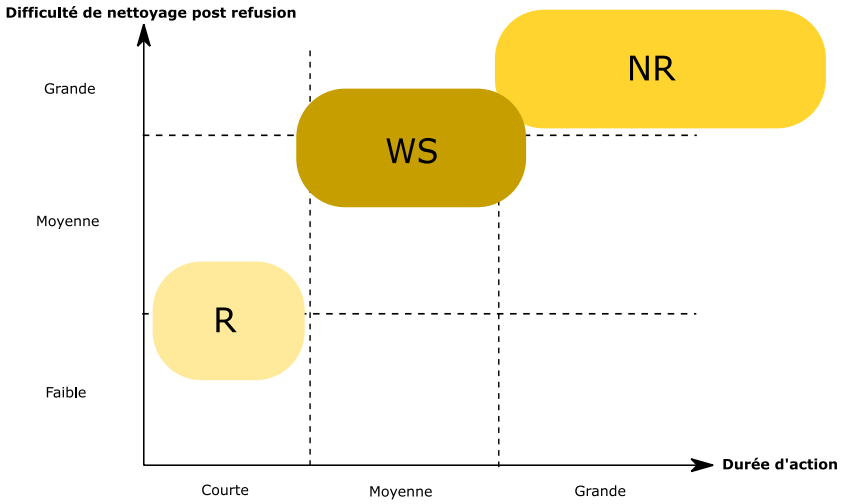


Figure 26 : Abaque de choix des flux

Cette partie a décrit les moyens d'assemblage des composants CMS sur des circuits imprimés. Ces méthodes doivent être inversées afin de désassembler les composants. Les contraintes des techniques d'extraction et celles liées au choix des types de brasure affectent les profils de refusion et donc l'efficacité de l'extraction. La partie suivante développe les effets du vieillissement liés à ces contraintes.

2.2.2. Les défauts liés à l'extraction

Le choix du cycle de refusion résulte d'une pondération des contraintes imposées pas tous les composants présents sur le circuit imprimé. Certains composants sont équipés de pate à braser au préalable et pas nécessairement celle utilisée dans le circuit imprimé dans sa globalité. D'autres composants imposent des temps de monté et descente en température, les températures maximales de refusion ou encore les durées des phases du cycle de refusion.

Cependant, même en respectant les limites thermomécaniques des composants données par le constructeur, les cycles de refusion induisent de fortes contraintes qui engendrent un vieillissement accéléré du composant. Cela sera détaillé dans les parties suivantes pour trois exemples de composants passifs.

Théoriquement selon les modèles FIDES de fiabilité, si en plus d'une utilisation normale du composant, ce dernier est extrait et replacé dans un autre convertisseur pour la même application, la fiabilité en fonction du temps sera légèrement impactée. La figure 27 ci-dessous montre l'exemple de l'évolution de la fiabilité d'un transformateur HF extrait grâce à un four à refusion et réutilisé. L'extraction dans cet exemple ne prend pas en compte les contraintes mécaniques de vibration liée au processus d'extraction, les contraintes induites par le nettoyage du composant et les contraintes de stockage du composant avant utilisation. Les courbes ci-dessous sont obtenues en utilisant les modèles FIDES [38] sur la fiabilité (voir chapitre correspondant).

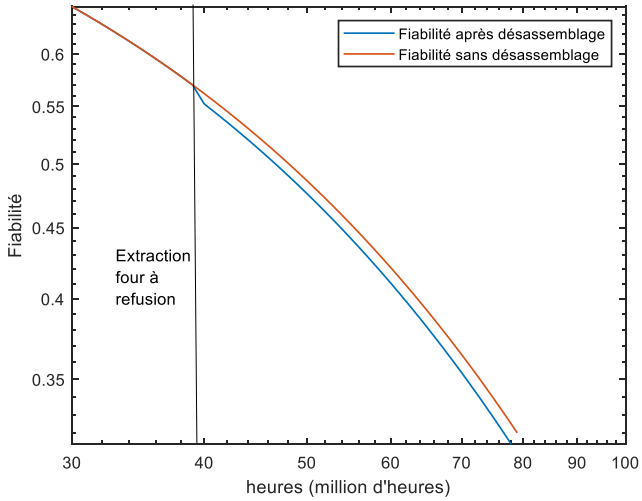


Figure 27 : Exemple de l'évolution de la fiabilité d'un transformateur HF avec ou sans désassemblage.

Les mécanismes de défectivité sont classifiés en deux groupes, les mécanismes à long et court termes. Ainsi comprendre l'impact que le désassemblage a sur le composant nous permet de calculer l'impact de cette récupération sur sa durée de vie totale. Le passage au four n'affecte pas seulement le composant visé pour la réutilisation mais aussi tout le circuit imprimé hôte.

Tableau 3 : Les différents effets à long et court termes dus au désassemblage.

Types de mécanismes de défaillance	Le mécanisme de défaillance	Les causes de défaillance
Effets à long terme	Fatigue des connexions, des « pads » et des die attach	Cyclage thermique fort, la température de refusion, la durée de trempage.
	Corrosion	Sur chauffage du flux, température de refusion
	Rupture diélectrique	Température de refusion et assèchement de la résine
Effets à court terme	Formation de filaments conducteurs	Cyclage thermique fort
	Oxydation	Disparition du flux, cyclage de refusion répétitif
	Rupture diélectrique ou mécanique	Température de refusion et assèchement de la résine

Le tableau ci-dessus résume dans les grandes lignes les causes principales de vieillissement des composants dû à un profil thermique selon l'étude [39]

Dans les exemples d'étude des parties suivantes, les causes de défaillance dues à l'extraction spécifique du composant sont plus détaillées.

Les parties suivantes s'appuient sur des études statistiques qui traitent de l'impact du four à refusion sur les fonctions électriques d'une sélection de composants passifs (transformateur, inductance et condensateur électrolytique).

La connaissance de ces impacts permet d'évaluer la diminution de la valeur fonctionnelle du composant après son extraction.

3. L'impact du désassemblage sur les composants d'électronique de puissance

3.1. Introduction

Dans les systèmes énergétiques, les convertisseurs constituent le point faible en fiabilité réduisant ainsi la durée de vie totale de ces systèmes. Les convertisseurs sont responsables de 37% en moyenne des maintenances des systèmes énergétiques [40]. La maintenance peut être préventive. Dans ce cas quelques composants sont remplacés, quelques tests et mesures sont effectués pour déterminer l'état du convertisseur. La maintenance peut aussi être corrective, quand un défaut à lieu. Il faut isoler la panne et remplacer les composants qui n'ont pas survécu à celle-ci.

La réutilisation des composants pour une seconde vie après une panne n'est pas encore une pratique commune en électronique de puissance puisqu'on ignore l'effet des moyens de réparation sur les composants et leurs durées de vie fonctionnelle restante.

Un composant peut être réutilisé si la panne du système hôte antérieure ne l'a pas affecté. Il peut donc soit garder sa fonction dans le même système en réparant les composants défaillants ou l'extraire de sa première fonction pour le réutiliser dans une autre. Dans les deux cas, le composant sain doit passer par des processus de réutilisation/réparation qui imposent des contraintes thermiques et électriques comme expliqué dans la section précédente 2.3. Dans cette partie, il s'agit de quantifier l'impact de ces processus principalement la partie « extraction/désassemblage » du composant de manière statistique. A partir de cela, on pourra conclure sur l'impact des processus de réutilisation sur la durée de vie fonctionnelle restante.

Deux exemples ont été choisis ; le transformateur et le condensateur électrolytique.

Le transformateur est un composant massif, volumineux et couteux et souvent fiable ce qui implique que sa valeur résiduelle initiale soit élevée et donc justifie l'intérêt de penser à le réutiliser.

Les condensateurs quant à eux, sont massifs, volumineux, relativement moins cher et souvent constituent le sous ensemble le moins fiables en électronique de puissance comme le monte la figure 28.

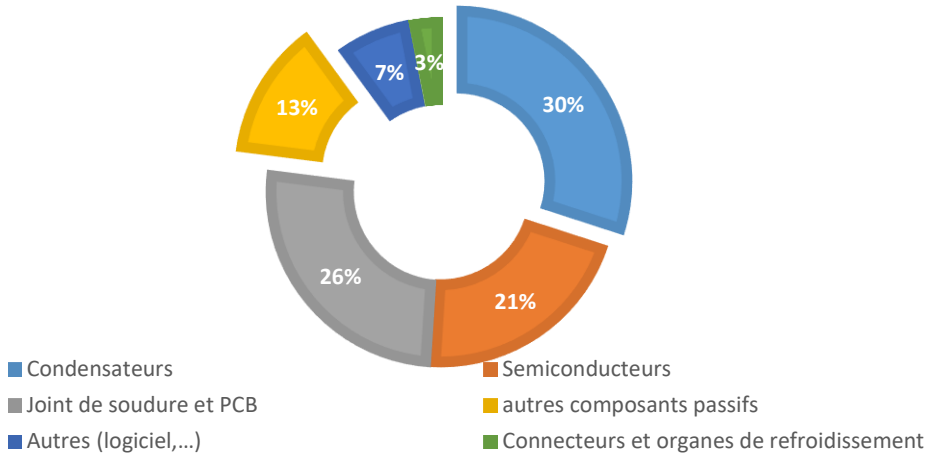


Figure 28 : La distribution des défauts au niveau des composants dans un convertisseur de puissance standard [41];

Le condensateur n'a donc pas une « valeur fonctionnelle » élevée et donc n'incite pas à sa réutilisation. Mais dans le cas d'une maintenance prédictive, les condensateurs peuvent être retirés avant l'occurrence de la panne pour assurer la continuité d'usage du convertisseur. Les condensateurs ainsi extraits peuvent quant à eux subir un processus de recyclage spécifique efficace. Néanmoins si le moyen d'extraction n'isole pas les condensateurs pendant le désassemblage, tous les composants du convertisseur subissent le même profil de refusion. Mais comme les condensateurs sont les composants les plus fragiles de la carte, leur réutilisation est donc moins rentable, cette première partie tend à prouver cela.

Cette section sera divisée en 2 parties. Il s'agit d'abord de se pencher sur les condensateurs électrolytiques CMS sont considérés dans une perspective d'extration en vue d'une maintenance prédictive. Ensuite les transformateurs planaires HF seront pris en exemple dans la perspective d'une extraction de valeur résiduelle. Ensuite les résultats sont regroupés pour créer un indicateur de désassemblage servant à quantifier la valeur fonctionnelle du composant après désassemblage.

3.2. Désassemblage des condensateurs électrolytiques CMS

Les condensateurs électrolytiques sont très fréquents dans les circuits de l'électronique de puissance car ils permettent d'avoir des valeurs de capacités très élevées à des volumes et prix intéressants [42]. Cela permet de stocker de l'énergie localement pour filter les grandeurs électriques et effacer les micro-coupures d'alimentation. Il existe deux types de condensateurs électrolytiques, en aluminium et au tantale mais les condensateurs à l'aluminium sont les plus répandus et sont principalement utilisés pour le filtrage ou pour réaliser des réservoirs d'énergie.

Les condensateurs électrolytiques à l'aluminium sont généralement constitués d'un boitier hermétique en aluminium ne permettant pas l'échappement de l'électrolyte, d'un empilement de feuilles d'aluminium et d'isolants imprégnés d'électrolyte, d'un disque en caoutchouc servant de joint et d'un couvercle afin de sceller l'intérieur du condensateur. Finalement deux bornes regroupent les feuilles d'anode d'un côté et les feuilles de cathode de l'autre. La figure 29 schématise le condensateur en aluminium choisi dans cette étude. La figure 30 réalise un

zoom sur l'interface anode-cathode en forme de croquis simplifié. Comme le montre la figure, nous nous intéressons ici au démontage des condensateurs électrochimiques montés en CMS. C'est une famille particulière de condensateurs, conçus pour supporter le cycle de refusion dans le four. C'est à un titre un composant particulier.

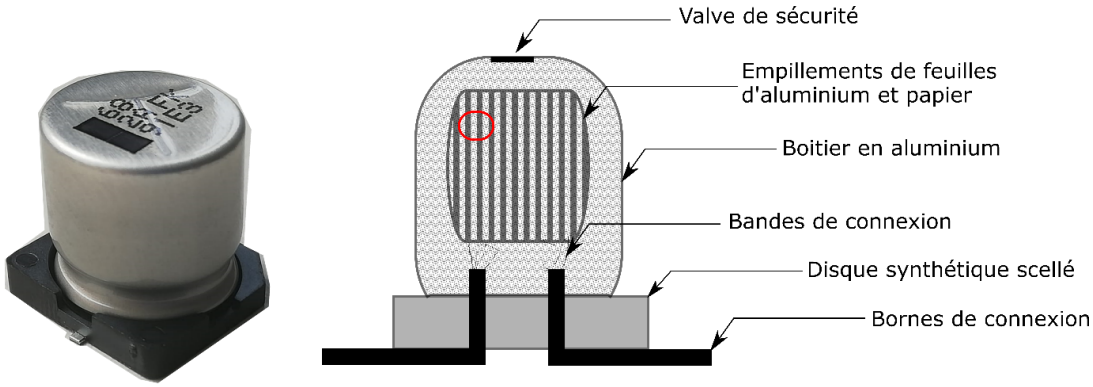


Figure 29 : Photo et Schéma d'un condensateur électrolytique aluminium à montage en CMS [43];

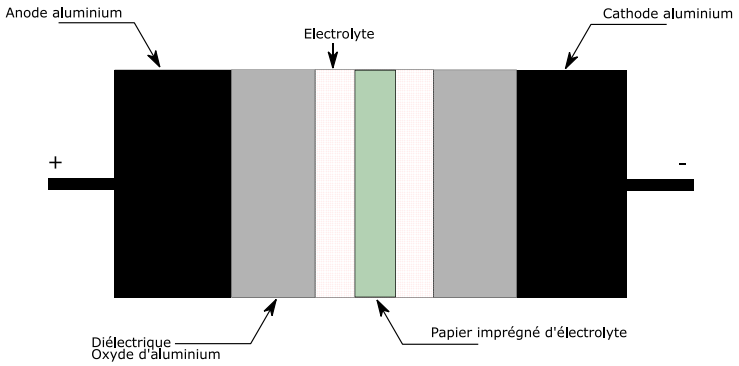


Figure 30 : Zoom sur le cercle rouge de la figure précédente, l'interface cathode-anode [44];

La plupart des condensateurs électrolytiques ont une valve de sécurité en cas de surpression due à l'évaporation de l'électrolyte comme visible sur la figure 29.

Les condensateurs sont souvent représentés par une capacité C en série avec une résistance série appelée ESR. D'autres représentation incluent une inductance série ESL mais dans le cas de notre étude, nous admettons que ces condensateurs fonctionnent à des fréquences faibles ce qui nous permet de ne pas nous intéresser à la valeur et l'évolution éventuelle de l'inductance série. Un dernier paramètre important est à prendre en compte. Il s'agit de la fuite au niveau de l'interface anode cathode. Cette fuite est en général caractérisée par une résistance parallèle EPR qui matérialise le courant de fuite du condensateur. Lorsque le composant vieillit, les trois paramètres C, ESR et EPR évoluent jusqu'à des niveaux qui nécessitent leur remplacement. L'observation de ces paramètres permet par ailleurs d'évaluer le niveau de dégradation ou encore l'état de santé du composant.

Un condensateur idéal a une valeur de capacité comme suit :

$$C_{idéal} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{e} \qquad (2.17)$$

Avec :
ε_0 la permittivité absolue du vide ($\varepsilon_0 = 8{,}85.10^{-12} F/m$)
ε_r la permittivité relative du diélectrique
S la surface entre anode et cathode (m^2)
e l'épaisseur du diélectrique en (m)

En réalité, le condensateur contient plusieurs défauts de conception qui rendent sa modélisation plus complexe. Les valeurs de la capacité et la résistance série deviennent :

$$C(w) = C_{idéal}\left(1 + \frac{1}{R_p^2 C_{idéal}^2 w^2}\right) \qquad (2.18)$$

$$ESR(w) = R_s + \frac{R_p}{1 + R_p^2 C_{idéal}^2 w^2} \qquad (2.19)$$

Avec
R_p est la résistance du diélectrique compte tenu des défauts dans le diélectrique.
R_s est la concaténation de la résistance des connexions, des électrodes et du papier imprégné.

Finalement le modèle le plus largement utilisé figure 31, considéré dans ces travaux délimite deux zones de fonctionnement du condensateur, une zone basse fréquence où le comportement est plutôt capacitif et où son utilisation est la plus répandue pour le filtrage et une zone proche de la fréquence de résonance où le condensateur a un comportement résistif.

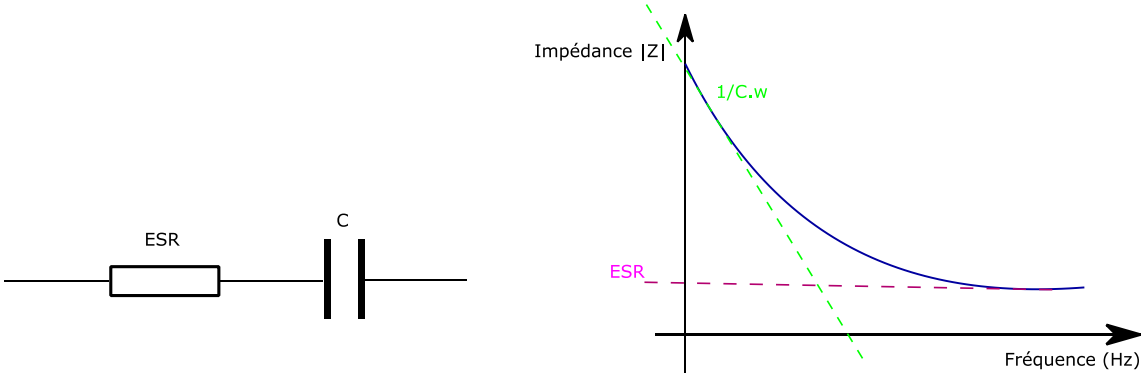


Figure 31 : Modèle théorique d'un condensateur;

Les caractéristiques d'un condensateur (ESR, EPR et C) sont dépendantes de la température, de la fréquence et de la tension [45] [46]. Dans le cas de l'extraction en vue de la réparation, nous nous intéressons qu'aux contraintes thermiques. Les modes de défaillances causés par les contraintes thermiques sont nombreuses mais dans tous les cas le vieillissement générique implique l'accroissement de l'ESR et la diminution de C [47].

Le vieillissement est principalement dû à la dégradation de la couche d'oxyde, la transformation d'état de l'électrolyte et la consommation de ce dernier. Durant le cycle de refusion pendant l'extraction il faut faire particulièrement attention de ne pas dépasser le point d'ébullition de

l'électrolyte car cela risque d'être irréversible et destructeur pour le condensateur. L'électrolyte peut aussi fuir de plusieurs manières, soit par diffusion à travers le joint en disque (figure 29) ou pendant l'auto-régénération de l'oxyde de la couche diélectrique [48].

La figure 32 ci-dessous résume les mécanismes principaux de défaillance. Comme évoqué plus haut, trois indicateurs principaux se distinguent pour détecter le vieillissement des condensateurs.

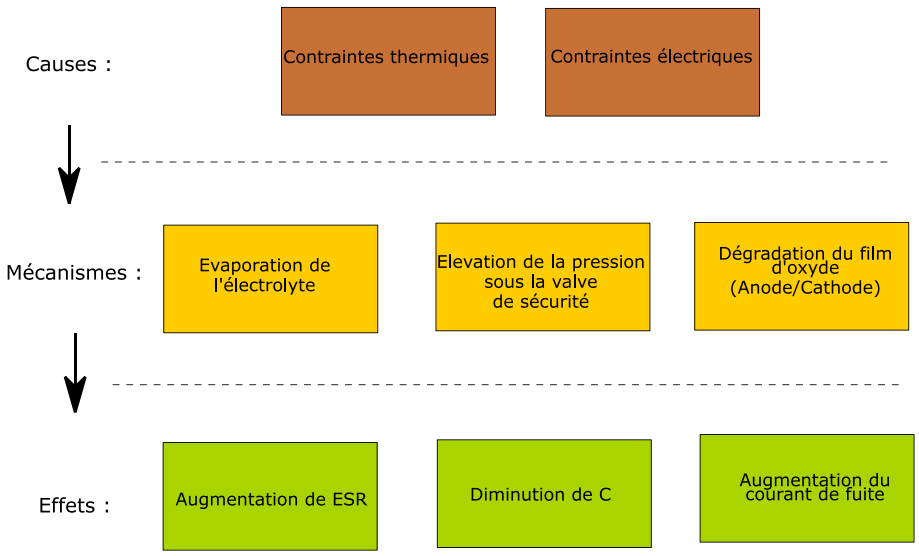


Figure 32 : Causes, mécanismes et effets de défaillance d'un condensateur.

Il existe dans la littérature des méthodes de pronostic de défaillance des condensateurs électrolytiques basés sur des modèles de vieillissement théoriques d'Arrhenius et des essais de vieillissement accéléré [49] [50] [51] [52]. Ces méthodes proposent d'évaluer l'ESR, C ou le courant de fuite et de comparer le résultat par rapport aux valeurs initiales pour un composant neuf.

Dans les normes [53], [54] la fin de vie d'un condensateur est définie par une augmentation de l'ESR de 100% et une diminution de la capacité de 20% par rapport à leurs valeurs initiales. Nous avons donc fait le choix de nous concentrer sur l'étude du vieillissement des paramètres C et ESR pour lesquels des seuils limites sont clairement établis.

Ainsi, pour déterminer l'impact d'accélération de vieillissement due à l'extraction des condensateurs électrochimique, nous utiliserons les deux paramètres ESR et C comme indicateur de vieillissement.

- **Plan expérimental :**

Les condensateurs sont soumis à plusieurs cycles de refusion interrompus par des mesures de l'ESR et de la capacité C pour évaluer leurs évolutions. Un échantillon de dix condensateurs CMS a été utilisé durant les tests et les mesures.

Le condensateur CMS utilisé est fabriqué par Panasonic sous la référence ZA series [55] et a les caractéristiques suivantes fournies par le constructeur et résumées dans le tableau 4 ci-dessous. Ce condensateur est une pièce majeure de la partie DC/AC des cellules des cellules standards de conversion (CSC) de type DC/AC développées au G2ELab dans le cadre de l'approche de conception modulaire des réseaux de convertisseurs [56].

Tableau 4 : Les caractéristiques du condensateur électrolytique choisi [55].

Caractéristiques	**Valeurs**
Forme	Cylindrique ;
Dimensions	Diamètre 5mm, hauteur : 6mm
Capacité	33µF
Température maximale	105°C
Tension nominale	7 V
ESR max (120Hz,20°C)	300mOhm
Nombre de passage possible au four	1 à 2 fois
MTBF théorique (Sollicitation nominale)	5 ans

Il s'agit de mesurer initialement les valeurs de C et de l'ESR des 10 condensateurs avant de les mettre dans le four pour 5 cycles de refusion d'une température maximale de 270°C pendant 30s pour la phase de refusion et à 100°C pendant 120s pour la phase de trempage. Puis, à la suite des 5 passages au four, une seconde mesure est effectuée et ainsi de suite tel que illustré dans la figure 33. Chaque passage au four dure 10min, 5min de refusion et 5min de refroidissement pour assure un retour à température ambiante dans les meilleures conditions.

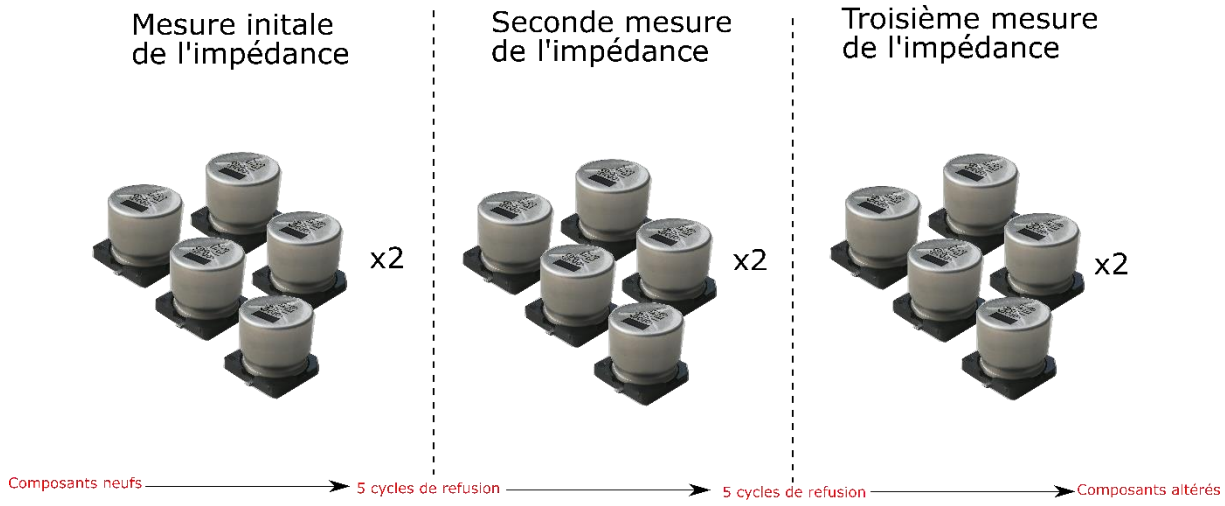


Figure 33 : Protocole expérimental des passages au four des condensateurs CMS

Les mesures initiales effectuées sur les 10 condensateurs neufs permettent d'obtenir ces valeurs :

Tableau 5 : Les indicateurs de vieillissement et leur dispersion initiale.

Indicateur de vieillissement	Valeur
ESR (à 120Hz) en mΩ	300
Ecart-type de ESR en mΩ	±15 (5%)
C (à 120 Hz) en µF	25
Ecart-type de C en µF	±5 (20%)

Les mesures ont été effectuées avec un impédance mètre Agilent qui permet d'obtenir le module de l'impédance et la phase des condensateurs dans une plage fréquentielle de quelques Hertz à 50MHz. Dans le cas de la mesure de ces paramètres nous avons choisi un schéma équivalent série en configuration « Rs-Cs »

- **Résultats :**

Avant de présenter et d'analyser les résultats, il est important de vérifier les possibles erreurs et sensibilité des mesures. En plus de la précision de la température du four qui est à ±2°C, la fiche technique de l'impédance mètre nous donne l'erreur de mesure pour la valeur de la capacité [±0.3% ; ±1%] et celle de ESR [±3% ; 7%].

Les résultats des mesures se trouvent dans la figure 34 ci-dessous. Celle-ci présente la variation de l'ESR et de la capacité C des condensateurs à 120Hz après plusieurs cycles de refusion. Les condensateurs qui deviennent purement résistifs sont retirés de la mesure et considérés comme étant défaillants. Sur les 10 condensateurs initiaux, 3 d'entre eux ont eu une valeur de ESR très grande (condensateurs inutilisables) après quelques cycles de refusion.

La résistance équivalente est en grande partie due à la résistivité de l'électrolyte. Son augmentation tel que cela est observé dans figure 34 implique le vieillissement du composant et surtout la perte graduelle de sa fonction principale. Cependant les modes de défaillance peuvent être multiples puisqu'il est difficile de lier l'augmentation de l'ESR à un seul mode. Cela peut dépendre de la perte d'étanchéité du composant, de l'auto régénération de la couche diélectrique [47] …

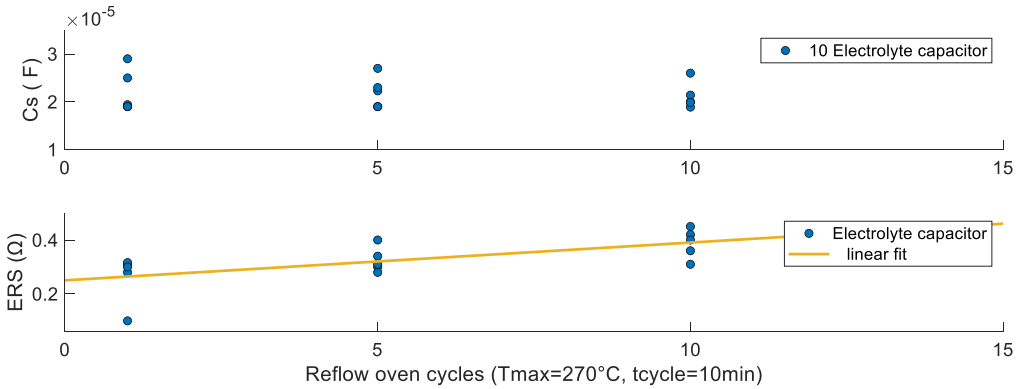


Figure 34 : Evolution de ESR et C Pour les condensateurs CMS à l'aluminium par rapport à un nombre de passages au four à refusion.

La résistance ESR augmente après 5 passages au four de 25%. Le taux d'augmentation dépasse la sensibilité de mesure de l'impédancemètre et des capteurs de température dans le four ce qui démontre une réelle augmentation de ESR. En effectuant une régression linéaire, nous pouvons estimer la valeur de l'ESR après n certain nombres de cycles.

$$ESR_t(n) = 0.04.n + ESR_i \qquad (2.20)$$

N est le nombre de cycles et ESR_i est la valeur initiale de ESR.

Le modèle linéaire pour ESR est très présent dans la littérature, initialement pensé par Cathey et Joyner [57]. Il permet de prédire l'évolution de l'ESR selon la température de fonctionnement.

$$\frac{1}{ESR(t)} = \frac{1}{ESR(0)}\left[1 - \alpha.t.e^{-\frac{4700}{T}}\right] \qquad (2.21)$$

Concernant la capacité, qui elle dépend du diélectrique dans les condensateurs, une légère diminution est à noter mais pas assez importante pour pouvoir tirer des conclusions. La diminution de la capacité s'opère quand le diélectrique se dégrade jusqu'à sa perdition [47]. La valeur de la capacité diminue dans le domaine des hautes fréquences au-delà de cent kHz alors que la résistance série équivalente augmente elle sur toute la plage fréquentielle comme le montre figure 35.

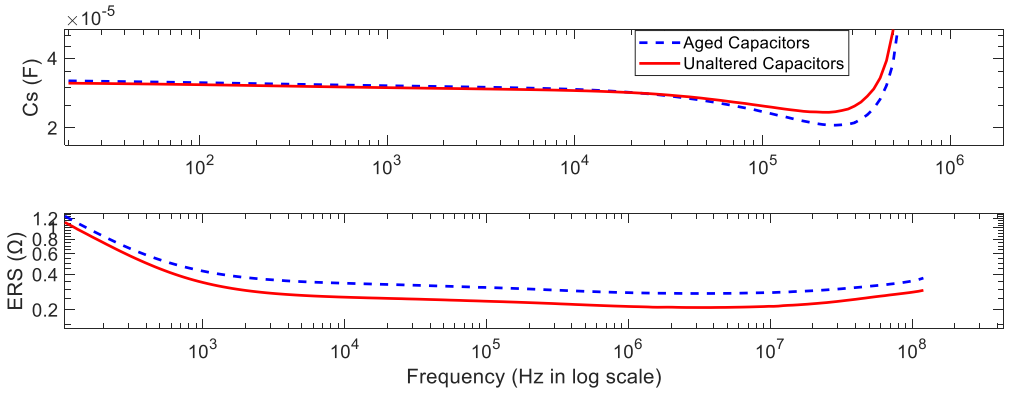


Figure 35 : Evolution de la moyenne de l'ESR et de C des condensateurs CMS après 10 passages au four.

Comme on peut voir l'ESR est un bon indicateur de vieillissement, suffisamment sensible pour pouvoir détecter l'impact d'un désassemblage sur les condensateurs une fois comparé à la valeur initiale.

- **Analyse des résultats :**

Les contraintes principales du vieillissement des condensateurs électrolytiques sont la température, la tension appliquée à leurs bornes et l'ondulation du courant les traversant. Dans

le cas d'un procédé de désassemblage, seule la température influe sur la durée de vie du condensateur. Dans la littérature un condensateur est considéré usé si sa capacité diminue de plus de 20% de valeur initiale et son ESR augmente de 100%.

Les tests de vieillissement des condensateurs chimiques se rapportent à la norme IEC60384-4. Les condensateurs sont soumis à leur tension nominale et à leur température maximale et tout le long de ces tests les valeurs de capacité et d'ESR sont observées. Il faut ajouter à cela les tests de vieillissement dus aux procédés de désassemblage.

- **Conclusion:**

Les essais de vieillissement accélérés dans le four à refusion sur les condensateurs électrolytiques ont mis en exergue l'impact des procédés de désassemblage sur les caractéristiques de ce composant. Les condensateurs électrolytiques ne sont généralement pas réutilisés car ils sont considérés comme l'une des causes principales de défauts. Ces composants fragiles sont souvent recyclés pour en obtenir la matière première. D'autres études s'intéressent à la remanufacture des grands condensateurs électrolytiques en remettant à niveau l'électrolyte ou en nettoyant les cathodes et anodes. Et donc la connaissance de l'impact du désassemblage sur la durée de vie pourrait devenir nécessaire.

Les condensateurs électrolytiques montrent des valeurs faibles de nombre de passages au four à refusion, suffisante pour seulement un assemblage sur PCB.

3.3. Désassemblage des transformateurs HF planaires CMS

Le transformateur HF est considéré comme étant l'un des composants les plus durables et résilients dans un circuit d'électronique de puissance. Ce composant sert à transformer une tension alternative en une autre tension alternative de même fréquence mais d'amplitudes différentes afin de l'adapter à l'application. Il peut aussi servir à isoler galvaniquement une partie d'un circuit, par exemple la source de la charge ou la partie commande de l'étage de puissance d'un convertisseur.

Le transformateur étudié ici est présenté figure 36. Il est produit par la société Coilcraft sou le référence « 120W PoE smt PLANAR » [58]. Il est constitué de deux ou plus enroulements couplés magnétiquement grâce à un noyau magnétique. Ce transformateur est l'un des principaux constituant des cellules standards de conversion dans l'approche réseaux de convertisseurs développée au G2ELab. C'est un élément fondamental, qui permet justement la mise en réseau des CSC dans n'importe quelle configuration [59]. Il sert à la fois dans le CSC DC/DC mais aussi dans le CSC DC/AC. Ci-dessous les principales caractéristiques du composant.

Tableau 6 : Les caractéristiques du transformateur coilcraft choisi.

Caractéristiques	Valeurs
Technologie	Transformateur HF planaire
Dimensions	4600mm^3 de Ferrite
Température ambiante maximale	-40°C à 125°C

Inductance magnétisante (±20%)	50µH
Inductance de fuite	0.37 µH
Tension de tenue diélectrique AC	1500 V (pendant 1min)
Nombre de fois de passage au four à refusion	3 fois (refusion de 40s à 260°C)

Dans un transformateur idéal, si une tension V_1 alternative est appliquée aux bornes du bobinage primaire, une tension V_2 est mesurée aux bornes du secondaire et vérifie l'équation ci-dessous :

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} = m \qquad (2.26)$$

Les différents constituants du transformateur étudié sont affichés dans la figure 36 ci-dessous. Il s'agit d'une technologie particulière de transformateur appelé « planar » puisque les enroulements ne sont pas cylindriques mais plan.

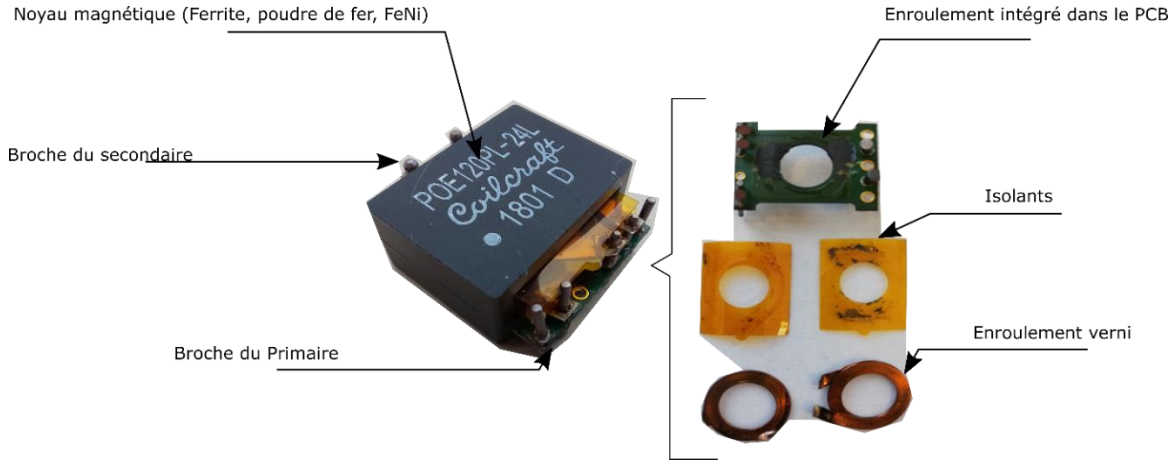


Figure 36 : Vue éclaté d'un transformateur planaire Coilcraft.

Dans un transformateur réel d'autres paramètres doivent être pris en compte : Les résistances électriques des enroulements primaires et secondaires, qui représentent les pertes Joules dans le composant, la valeur de l'inductance magnétisante, qui participe à la définition de la fréquence de fonctionnement, la tenue diélectrique entre les différents enroulements mais aussi les pertes fer ainsi qu'un couplage imparfait entre les bobinages induisant des flux de fuite.

Dans le modèle équivalent figure 37, l'inductance magnétisante ainsi que la résistance fer (R_u et L_m) permettent de tenir compte de la magnétisation du circuit magnétique et des pertes fer dans celui-ci. Les résistances R_1 et R_2 représentent les pertes Joules dans les enroulements. Les inductances de fuites (L_{f1} et L_{f2}) tiennent compte des imperfections de couplage entre les bobinages primaires et secondaires. Enfin, la capacité entre le primaire et le secondaire évalue les changements d'épaisseur ou de caractéristiques diélectriques de l'isolant.

Le modèle simplifié du transformateur planaire se trouve figure 37, avec tous les paramètres vu plus haut.

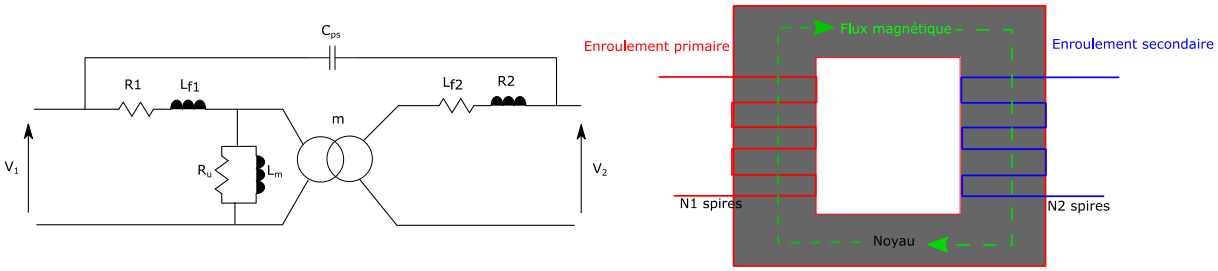


Figure 37 : Schémas électrique équivalent et de principe d'un transformateur magnétique.

Concernant ce type spécifique de composant, basé sur un noyau magnétique en ferrite, plus des enroulements en PCB + des fils plats en cuivre, la littérature [60] fait état de trois principaux types de dégradation et des indicateurs pour les expliquer :

-La dégradation de l'isolation : On peut rencontrer plusieurs types d'isolation dans les transformateurs planar. Lorsque les bobinages sont réalisés dans un circuit imprimé multicouches l'isolation est réalisée par la résine époxy FR4 du PCB. Si les conducteurs sont massifs tels que ceux utilisés ici ils sont alors vernis. En compléments de ces isolations interspires ont peut aussi trouver des isolants inter bobinages réalisés avec des films de chlorure de polyvinyle, du vinyle, du mica. Avec la température, la plupart des matériaux diélectriques vieillissent, deviennent noirs et se fissurent et voient leurs propriétés diélectriques diminuer.

Pour mesurer cette dégradation, il est possible d'effectuer des essais de décharge partielle, ou de mesurer la capacité primaire-secondaire et la résistance parallèle. L'évolution de ces grandeurs est connue comme étant un précurseur de défaillance de l'isolation [61]. Ces mesures ne sont pas destructrices et peuvent donc être réalisées pour qualifier un composant que l'on souhaiterait réutiliser.

-La dégradation du noyau magnétique : le noyau magnétique que nous utilisons (Ferrite) est plutôt stable en température [62] comparé à la poudre de fer. Bien que l'analyse citée soit réalisée avec des températures allant jusqu'à 165°C, nous considérerons dans un premier temps que cela reste le cas pour des températures plus élevées. Le vieillissement du noyau magnétique, issu de l'assemblage de deux ou plusieurs pièces, est principalement attribué à la colle du noyau qui tend à se dissiper avec le temps [63]. Le fait que cette colle ne remplisse plus complètement sa fonction va donner la possibilité au circuit magnétique, en général constitué de 2 parties, soit deux E soit une E et un I, de se déformer par glissement d'une partie par rapport à l'autre. Cela aura pour impact de modifier l'inductance magnétisante par création d'entrefer parasite ou par modification des entrefers existants. La valeur de l'inductance magnétisante est alors un bon indicateur pour mesurer cette dégradation car elle indique l'évolution de la réluctance du noyau.

-La dégradation du bobinage du fil plat et du PCB : l'isolation du vernis de la spire de cuivre s'atténue et le PCB se courbe avec la chaleur, produisant des déformations conduisant à des fissures. Sous l'effet de la chaleur, l'espace entre les bobinages est modifié puisque les brasures qui maintiennent ces derniers en place sur les broches se déplacent. Cela a pour conséquence d'exposer le cuivre à l'oxydation et de modifier la forme de la structure physique du transformateur. L'inductance de fuite peut décrire la dégradation de la structure du

transformateur. Egalement, la fréquence de résonance de l'enroulement, permettant de matérialiser la capacité interspires peut être prise en compte pour évaluer l'évolution de la tenue diélectrique de l'enroulement.

Les causes de ces dégradations sont soit thermiques, soit climatiques ou encore électriques, elles conduisent à des changements des structures des matériaux et des circuits magnétiques utilisés, l'inégalité de la distribution des contraintes électro-thermo-magnétiques dans le composant est donc créer un point de faiblesse. La figure 37 ci-dessous dresse les causes, les mécanismes et les effets du vieillissement d'un transformateur planaire.

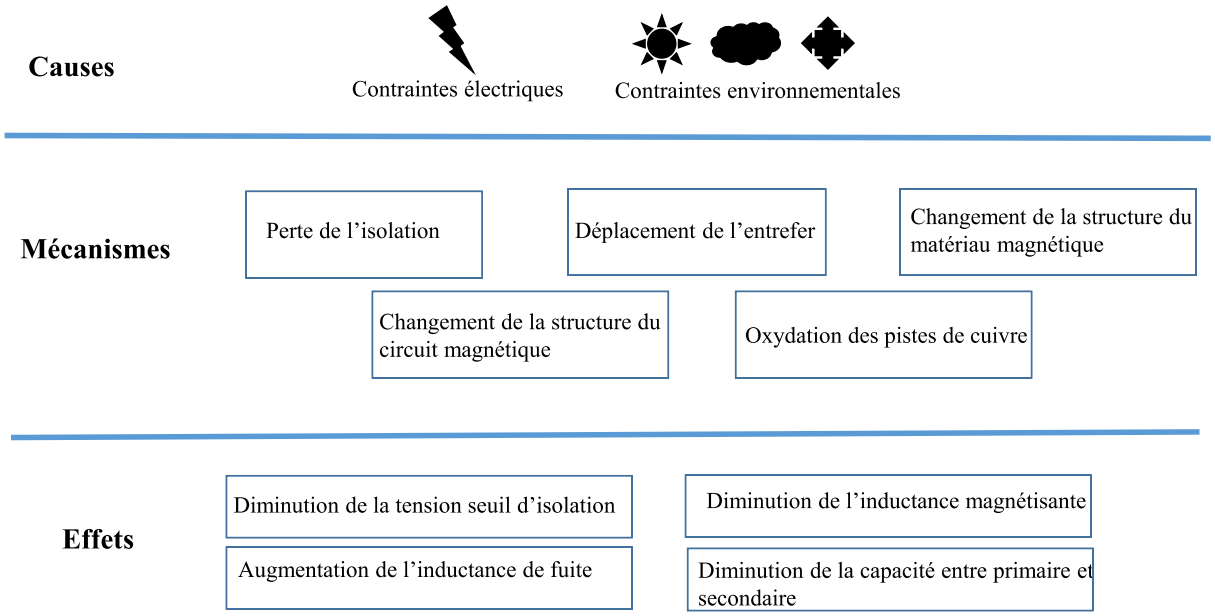


Figure 38 : Causes, mécanismes et effets des défauts pour des transformateurs planars.

Pour évaluer le vieillissement d'un transformateur planar, il est nécessaire de choisir un ensemble de paramètres représentatifs des contraintes que le composant a subi. Ils ne sont pas encore établis car il n'y a pas encore de recherche sur la dégradation des transformateurs planars, la bibliographie est établie sur un transformateur HF non planaire. C'est pour cela que nous avons établi le protocole expérimental ci-dessous afin d'étudier les évolutions les plus significatives d'un certain nombre de paramètres et d'en déduire des indicateurs appropriés pour le calcul de l'impact de la réparation/réutilisation sur ce composant.

- **Plan expérimental :**

Pour mesurer l'impact du processus d'extraction du transformateur sur la valeur résiduelle et les caractéristiques résultantes des composants que l'on souhaite réutiliser, une étude spécifique a été réalisée. Un groupe de transformateurs sera soumis à de multiples cycles thermiques dans des fours de refusion et, après un ensemble de passages illustrés par la figure 38, nous procéderons à la mesure des indicateurs identifiés plus haut pour chaque composant. Même s'il n'est pas prévu de réutiliser plusieurs fois le même dispositif, le protocole de vieillissement vise à identifier des tendances, qui peuvent ensuite servir d'indicateurs de la valeur restante des composants.

Cette méthode expérimentale n'inclut pas le vieillissement pendant l'utilisation ou le stockage des composants, qui est généralement étudié et décrit par d'autres travaux ou même par le fabricant de composants lui-même. Cependant, si les composants restent pendant leur durée de vie dans une zone de fonctionnement nominale, il sera possible de combiner les dommages des deux phases de vieillissements.

Des tests préliminaires ont été effectués sur un transformateur échantillon afin de calibrer les limites du plan d'expérience. Ces premiers tests ont permis de déterminer que 20 cycles thermiques de refusions sont nécessaires pour identifier clairement des tendances.

La deuxième phase du plan d'expérience visant à modéliser et à représenter le vieillissement induit par le cycle thermique de refusion de la soudure consiste à prendre une quantité initiale représentative de composants qui subiront le même processus de cyclage thermique. Ainsi, dix transformateurs ont été initialement impliqués dans l'expérience, 2 d'entre eux sont extraits à chaque étape pour effectuer des caractérisations pour évaluer leur tenue diélectrique par mesure des décharges partielles.

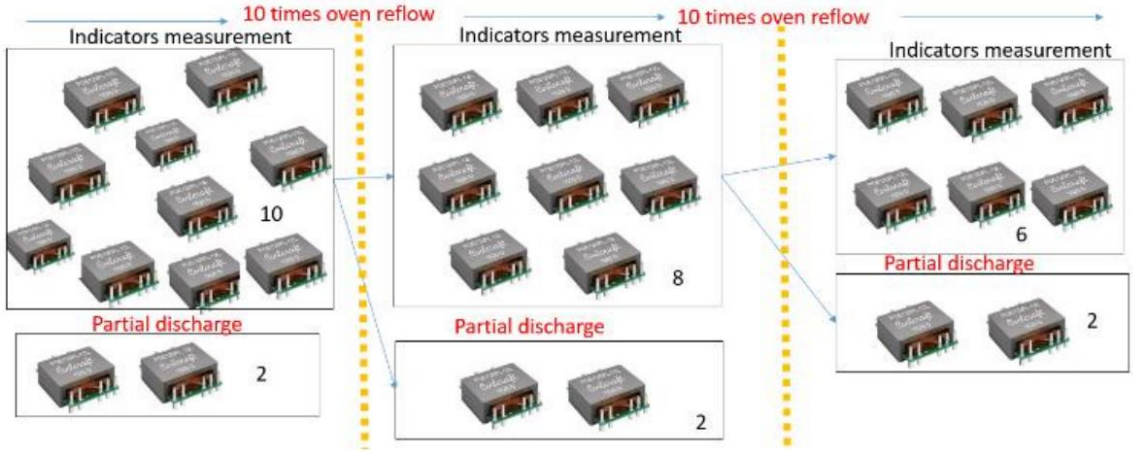


Figure 39 : Les étapes du plan expérimental, 10 passages au four entre chaque mesure à l'impédance mètre et le test de décharges partielles.

Concernant la mesure des indicateurs de vieillissement, l'inductance magnétisante du bobinage primaire sera mesurée avec un impédance mètre le secondaire étant en circuit ouvert. Il en sera de même pour l'inductance de fuite primaire, le secondaire étant en court-circuit. Enfin la capacité primaire-secondaire sera mesurée en court-circuitant à la fois le primaire et le secondaire.

La décharge partielle est une décharge électrique localisée qui court-circuite partiellement l'espace isolant entre les conducteurs sous l'effet d'une haute tension. Le test non destructif consiste à voir à partir de quelle tension "tension d'amorçage" l'amplitude des décharges et leur nombre commencent à être élevés.

Les décharges sont souvent situées en surface ou dans la cavité de l'isolant créée par un défaut de fabrication ou le vieillissement de l'isolant. Le modèle électrique d'une cavité est expliqué dans la figure 39 ci-dessous.

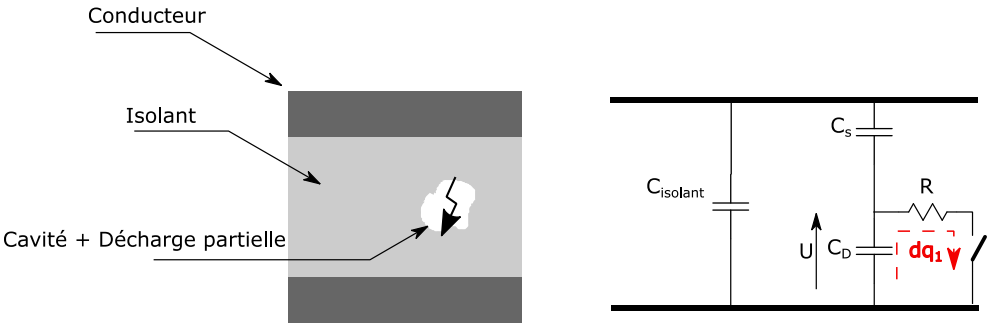


Figure 40 : Les schémas de principe et équivalent électrique d'une décharge partielle située dans une cavité de l'isolant.

Le principe de la mesure de la décharge partielle est de mesurer de faibles variations dans le courant traversant l'équipement testé sous tension, les décharges partielles sont généralement exprimées en pico coulombs.

$$q = \Delta U . C_D \qquad (2.27)$$

C_D *étant la capacité au niveau de la cavité*

Les mesures sont effectuées grâce à un circuit sensible aux perturbations qui est présenté dans la norme CEI60270 [64]. Le montage est affiché figure 40.

Nous avons utilisé le système de mesure ICMsys8 mis en œuvre au sein de l'équipe MDE du G2Elab, dont la spécialité est la caractérisation et la modélisation des matériaux diélectriques. A ce titre, nous avons utilisé un banc expérimental prêt à l'emploi dont la description est donnée dans la référence suivante [65].

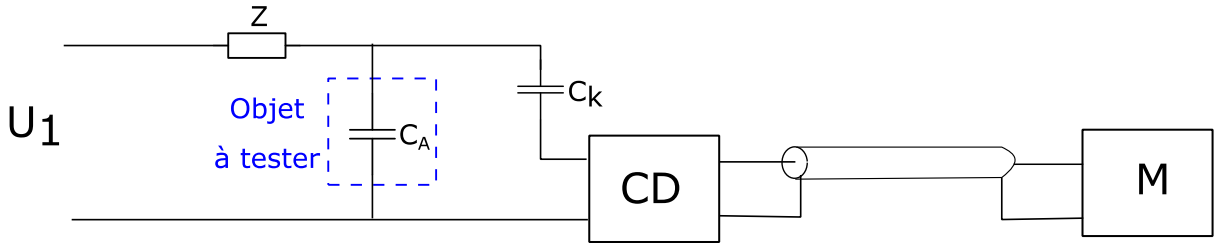


Figure 41 : Le schéma simplifié du montage de mesure des décharges partielles [65].

L'objet à tester est mis sous tension par une source de tension ayant un bruit de fond bas, un filtre Z placé coté haute tension réduit encore plus le bruit de fond de l'alimentation. Il sert aussi à amplifier le signal à mesurer. Dans notre plan expérimental, nous avons utilisé le « RPA1 preamplifier module » [66]. Un circuit de couplage CD et un condensateur de couplage Ck sont placés en parallèle du transformateur à tester, représenté ici par la capacité CA ente son primaire et son secondaire. Le circuit de couplage permet de synchroniser la fréquence de mesure à la fréquence des décharges partielles et fournit un moyen de détecter l'impulsion de décharge

partielle et de l'envoyer sous forme de signal de tension à un préamplificateur. Pour le conditionnement, nous avons utilisé le CC20B de ICMsystem [67]. Et des connexions hautes tensions avec un faible bruit de fond entre le circuit de découplage et l'appareil de mesure M.

Ce test est effectué sur les deux transformateurs extraits après chaque cycle de refusion. Il permet d'évaluer les évolutions des performances du diélectrique.

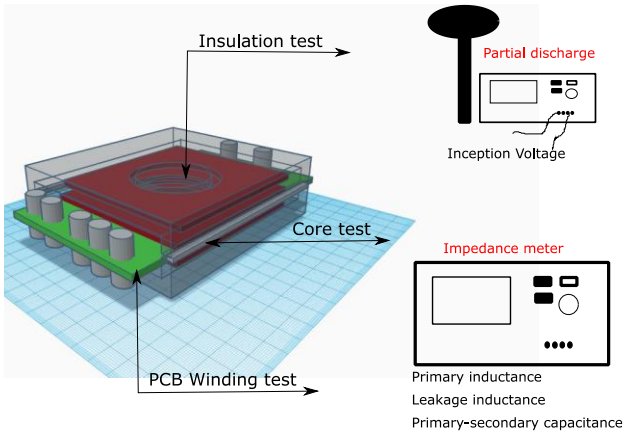


Figure 42 : Résumé des différentes mesures effectuées sur les transformateurs après chaque période de cyclage thermique.

La figure 41 ci-dessus présente les différents tests effectués sur les transformateurs durant tout le protocole expérimental.

- **Résultats :**

Le four et les appareils de mesures sont les mêmes que ceux utilisés dans la section précédente pour les condensateurs électrochimiques. Les précisions des mesures sont donc les mêmes. Concernant le test de décharge partielle, l'erreur entre la tension appliquée et la tension affichée sur l'IHM est de quelques volts (sur des tensions de l'ordre de quelques centaines de volts).

Après les 20 cycles de refusion, aucun transformateur n'a montré de signe de panne irréversible. Le nombre de transformateurs entre étape ne diminuait qu'à cause de l'élimination des transformateurs testés sous décharge partielle par précaution. Le tableau ci-dessous montre les écarts-type des indicateurs mesurés initialement ainsi que pour chaque étape du protocole expérimental.

Tableau 7 : Les dispersions des valeurs des indicateurs de vieillissement à chaque mesure.

Ecarts-type	Inductance magnétisante	Inductance de fuite	Capacité primaire-secondaire	Tension de claquage de DP
Initialement	0.25E-5 H (6%)	0.2^{E}-7 H (6%)	0.5^{E}-11 F (12%)	25 V (4%)
Après 10 refusion	0.5^{E}-5 H (12%)	0.1^{E}-7 (3%)	0.5^{E}-11 F (12%)	25 V (4%)
Après 20 refusion	0.3E-5 H (7%)	0.1^{E}-7 (3%)	0.5^{E}-11 F (12%)	20 V (3%)

Les écart-types restent acceptables puisque la densité de perte et la perméabilité du noyau des composants magnétiques ont des tolérances de dispersion des paramètres électriques de 3% à 30%, selon les différents fabricants.

Les variations des paramètres électriques mesurés grâce à l'impédance mètre et au test de décharge partielle sont affichées ci-dessous.

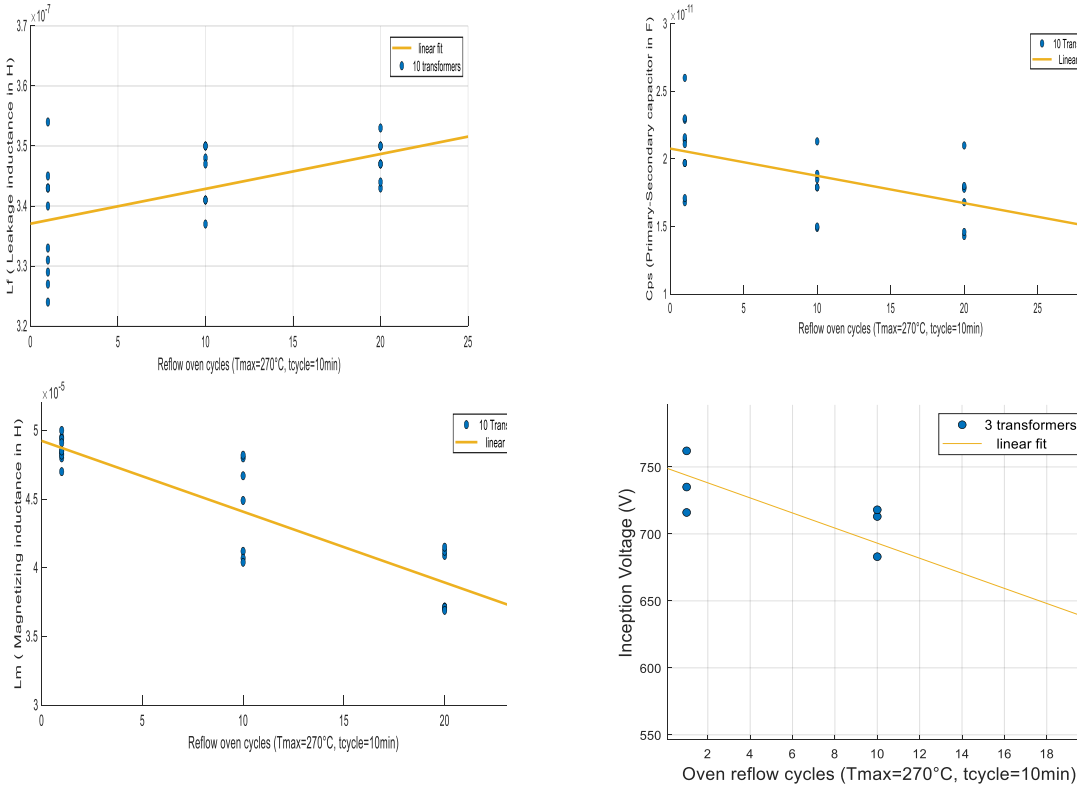


Figure 43 : Inductance magnétisante, inductance de fuites, capacité primaire-secondaire et tension de seuil de décharge partielle de l'isolant par rapport au nombre de cycle de refusion.

Nous remarquons que l'inductance magnétisante diminue de 20% en moyenne après 20 cycles de refusion (i.e 10 extractions/réemplois). L'inductance de fuite ainsi que la capacité parasite entre primaire et secondaire ne varient pas significativement par rapport à la dispersion des données initiales pour pouvoir réellement conclure sur une probable causalité. Cela est dû à la dispersion initiale des caractéristiques du composant neuf ainsi que au bruit de la mesure de la capacité parasite primaire-secondaire. La tension de seuil de décharge partielle de l'isolant affiche une réelle diminution d'à peu près 20% après 20 cycles de refusion. Les équations 27,

28, 29 et 30 montrent l'évolution linéaire des caractéristiques du transformateur planaire selon le nombre de cycles dans le four à refusion.

$$L_{leakage} = 6 \times 10^{-10} \times N + L_{leakage0} \quad (2.27)$$

$$L_m = -5 \times 10^{-7} \times N + L_{m0} \quad (2.28)$$

$$C_{ps} = -2 \times 10^{-13} \times N + C_{ps0} \quad (2.29)$$

$$v_{th} = -5{,}6 \times N + 750 \quad (2.30)$$

Les variations des paramètres par rapport au nombre de cycles de refusion sont difficiles à expliquer. Le lien entre le mécanisme de défectivité et la variation des paramètres du transformateur n'est pas encore établie et la littérature sur les composants magnétiques planaires ne permet pas encore de trancher sur ce sujet.

Nous pouvons tout de même noter des remarques visuelles. La légère disparition de la colle entre le noyau inférieur et le noyau supérieur comme expliqué ci-dessous. On note aussi un déplacement des enroulements soudés sur les broches du transformateur. Le changement de couleur de l'isolant qui s'assombrie. Et la disparition locale du vernis entre les spires de cuivre.

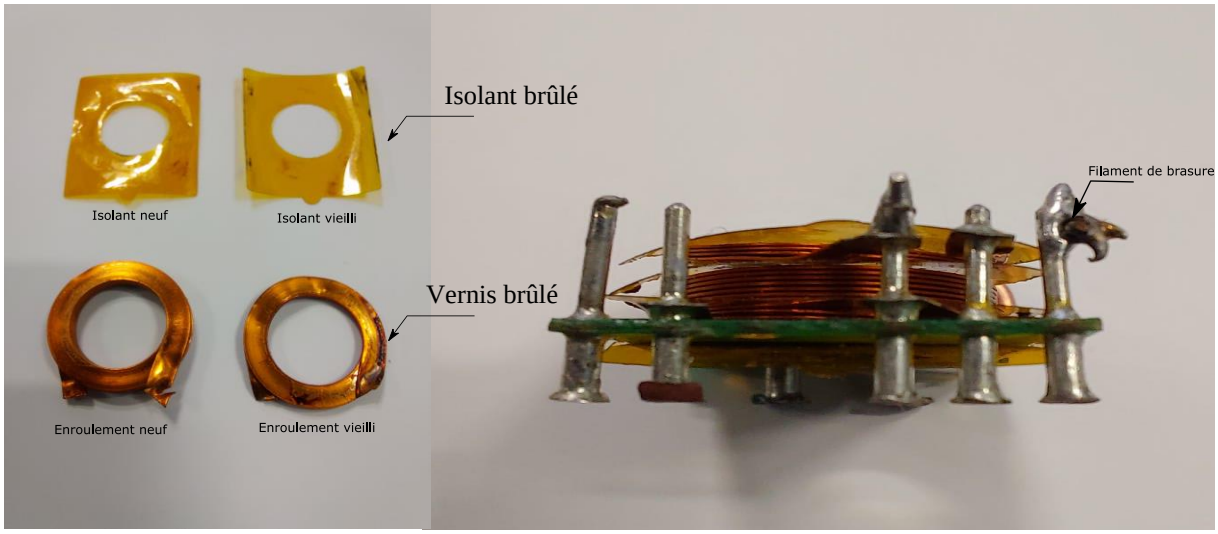


Figure 44 : Illustrations non-exhaustives de défauts visibles visuellement sur un transformateur vieilli.

Il est possible tout de même d'explorer des pistes de défauts cités aussi dans la littérature. L'inductance magnétisante ainsi que l'inductance de fuite par exemple dépendent grandement du circuit magnétique, des positions relatives des bobinages et de la nature du noyau. Le transformateur choisi, en plus d'être brasé sur le PCB, a des enroulements brasés sur les broches impliquant ainsi le déplacement de ces derniers pendant la phase de refusion au four. Les fiches techniques constructeurs attestent que la structure du noyau reste stable avec le temps mais cela jusqu'à une température de 200°C. Selon [68] [69] les matériaux amorphes à base de fer, les poudres de fer et les ferrites voient leurs pertes magnétiques augmenter quelques mois après

leur exposition à une forte température. La détérioration est lente mais irréversible tout de même.

Quant à la capacité parasite entre le primaire et le secondaire et la tension de claquage, leurs variations sont dues au changement de comportement des isolants. Les effets du cyclage thermique et des hautes températures sur les isolants sont abondamment étudiés dans [70] [71]. Les isolants sèchent, se fissurent et se dilatent dans certains cas. Dans notre cas, un noircissement considérable de l'isolant est à noter.

La dispersion initiale des paramètres des composants neufs est élevée. Il est donc difficile d'utiliser un critère de valeur absolue pour indiquer leur dégradation. L'utilisation de la pente de changement comme critère a plus de signification physique.

- **Analyse des résultats :**

Les contraintes principales du vieillissement des transformateurs planaires sont la température, la tension appliquée à leurs bornes et l'ondulation du courant les traversant. Dans le cas d'un procédé de désassemblage seule la température influe sur la durée de vie du transformateur. Dans la littérature, un transformateur est considéré usé si sa tension de tenue diélectrique diminue de plus de 20% de sa valeur initiale.

Les tests de vieillissement des transformateurs HF de type secs se rapportent à la norme IEC 60076-12 [72]. Les transformateurs sont soumis soit à une variation de courant soit à une variation de la température ambiante et, tout le long de ces tests, les caractéristiques du transformateur sont observées. Il faut ajouter à cela les tests de vieillissement dus aux procédés de désassemblage.

Plusieurs fabricants dans la littérature proposent une formulation simplifiée de la durée de vie des transformateurs en fonction des contraintes environnantes.

$$L_t = L_0 . F_T \quad (2.31)$$

L0 est la durée de vie sous un fonctionnement aux conditions extrêmes (température maximale de curie et ondulation de courant maximale), indiquées dans la fiche technique du transformateur utilisé. L_t est la durée de vie suivant un profil d'utilisation en heures. FT est le facteur multiplicatif de vieillissement dû à la température.

Dans le cadre des tests de vieillissement des procédés de désassemblage, seule la température rentre dans le calcul de la durée de vie restante. Le modèle devient :

$$L_t = \frac{t_{désassemblage}}{t_{total}} . L_0 . F_{T1} + \frac{t_{usage}}{t_{total}} . L_0 . F_{T2} \quad (2.32)$$

$$avec\ F_T = e^{\frac{E_a}{k_B}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{max}}\right)} \quad (2.33)$$

Ainsi pour compléter le modèle de vieillissement dû aux procédés de désassemblage, il faut calculer l'énergie d'activation E_a. Pour cela il existe une formulation simplifiée pour les essais de vieillissement accélérés qualitatifs cycliques.

$$E_a = K_B . \frac{\ln(t_{cycle} . n_1) - \ln(t_{cycle} . n_2)}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \qquad (2.34)$$

Pour calculer cette valeur, il faut faire deux tests de vieillissements accélérés sur le transformateur soumis à deux cyclages différents en températures. Il faut savoir que l'énergie d'activation pour un vieillissement normal de transformateur planar pendant l'usage est de $E_a \in [0.9eV\ 2eV]$.

- **Conclusion:**

Les transformateurs, contrairement aux condensateurs électrolytiques, sont des composants plus fiables et donc leur réutilisation est plus envisageable. Les essais de vieillissement dans le four à refusion montrent l'évolution des caractéristiques électriques et diélectriques du transformateur au fil des cycles de refusion. Le transformateur planar qui fait le cas de cette étude pourrait subir 5 cycle de refusion avant de réellement constater une dégradation. 5 cycles de refusion signifient 2 réutilisation en moyenne. Si le seuil de tolérance de réutilisation est plus bas, le nombre de cycle de refusion possible augmente.

Cette étude a investigué la possibilité de réutiliser cette famille de composants et cela peut encore être amélioré en optimisant la conception pour améliorer le profil thermique du four à refusion ou braser les composants réutilisables avec une brasure différente permettant ainsi de l'extraire à plus faible température.

Dans le cadre des scénarios de réparation ou réutilisation, connaitre l'impact des processus d'extraction est primordial pour évaluer l'état de santé du composant au fil de sa vie et surtout sa valeur résiduelle.

Conclusion du chapitre

Dans Ce chapitre, la notion de taux de réutilisation a été traité. Ce taux est le nombre de fois qu'un composant peut être soumis à des contraintes thermomécaniques de désassemblage avant qu'il n'en soit plus capable. Cette notion est importante car elle pourrait guider le concepteur à faire des prévisions de réutilisation des composants de son convertisseur pour de futures conceptions.

Cette étude reste cependant limitée à une seule méthode de désassemblage (four à refusion) et à quelques technologies de composants passifs de l'électronique de puissance. Mais le même protocole expérimental peut être intégré dans la conception afin de prendre en compte le taux

de réutilisation comme paramètre de conception et ainsi agir sur le choix des composants et leurs dispositions dans le convertisseur.

Mener une étude similaire dans le cas de la conception d'un convertisseur n'a de sens que lorsque le convertisseur en question est standard. Cela garantie la possibilité de réutiliser les composants dans les futurs convertisseurs et d'avoir un taux de réutilisation unique pour chaque composant sur le PCB.

Chapitre 3 : Estimation de la durée de vie restante avant désassemblage

1. Introduction

Suivre et observer le bon fonctionnement d'un système électronique est déjà une pratique répandue en dépannage électronique ou en maintenance continue [1]. Cela permet de déterminer les exigences matérielles (appareils de mesure, instruments de soudage, …) et temporelles (périodicité des suivis, le taux horaire technicien, temps moyen machine, …) à déployer pour éviter ou réparer le défaut. Il existe pour cela des méthodologies industrielles et des manuels techniques standards. Des documents spécifiques peuvent être créés par l'industriel pour son cas d'application comme par exemple les fiches opérateur pour la maintenance et les différents protocoles normés. Cette maintenance peut être soit préventive pour éviter une défaillance grave du système complet soit pour isoler/réparer le composant ou le sous-ensemble défectueux.

La connaissance du niveau de fiabilité est cruciale dans la prédiction de la durée de vie restante d'un système de conversion. Par exemple, en automobile et en aéronautique le taux de défaillance doit être proche de zéro hors phase de maintenance. Plusieurs méthodes ont été développées pour suivre et prévoir la durée de vie restante d'un système [2,3] pour agir avant le défaut et organiser une maintenance ciblée et moins coûteuse.

En plus de rendre un système plus durable dans le temps, le but de la maintenance préventive peut être étendu à d'autres fonctions :

Estimer l'état du système complet pour une réutilisation

Estimer l'état d'un composant ou d'un sous-ensemble pour la réintégration dans un autre système similaire ou diffèrent

Estimer le potentiel de réparation d'un système en vérifiant le nombre des composants à réparer dans le système complet

Ce travail peut être réalisé manuellement avec l'expertise d'un technicien et au moyen d'appareils de mesure ou automatiquement grâce à l'observation d'indicateurs de suivi de l'état de santé intégrés au système ou encore grâce à une chaîne robotisée de diagnostics. Les trois options nécessitent une certaine standardisation des composants, des moyens d'assemblage sur

la carte électronique mais aussi une unité de mesure de durée de vie unifiée pour un suivi plus efficace et précis.

Dans un contexte de prolongation de la vie des composants électroniques au-delà de leur premier usage, il devient nécessaire de faciliter le passage de ces composants de la phase d'usage aux phases successives d'extraction, tri et réintroduction dans la chaîne de valeur. Pour cela un outil de diagnostic est nécessaire pour évaluer l'état des composants après un certain usage et ainsi quantifier l'effort de remise en état en vue d'une réintroduction dans la chaîne de valeur. La Fig.45 résume les différents scénarios d'un diagnostic pendant la maintenance.

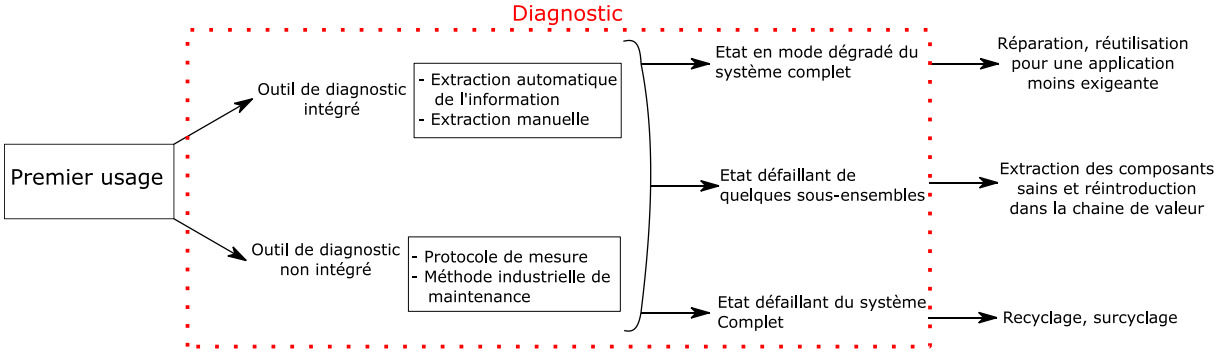


Figure 45 : Les grandes étapes de diagnostic d'un système électronique;

Ce chapitre propose une méthode de diagnostic intégrée au convertisseur de puissance. Le diagnostic va permettre d'indiquer la durée de vie restante des composants du convertisseur pour aider aux choix à faire au moment du diagnostic. Le chapitre est divisé en 3 grandes parties :

- La première partie dresse une brève revue des différentes méthodes existantes de suivi de l'état de santé et propose une comparaison de ces dernières.
- La deuxième partie décrit une proposition de méthode de suivi de l'état de santé des composants en électroniques de puissance. Les grandes étapes de la méthode sont détaillées ainsi que les différents plans d'expérience et les modèles statistiques mis en œuvre.
- La troisième partie traite un cas d'étude spécifique appliquant la méthode de suivi de l'état de santé des composants proposée dans la deuxième partie. Le cas d'application est un convertisseur DC/DC standard interfaçant un panneau photovoltaïque et une batterie pour une consommation domestique.

2. Suivi de la durée de vie des composants en électronique de puissance

Le but de cette partie est de donner un aperçu large des différentes méthodes de suivi de l'état de santé des dispositifs de puissance existant dans la littérature. Cela permettra de dresser une comparaison de ces méthodes selon des paramètres choisis.

2.1. Revue des méthodes de suivi de la durée de vie

Dans plusieurs études [4] [5], les condensateurs électrolytiques et les défauts liés à la connectique et au PCB incluant la soudure constituent 60% des causes de défaillance d'un convertisseur de puissance. La partie restante est liée principalement aux composants actifs (les semi-conducteurs, les techniques de réalisation de ces composants, …). Les techniques de suivi d'état de santé se sont donc développées dans ce contexte de source de défaillance.

Selon [6], un très grand intérêt pour la surveillance de l'état de santé (SES) a débuté dans les années 2000 avec la mesure de paramètres électriques connus du composant comme la tension à l'état passant pour les dispositifs de commutation. Par la suite un effort important a été fait pour estimer la température à l'intérieur du composant comme indicateur principal du vieillissement (comme la température de jonction pour les transistors) par la mesure de la tension de la grille ou de la tension de seuil [7]. Récemment grâce au développement de récepteurs acoustiques ou optiques et la miniaturisation des dispositifs et le développement de l'Intelligence Artificielle (IA), plusieurs méthodes sans contact ont été développées pour le suivi de l'état de santé. Le tableau 8 recense les différentes méthodes de suivi de l'état de santé développées ces dernières années, principalement pour les composants actifs (transistors MOSFET, IGBT, …)

Tableau 8 : Différentes méthodologies de suivi d'état de santé de composants actifs en électronique de puissance.

Type de méthode SES permettant le suivi de l'état de santé des composants d'EP	**Nom de la méthode SES**	**Grandeurs mesurées**
Méthodes électriques : en contact avec le composant	Courant de saturation	Vce–Vds
	Tension de grille seuil	Vge—Vgs
	Tension à l'état passant	Vce, Vd
	Variation de courant $^{di}/_{dt}$	Courant du dispositif
Méthode thermique : avec capteur	Puce d'analyse thermique (TTC)	résistance thermique
Méthode acoustique : sans contact	Ondes acoustiques	Longueur d'onde

Méthode optique : sans contact	Capteur photodiode	Intensité lumineuse
	Fibre optique	Longueur d'onde
	Caméra infrarouge	Longueur d'onde

- **Méthodes physiques et électriques :**

Les premiers travaux sur la SES ont été réalisés par des contacts directs sur la surface du composant à l'aide d'un ou de plusieurs thermocouples mais rares sont les composants dotés de thermocouples dans les applications réelles de convertisseurs de puissance car le circuit de détection est encombrant et invasif [8] [9].

Les méthodes électriques s'appuient sur le principe suivant : les propriétés des matériaux et des semi-conducteurs contenus dans les composants sont dépendantes de la température durant l'usage. Quelques paramètres électriques mesurables comme la résistance électrique ou une mesure de tension permettent de constituer de très bons estimateurs de la température des composants. Les méthodes électriques sont souvent les plus utilisées pour le suivi d'état de santé grâce à leur précision, leur temps de réponse faible et la facilité de mise en œuvre.

Par exemple, mesurer la variation de la résistance électrique R_t d'un matériau peut permettre d'en déduire sa température si la loi de variation de la résistivité en fonction de la température est connue.

$$R_t = R_0(1 + \alpha_0 \Delta T) \qquad (3.1)$$

Avec :

R_0 : la résistante du matériau à 0 degré K°

α_0 : le coefficient résistance/température du matériau

Cette méthode couramment utilisée est invasive. De plus, l'ajout de capteurs intégrés dans le composant dégrade le fonctionnement de ce dernier avec le temps [10] [11].

D'autres méthodes électriques consistent à corréler la température du matériau à des quantités électriques durant l'usage du composant. Par exemple la fluctuation de la tension de seuil dans un MOSFET peut être associée à des plages de température.

- **Méthodes acoustiques :**

Les méthodes acoustiques ont été particulièrement utilisées pour estimer la dégradation des transformateurs et des condensateurs [12] [13]. Cela est réalisable grâce à la détection d'ondes sonores émises par le composant. Cette méthode élimine le contact avec le dispositif contrairement au capteur de tension mais les phénomènes physiques et l'interprétation des signatures acoustiques sont encore au stade de recherche. D'autres inconvénients de cette méthode sont le prix du circuit de décodage de l'information acoustique et les possibles interférences électromagnétiques. Les méthodes acoustiques sont plutôt utilisées de manière ponctuelle et non embarqués pour principalement caractériser quelques composants en amont et en aval de l'usage

- **Méthodes infra rouge :**

Différentes méthodes optiques ont été développées dans le but de cartographier thermiquement les convertisseurs de puissance à l'aide de capteurs Infrarouges [14] [15]. La température relevée par la suite peut alimenter des modèles de fiabilité. L'utilisation de capteurs infrarouges est très peu chère et peu intrusive, cependant ils ne rendent pas compte de la température au cœur du composant mais au niveau de sa surface. Il peut donc y avoir une erreur importante en terme de délai de montée en température mais aussi au niveau de la valeur de la température, donc inadéquat à la détection de défaut à la seconde mais largement utilisé pour l'estimation de la durée de vie restante sur des larges périodes temporelles.

Figure 46 : capteurs thermiques IR.

D'autres méthodes optiques ont été développées avec l'émergence des dispositifs Wide-Band-Gap (WBG) qui rendent possible la commutation à plus haute fréquence et entrainent un intérêt d'étude de l'électroluminescence des matériaux comme le SiC ou le GaN [16]. Le système de détection est une simple photodiode commerciale et un circuit de décodage pour obtenir la température de jonction des transistors WBG par exemple.

Toutes ces méthodes ont pour but de produire une estimation de la température au sein du composant en minimisant le coût du circuit ajouté, réduisant l'intrusion dans le composant ou le circuit, tout en maximisant la précision d'estimation et la fiabilité du circuit de mesure entier de détection de la température.

Ces trois méthodes différentes sont utilisées selon le cahier des charges du concepteur et selon l'application. Dans la partie suivante, les trois méthodes sont comparées selon des paramètres importants pour le concepteur (les paramètres de conception).

2.2. Comparaison des méthodes de suivi de l'état de santé

Les différents paramètres de conception pour la comparaison des différentes méthodes de suivi d'état de santé en EP sont :

-La précision des capteurs : sensibilité des capteurs mis en œuvre.

-La fidélité à la réalité : La capacité à rendre compte de la réalité.

-Le caractère intrusif du capteur : l'interaction des capteurs avec le système en fonctionnement.

-L'impact du capteur sur la durée de vie du système.

-La consommation de ressources : le besoin en stockage en mémoire des données mesurées, la consommation électrique des capteurs nécessaires.

-Le paramètre économique : le cout de l'installation complète, et l'effet des changements sur le système à mesurer.

Le besoin recherché par le concepteur est de permettre la mesure de la température de chaque composant pendant l'utilisation du système à concevoir. Cette mesure de la température est un paramètre d'entrée nécessaire aux modèles de vieillissement de chaque composant ou de chaque famille de composants. En outre, selon les paramètres de conception pour la comparaison des méthodes de suivi citées ci-dessus, la méthode de détermination de la durée de vie restante devra être qualifiée de:

- Non intrusive : les capteurs ou les ondes introduites ne doivent pas interagir avec le bon fonctionnement des composants ou du convertisseur complet.
- D'intégration facile : les besoins de la méthode ne doivent pas encombrer le convertisseur ou complexifier sa conception.
- Précise : les modèles de vieillissement de la méthode générale doivent prendre en considération le profil de mission réel du convertisseur et de chaque composant en suivant leurs comportements tout le long de leur utilisation.
- Fiable : le dispositif ne doit pas lui-même introduire de sources de défaillance

***Remarque* :** dans le cas d'application de ces travaux de thèse, la rapidité n'est pas un paramètre important pour notre étude car les modèles de vieillissement utilisés sont valables pour des inerties thermiques de l'ordre de la seconde.

Les méthodes ayant la précision la plus haute sont les méthodes par contact comme les puces d'analyse thermique, cependant ces méthodes nécessitent un changement complet du packaging et l'ajout de connections dans le composant. Les puces d'analyse thermique sont donc utilisées que quand une forte contrainte de fiabilité justifie les efforts de changement de conception. Ces méthodes peuvent nécessiter une mise à l'arrêt du système pour effectuer un état de santé des composants. Seul un opérateur expérimenté peut effectuer ce type de mesure pour la maintenance.

Les méthodes acoustiques sont actuellement très peu matures techniquement pour une utilisation courante [17].

Les méthodes optiques sont hétérogènes. L'utilisation des photodiodes permet d'obtenir des résultats précis mais cela implique de retirer le boitier du composant. La caméra IR permet avec une précision moindre de faire la même mesure sans devoir appliquer un changement sur le composant ou le système. Il faut bien sur noter que l'utilisation d'une caméra thermique génère une perte de densité volumique, compte-tenu de la taille du capteur IR et du circuit de mesure associé nécessairement à intégrer à la conception du système et donc n'est réellement utilisée qu'en amont ou pendant des périodes de maintenance périodiques.

Tableau 9 : Comparaison des différentes méthodologies d'estimation de la température pour le suivi d'état de santé de composants électroniques.

Type de méthode de suivi de l'état de santé	**Paramètres physiques liés à la température**	**Caractère intrusif de l'opération de mesure**	**Niveau d'intégration du système de suivi et coût induit relatif**	**Précision**
Contact électrique avec le composant avec un capteur séparé	Courant de saturation (pour transistor)	Mesure hors fonctionnement	Ajout de complexité dans le circuit de mesure	Très précis
	La tension de grille seuil (pour transistor)	Mesure hors fonctionnement	Ajout de complexité dans le circuit de mesure	Très précis
	Tension à l'état passant (pour transistor)	Mesure hors fonctionnement	Ajout de complexité dans le circuit de mesure	Très précis
	Variation de courant di/dt (pour transistor)	Mesure hors fonctionnement	Ajout de complexité dans le circuit de mesure	Très précis
	Impédance (pour tous les composants)	Mesure hors fonctionnement	Ajout de complexité dans le circuit de mesure	Précis
Avec capteur inclut dans le composant	Puce d'analyse thermique (TTC) (pour tous les composants)	Nécessite un changement de packaging au niveau du composant.	Ajout d'étapes supplémentaires pendant la fabrication du composant	Très précis
Sans contact (acoustique)	Ondes acoustiques	Mesure pendant le	Technologie pas encore	Sensible au bruit

	(principalement pour les composants magnétiques)	fonctionnement sans contact	mature et cout élevé	
Sans contact (optique)	Capteur photodiode : courant passant dans la diode (pour tous les composants)	Mesure pendant le fonctionnement sans contact avec modification du packaging du composant	Technologie pas encore mature	Précision moyenne
	Sensibilité thermique des fibres optiques (pour tous les composants)	Mesure pendant le fonctionnement sans contact avec modification du packaging du composant	Cout élevé	Très précis
	Mesures des températures par caméra infrarouge (pour tous les composants)	Mesure pendant le fonctionnement sans contact	Aucun changement de conception sur la fabrication et durant l'usage	Très peu précis

Dans le cas d'application de ces travaux de thèse, la méthode choisie pour le suivi de l'état de santé des composants est l'utilisation de modèles de vieillissement alimentés par des capteurs de courants et tensions déjà existants dans le convertisseur. Ces modèles sont construits par l'utilisation de la caméra thermique comme cela sera expliqué dans la partie 3. En effet, elle permet une intégration rapide, facile et peu couteuse et est non intrusive sur le composant et son comportement.

Une méthode d'estimation de la durée de vie restante des composants d'un convertisseur de puissance est proposée dans la section suivante. Cette méthode se compose de deux phases, une phase en amont de l'usage, de construction de modèle avec des méthodes optiques IR puis une phase pendant l'usage ou le modèle obtenu n'utilise que des capteurs existants dans le convertisseur pour s'alimenter en données. Cette méthode est fondée sur des modèles de fiabilité de FIDES enrichies par l'expérience sur le convertisseur en amont de son utilisation.

3. Approche de suivi de la durée de vie restante d'un convertisseur de puissance

3.1. Introduction

Les composants en électronique de puissance vieillissent plus rapidement lorsqu'ils sont soumis à des températures plus élevées, à des cycles de température importants ou à davantage de contraintes mécaniques et chimiques telles que les vibrations, la corrosion ou l'humidité [18]. La température et les cycles thermiques représentent à eux seuls environ 2/3 du processus de vieillissement. Pour les dispositifs stationnaires qui ne subissent pas de chocs mécaniques, ce sont les cycles thermiques qui sont les plus impactant. La capacité à suivre et interpréter le profil de mission thermique d'un composant dans ses détails pourrait aider à suivre son vieillissement. Ainsi, si le profil de température à chaque moment de l'utilisation du composant pouvait être suivi ou déterminé précisément, cela aiderait à diagnostiquer l'état d'usure du composant et donc à calculer la durée de vie potentielle restante du composant.

Les composants en électronique de puissance sont de nature hétérogènes : du point de vue de leur taille, de leurs procédés de fabrication, de leurs compositions matérielles et chimiques, ou encore des techniques d'assemblage lors de leur mise en œuvre. Cela implique un vieillissement non-homogène de chaque composant d'une même carte électronique.

Pour répondre aux exigences d'un « bon » suivi d'état de santé des composants précisées dans la section précédente, la méthode de suivi d'état de santé des convertisseurs de puissance sera considérée dans ces travaux comme pouvant répondre à ces critères :

- La possibilité d'évaluer la durée de vie restante de tous les composants : une solution universelle

- La possibilité d'embarquer la solution et qu'elle soit légère par rapport à l'existant : ne pas ajouter des capteurs sur tous les composants.

- La méthode repose sur des cas pour lesquels le système est standardisés et produit à grande échelle.

- La création d'un observateur d'état est alors possible par une étude approfondie en amont de la mise en œuvre. Cet observateur permet de relier les grandeurs thermiques de chaque composant aux conditions de fonctionnement du convertisseur.

- L'observateur d'état peut être embarqué au sein du convertisseur pour évaluer en direct la durée de vie résiduelle, ce qui permet de ne pas stocker le profil de mission.

- Aucun ou presque aucun capteur supplémentaire est ajouté au système pour limiter les impacts en terme de cout, de fiabilité etc…

Pour répondre à ces critères, la méthode proposée s'articule sur 3 grands axes de mise en œuvre, qui seront appliqués dans cette section :

Axe 1 : la collecte de données en température. Dans le cas d'étude de ces travaux de thèse, cette collecte est issue de l'expérimentation en amont de l'utilisation du convertisseur avec une caméra thermique et un banc de test pour recréer des conditions d'utilisation réelles.

Axe 2 : La construction des modèles statistiques grâce aux données collectées. Dans le cas d'étude de ces travaux de thèse, les modèles statistiques fondés sur les données collectées, seront aussi associés à des résultats empiriques et à des modèles de fiabilité de FIDES.

Axe 3 : L'intégration de la méthode de calcul des modèles de fiabilité améliorés dans le microcontrôleur du convertisseur. Ceci permet de développer un suivi de la durée de vie restante de chaque composant alimenté par la mesure des points de fonctionnement du convertisseur. Avec cette approche dite « embarquée », l'évolution de l'état de santé se fera au fil du temps et sera accessible en permanence via une interrogation au niveau du microcontrôleur.

Selon [19], les méthodes de suivi d'état de santé combinant des données empiriques et l'intelligence artificielle ou des modèles de statistiques optimisés sont prometteuses car elles permettront de répondre à plusieurs enjeux, comme la prise en considération des interactions entre les composants, la robustesse du suivi ou aussi la non intrusion de la mesure sur le fonctionnement du convertisseur complet.

La partie 3.1.1 détaille les grandes étapes de la méthode de suivi de la durée de vie adoptée dans cette étude. La partie 3.1.2 présente les modèles de fiabilité utilisés dans la méthode proposée.

3.1.1. Etapes principales de la méthode de suivi de la durée de vie

Ces travaux de thèse proposent de mener une étude approfondie sur des modèles de fiabilité alimentés par des données expérimentales pour prédire la durée de vie restante estimée d'un convertisseur par rapport à une large gamme de conditions de fonctionnement. Cette étude est divisée en trois sous-études successives :

1- **Une étude métrologique :** le premier objectif de cette étude est de collecter diverses images Infra-Rouge (IR) à différents points de fonctionnement du convertisseur pour établir une base de données représentative reliant l'élévation de température de chaque composant du convertisseur à son point de fonctionnement. Sur la figure 47 sont données à titre d'exemple une série d'images IR du convertisseur DC/DC DAB (20V, 2.5A) présenté Fig. 48 et utilisé au laboratoire dans différentes conditions de fonctionnement, également enregistrées au même moment. Sur cette série d'images, sont visibles le recto et le verso du convertisseur DC/DC. En haut le transformateur prend la partie centrale du convertisseur sur les côtés se trouvent l'inductance, le régulateur, les optocoupleurs et quelques via thermiques. En bas, le verso du convertisseur se trouvent les drivers et les MOSFETs.

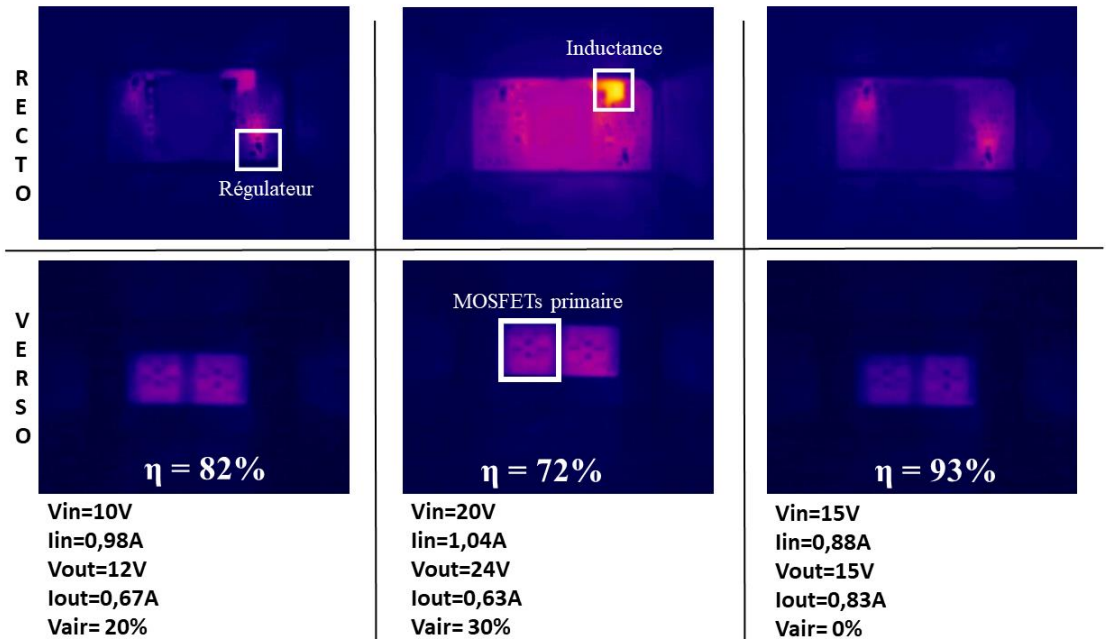


Figure 47: Images IR d'un convertisseur DC/DC opérant à différents points de fonctionnement (Caméra Fluke, à température ambiante de 23°C);

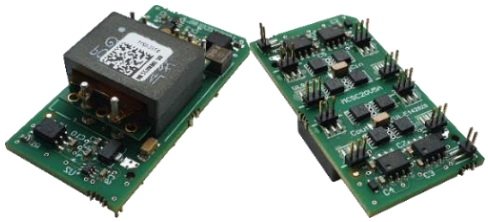


Figure 48 : Le convertisseur DAB DC/DC développé au G2Elab à gauche la face recto, à droite la face verso;

Les images thermiques rendent compte de la chaleur émise par le composant due à son fonctionnement interne mais aussi aux différents couplages thermiques entre les composants dépendant de la disposition des composants entre eux. Ce couplage thermique est difficilement modélisable par des modèles thermiques théoriques.

Les données sont enfin stockées sous forme de base de données incluant les points de fonctionnement et la matrice d'image IR correspondante.

2- **Une étude de modélisation :** à partir de l'analyse des images IR, l'élévation de température de chaque composant peut être mise en relation avec les points de fonctionnement du convertisseur. Un modèle de comportement thermique peut être construit pour chaque composant.
La figure 49 résume les deux étapes qui doivent être réalisées avant l'utilisation du convertisseur. La base de données collectée permet de construire un modèle prédictif qui déduit les tendances statistiques entre les points de fonctionnement et la température

de chaque composant identifié sur la carte et pour lequel on souhaite mettre en place un suivi de l'état de santé. Le modèle prédictif est obtenu grâce à l'outil « Regression Learner » de MATLAB. Les paramètres du point de fonctionnement sont les tensions et les courants d'entrée et de sortie du convertisseur (Vin, Vout, Iin, Iout), la température ambiante Ta et la vitesse de l'air Vair en cas de refroidissement par convection forcée. A ce titre, l'ajout de la connaissance de la température ambiante et celle de la vitesse d'écoulement de l'air seront nécessaires par la suite, lors du suivi de l'état de santé du convertisseur en cours d'usage. Il faudra donc, au préalable, ajouter une mesure de la température ambiante (si elle n'est pas prévue initialement dans le design) et il faudra connaitre la vitesse d'écoulement du fluide en un point particulier, en cohérence avec celle mesurée au cours de l'acquisition des données.

$$T(t) = f\big(V_{in}(t), V_{out}(t), I_{in}(t), I_{out}(t), T_a(t), V_{air}(t)\big) + \varepsilon_i \qquad (3.2)$$

$$\varepsilon_i \ est\ l'erreur\ résiduelle$$

3- **Une étude prédictive en temps réel :** le modèle décrit dans les étapes précédentes peut être chargé dans le microprocesseur du convertisseur de puissance pour suivre en temps réel la température de chaque composant et, par ce biais, obtenir le stress causé au composant au cours du temps et de l'usage du système. Pour modéliser les stress accumulés durant le vécu du composant, l'équation 10 évalue le stress résiduel au moment t comme une somme pondérée des stress endurés pendant tout le vécu :

$$Stress_k(t) = \frac{t - \Delta t_k}{t} \times Stress_{k-1}(t) + \frac{\Delta t_k}{t} \times stress(t) \qquad (3.3)$$

Avec t étant la durée totale de fonctionnement, Δt_k la durée d'un seul point de fonctionnement. k est le pas de changement du point de fonctionnement. Cette approche offre la possibilité d'intégrer le vieillissement dans le temps sans sauvegarder tous les points de fonctionnement.

A partir de l'ancien calcul du stress thermique sur le composant, on peut calculer un nouveau MTBF à l'instant t et un changement de point de fonctionnement k donné.

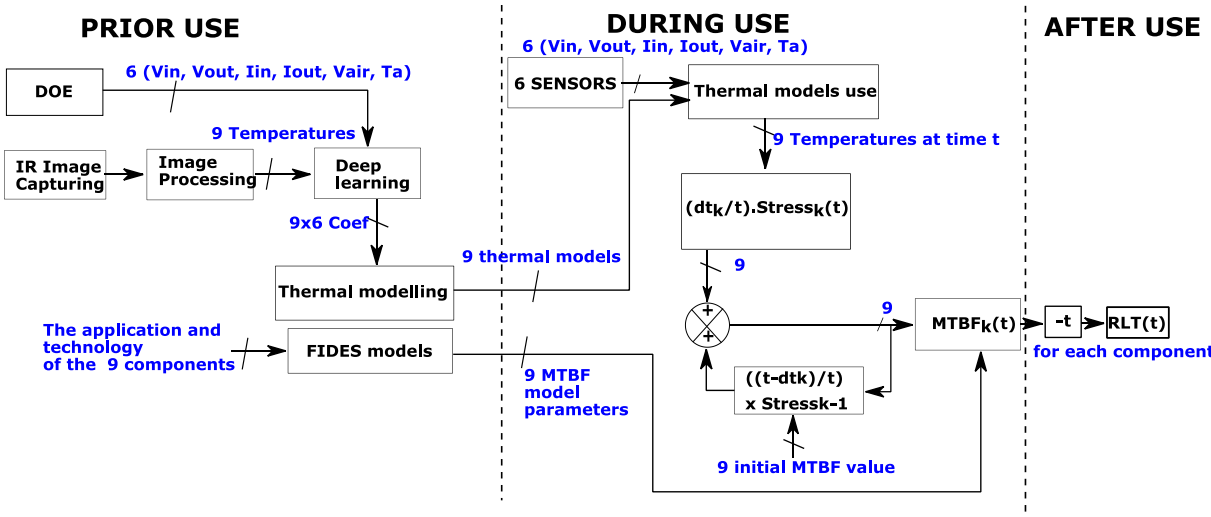


Figure 49 : Le processus de collecte de données et du calcul afin d'obtenir la MTBF à partir du vécu de chaque composant.

L'étape intermédiaire entre l'obtention de la température par des modèles de température construits en amont et le calcul de la MTBF est l'utilisation de modèles de fiabilité permettant de calculer les stress endurés et de passer de données sur le fonctionnement du composant à la durée de vie restante. Les modèles de fiabilité utilisés dans cette étude font l'objet de la partie 3.1.2.

3.1.2. Modèles de fiabilité

Les modèles de fiabilité qui relient les paramètres d'usure à la durée de vie des composants sont issus du manuel FIDES [20]. Le guide de fiabilité FIDES classe les composants électroniques en plusieurs familles et sous-familles telles que les condensateurs électrolytiques, les circuits intégrés, les composants magnétiques, les connecteurs, les circuits imprimés ou les dispositifs optiques comme les optocoupleurs. Pour chaque catégorie de famille de composants, des modèles spécifiques sont proposés. Les modèles de fiabilité FIDES s'expriment génériquement par une équation de la forme (4)

$$\lambda = \left(\sum_{Physique} Contribution\right) \times \left(\sum_{Manufacture} Contribution\right) \qquad (3.4)$$

Avec :

λ le taux de défaillance d'un composant ;

Le terme de gauche représente la somme des contributions des défaillances physiques et technologiques à la fiabilité.

Le terme de droite représente la somme des impacts des processus de développement, de production et d'exploitation sur la fiabilité.

La contribution physique à la fiabilité est exprimée dans (5) comme mentionné dans FIDES :

$$\lambda_{Physique} = \left[\sum_{\substack{Contribution \\ physique}} \lambda_0 \cdot \pi_{acceleration} \right] \times \pi_{induit} \qquad (3.5)$$

Avec :

Le terme entre crochets représente la contribution des contraintes physiques sur l'accélération de la défaillance.

λ_0 est une constante propre à chaque composant, représentant la fiabilité du composant dans un environnement parfait.

$\Pi_{_induit}$ représente la contribution des facteurs induits (aussi appelés surcharges accidentelles ou sur sollicitations) inhérents à un domaine d'application.

Le facteur d'accélération π est décliné pour chaque contrainte physique appliquée à un composant lors de son utilisation opérationnelle, notamment les paramètres de conception suivants :

- **Thermique :** la technologie de conception du composant la température de jonction du composant, la température ambiante, le niveau de cyclage thermique, le boîtier ;
- **Électrique :** ondulations du courant, tensions nominales, puissance ;
- **Mécanique :** vibrations subies, collisions subies, type de pâte à souder, nombre de broches, matériaux du dissipateur et du boîtier ;
- **Chimique :** présence de polluants, taux de particules fines dans le milieu environnant ;
- **Humidité :** profil de variation pendant l'utilisation ;

Le MTBF est l'inverse du taux de défaillance et son unité est donnée en heures par (6) :

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \qquad (3.6)$$

Pour résumer, les modèles de fiabilité de FIDES empiriques sont très communément utilisés dans la maintenance préventive car ils permettent d'obtenir la durée de vie moyenne avant un défaut grave pour chaque composant. Dans le tableau 10, voici les quelques modèles pour les composants principaux d'un convertisseur de puissance (cette liste n'est pas exhaustive) :

Tableau 10 : Les modèles FIDES de taux de défaillance pour certains composants du convertisseur DC/DC DAB.

Composants	Spécificités du composant	Modèle général	Contributions physiques	Contributions Manufacture
Driver	- Boitier (TO116, PowerQuad, SO,SOIC,…)		$\pi_{Thermique} = e^{11604\times0,7\left[\frac{1}{293}-\frac{1}{(T_j+273)}\right]}$ $\pi_{Thermique} = 0$ en phase de non-fonctionnement	Notation selon les qualifications fabricant intégrant les essais conformément aux normes JESD22, EIAJ-ED-4701,

	- Nombre de broches -Analogique, Numérique, Mixte, FPGA,…	$\lambda = \left(\frac{t_{pf}}{8760}\right) \times \begin{pmatrix} \lambda_{0TH} \times \pi_{Thermique} \\ \lambda_{0TCyBoitier} \times \pi_{TCyBoitier} \\ \lambda_{0TCyJointsbrasés} \times \pi_{TCyJointsbrasés} \\ \lambda_{0RH} \times \pi_{RH} \\ \lambda_{0Méca} \times \pi_{Méca} \end{pmatrix} \times (\pi_{process})$	$\pi_{TCyBoitier} = \left(\frac{12 \times N_{cy}}{t_{pf}}\right) \times \left(\frac{\Delta T_{cy}}{20}\right)^4 \times e^{1414 \times \left[\frac{1}{313} - \frac{1}{(T_j+273)}\right]}$ $\pi_{TCyjoints\ brasés} = \left(\frac{12 \times N_{cy}}{t_{pf}}\right) \times \left(\frac{\Delta T_{cy}}{20}\right)^4 \times \left(\frac{\min(\theta_{cy}, 2)}{2}\right)^{\frac{1}{3}} \times e^{1414 \times \left[\frac{1}{313} - \frac{1}{(T_j+273)}\right]}$ $\pi_{Méca} = \left(\frac{G_{RMS}}{0.5}\right)^{1,5}$ $\pi_{RH} = \left(\frac{RH_{ambiante}}{70}\right)^{4,4} \times e^{11604 \times 0,9 \times \left[\frac{1}{293} - \frac{1}{T_j+273}\right]}$ $\pi_{RH} = 0$ en phase de non-fonctionnement	MIL-STD-883, IEC 68. IL-PRF-38535 classe Q, MIL-PRF-38535 classe M , MIL-PRF-38535 classe N , MIL-PRF-38535 classe T , NASDA-QTS-xxxx classe II , NPSL NASA niveau 2 & 3 , STACK-S0001
MOSFET	-Boitier (SO, TO, C, D, ISO, …) -Type d'assemblage sur PCB -Niveau de puissance	$\lambda = \left(\frac{t_{pf}}{8760}\right) \times \begin{pmatrix} \lambda_{0TH} \times \pi_{Thermique} \\ \lambda_{0TCyBoitier} \times \pi_{TCyBoitier} \\ \lambda_{0TCyJointsbrasés} \times \pi_{TCyJointsbrasés} \\ \lambda_{0RH} \times \pi_{RH} \\ \lambda_{0Méca} \times \pi_{Méca} \end{pmatrix} \times (\pi_{process})$	$\pi_{Thermique} = \pi_{El} \times e^{11604 \times 0,7 \left[\frac{1}{293} - \frac{1}{(T_j+273)}\right]}$ $\pi_{El} = \left(\frac{V_{appliquée}}{V_{nominale}}\right)^{2,4}$ si $\frac{V_{appliquée}}{V_{nominale}} > 0,3$ $\pi_{El} = 0,056$ $sinon$ $\pi_{TCyBoitier} = \left(\frac{12 \times N_{cy}}{t_{pf}}\right) \times \left(\frac{\Delta T_{cy}}{20}\right)^4 \times e^{1414 \times \left[\frac{1}{313} - \frac{1}{(T_j+273)}\right]}$ $\pi_{TCyjoints\ brasés} = \left(\frac{12 \times N_{cy}}{t_{pf}}\right) \times \left(\frac{\Delta T_{cy}}{20}\right)^{1,9} \times \left(\frac{\min(\theta_{cy}, 2)}{2}\right)^{\frac{1}{3}} \times e^{1414 \times \left[\frac{1}{313} - \frac{1}{(T_j+273)}\right]}$ $\pi_{Méca} = \left(\frac{G_{RMS}}{0.5}\right)^{1,5}$ $\pi_{RH} = \left(\frac{RH_{ambiante}}{70}\right)^{4,4} \times e^{11604 \times 0,9 \times \left[\frac{1}{293} - \frac{1}{T_j+273}\right]}$ $\pi_{RH} = 0$ en phase de non-fonctionnement	Qualification selon l'une des normes suivantes : AEC Q101, MIL-PRF-19500 JANS, ESCC 5xxx niveau B , NASDA-QTS-xxxx classe I
Condensateurs Aluminium	-Electrolyte liquide ou solide	$\lambda = \left(\frac{t_{pf}}{8760}\right) \times \begin{pmatrix} \lambda_{0TH} \times \pi_{Thermique} \\ \lambda_{0TCy} \times \pi_{TCy} \\ \lambda_{0Méca} \times \pi_{Méca} \end{pmatrix} \times (\pi_{process})$	$\pi_{Thermique} = \left(\frac{1}{0,5} \times \frac{V_{appliquée}}{V_{nominale}}\right)^3 \times e^{11604 \times E_a \times \left[\frac{1}{293} - \frac{1}{(T_j+273)}\right]}$ $\pi_{Thermique} = 0$ en phase de non-fonctionnement $\pi_{TCy} = \left(\frac{12 \times N_{cy}}{t_{pf}}\right) \times \left(\frac{\Delta T_{cy}}{20}\right)^{1,9} \times \left(\frac{\min(\theta_{cy}, 2)}{2}\right)^{\frac{1}{3}} \times e^{1414 \times \left[\frac{1}{313} - \frac{1}{(T_j+273)}\right]}$	Qualification selon l'une des normes suivantes : AEC Q200, MIL-PRF-xxxx niveau S, MIL-PRF-xxxx niveau R, MIL-PRF-xxxx niveau D, MIL-PRF-niveau C, ESCC 400x niveau B, NASDA-QTS-xxxx classe I

			$\pi_{Méca} = \left(\frac{G_{RMS}}{0,5}\right)^{1,5}$	
Inductance	-Niveau de puissance et de courant -Nombre de couche -Bobinée ou moulu	$\lambda = \left(\frac{t_{pf}}{8760}\right) \times \begin{pmatrix} \lambda_{0TH} \times \pi_{Thermique} \\ \lambda_{0TCy} \times \pi_{TCy} \\ \lambda_{0Méca} \times \pi_{Méca} \end{pmatrix} \times (\pi_{process})$	$\pi_{Thermique} = e^{11604 \times 0,15 \times \left[\frac{1}{293} - \frac{1}{(T_{HS}+273)}\right]}$ $\pi_{TCy} = \left(\frac{12 \times N_{cy}}{t_{pf}}\right) \times \left(\frac{\Delta T_{cy}}{20}\right)^{1,9} \times \left(\frac{\min(\theta_{cy}, 2)}{2}\right)^{\frac{1}{3}} \times e^{1414 \times \left[\frac{1}{313} - \frac{1}{(T_{HS}+273)}\right]}$ $\pi_{Méca} = \left(\frac{G_{RMS}}{0,5}\right)^{1,5}$	Qualification selon l'une des normes suivantes : AEC Q200, MIL-PRF-xxxx niveau S, MIL-PRF-xxxx niveau R, MIL-PRF-xxxx niveau D, MIL-PRF- niveau C, ESCC 400x niveau B, NASDA-QTS-xxxx classe I

Avec
t_{pf} est le temps associé à un point de fonctionnement du composant en heures.
T_j est la température au cœur du composant, T_{HS} est la température au point le plus chaud du composant (principalement pour les composants magnétiques) en degrés Celsius.
ΔT_{cy} est l'amplitude de variations associées à un passage d'un point de fonctionnement à un autre en degrés Celsius.
θ_{cy} est la durée d'un point de fonctionnement en degrés Celsius.
N_{cy} est le nombre de cycles associé à la durée d'utilisation.
G_{RMS} est le stress associé à la vibration en "G_{RMS}" .
$V_{nominale}$ est la tension nominale précisée par le constructeur du composant, $V_{appliquée}$ est la tension appliquée pendant un point de fonctionnement en Volts.
$RH_{ambiante}$ est le taux d'humidité associé à un point de fonctionnement en %.

Les modèles FIDES constituent une base pour le calcul de la fiabilité moyenne. Ils doivent être couplés à une définition précise du profil de mission du composant pendant toute sa durée de vie. Il est important de préciser que les modèles FIDES sont des modèles prédictifs qui s'appuient sur des profils de missions assez simples et, en aucun cas, à des profils de missions singuliers. Ce sont des modèles statistiques que nous allons utiliser ici à des fins toutes autres. Cela fera l'objet d'une discussion plus loin.

Pour montrer la sensibilité des modèles de fiabilité FIDES aux paramètres d'usure, voici un exemple portant sur une famille de composants magnétiques, plus précisément les inductances bobinées à faible courant (1A), une catégorie de composants essentielle et spécifique en électronique de puissance.

Les équations dans le tableau 10 présentent les contributions thermiques et de cyclage thermique ($\Pi_{Thermique}$, $\Pi_{Cyclage}$) au vieillissement dans les modèles de fiabilité FIDES pour les composants magnétiques. Ces modèles dépendent des paramètres d'usure (T_a température ambiante, ΔT l'élévation de température et N_{cy} le nombre de cycles par jour). Ceci est illustré dans la figure 50 où, en doublant la quantité de cycles thermiques de 5 à 10 pour une température de 40 °C, le composant connait une baisse de 20% de sa durée de vie (cf. échelle à droite de l'abaque). Le plus grand écart de durée de vie est lorsque sont comparés deux composants, un ayant vécu sans cyclage à une température supérieure à 30°C et un autre avec de nombreux cyclages à la même amplitude.

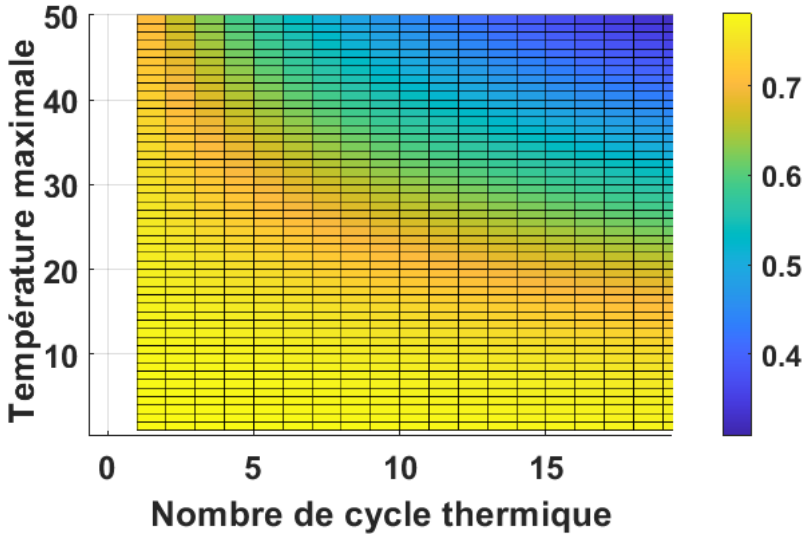


Figure 50 : Cartographie de la MTBF en % de durée de vie par rapport à la température de jonction maximale d'un cycle et le nombre de cycles thermiques.

Ceci est valable pour tous les composants dans le manuel de FIDES. Enfin, la prise en compte des phases spécifiques d'un profil de mission (intégrant chaque cycle thermique avec durée et amplitude, températures ambiantes, etc.) au lieu de prendre une moyenne d'opération de puissance sur l'année change les résultats de MTBF [21] de 5% à 30%. Ainsi, l'intégration de capteurs et d'observateurs en temps réel pour suivre précisément le profil de température de mission de chaque composant pour alimenter les modèles FIDES pourrait aider à l'estimation de la valeur résiduelle. Toutefois, il est important de préciser à ce stade que les modèles FIDES que nous utiliserons ici ne sont pas prévus initialement pour ce que l'on souhaite en faire. A ce titre, nous introduisons ici une incertitude totale qui devra faire l'objet d'une étude spécifique pour s'assurer que les paramètres utilisés peuvent l'être. Le cas échéant, de nouveaux paramètres pour les modèles FIDES devront être définis.

Ainsi, le calcul de la MTBF peut être amélioré par une somme pondérée des contraintes thermiques liées à l'état d'usure par un facteur temps pour obtenir la durée de vie restante (RLT (t)) pour un type d'usage donné, selon la formule proposée dans (7):

$$RLT(t) = \left[MTBF(t)\right] - t \qquad (3.7)$$

$$avec\ MTBF(t) = \frac{1}{\lambda(t)}\ et\ \lambda(t) = \lambda_0 \times \left[stress(t-\Delta t) \times \frac{t-\Delta t}{t} + stress(t) \times \frac{\Delta t}{t}\right]$$

et

Δt : le temps de fonctionnement du convertisseur à un point de fonctionnement donné.

t : le temps de fonctionnement total.

Dans cette section, nous avons décrit les principales causes de défaillance et nous avons rappelé la méthode d'estimation pour la caractérisation du MTBF des composants. Le profil de mission

est apparu comme un paramètre important du vieillissement. En particulier l'impact du profil de température au cours de l'utilisation a été souligné.

Si l'on veut fournir un indicateur pour chaque composant et sous-système du dispositif d'électronique de puissance, il faut donc développer un ensemble de connaissances sur tous les composants en cours d'utilisation avec des capteurs ou d'autres outils.

Dans de nombreux cas pratiques, il n'est pas réaliste d'intégrer des capteurs sur chaque dispositif, même si la valeur intrinsèque du dispositif n'est pas négligeable. Par conséquent, un nombre limité de capteurs supplémentaires doit être utilisé afin de déterminer les indicateurs souhaités, idéalement à partir des capteurs existants.

Ces travaux de thèse proposent une approche fondée sur la collecte de données d'utilisation préalable des systèmes, couplée à l'apprentissage de données issues de la littérature et de retour d'expérience. Il s'agit d'étudier et de caractériser au niveau du convertisseur le profil de température de chaque composant et des sous-systèmes en fonction des conditions de fonctionnement et de la mise en œuvre du PCB et son refroidissement. A partir de cette caractérisation, nous sommes en mesure de fournir les modèles MTBF et en déduire ainsi la valeur fonctionnelle de ce composant. L'acquisition de l'évolution du profil de la mission dans le temps ainsi que des modèles d'observateurs issus de l'apprentissage de données donne l'opportunité de déterminer, en temps réel, la valeur restante de chaque composant d'un convertisseur de puissance.

Comme vu dans la partie 3.1.1, la méthode est divisée en 3 étapes. La première étape est « la métrologie » qui sera détaillée dans la partie 3.2 puis la deuxième étape « modélisation » traitée dans 3.3 et enfin la dernière étape qui est « la prédiction en temps réel » expliquée dans 3.4.

3.2. Plan d'expérience

3.2.1. Description du banc d'essais et des variables mesurables

L'objectif de la partie expérimentale en phase amont dans ces travaux de thèse, est de développer un modèle thermique théorique fondée sur des résultats pratiques, liant la température de chaque composant d'un convertisseur à un point de fonctionnement du convertisseur. Des travaux préliminaires sont donc nécessaires afin de collecter des images IR des composants avant leur utilisation.

Pour cela, nous avons choisi de mettre à l'épreuve un convertisseur conçu lors du projet epicub au G2Elab. Il s'agit d'un Dual Active Bridge, tel que présenté Figure 51. Le choix de la topologie DAB est justifié pour son isolation galvanique et sa capacité à atteindre des rendements et des densités de puissance élevés [22] [23].

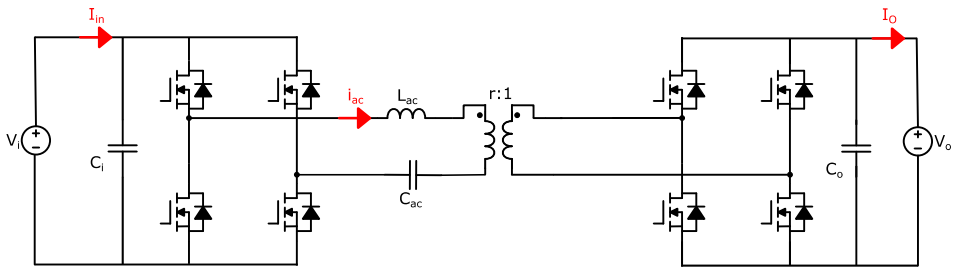


Figure 51 : Structure classique d'un DAB (Dual Active Bridge)

Le transfert d'énergie est contrôlé à l'aide d'une modulation de phase réalisée de part et d'autre du convertisseur, au niveau de chacun des étages onduleur. Le signal résultant est la différence des signaux appliqués de part et d'autre du AC link. En fonction de la phase du signal produit, l'amplitude et le sens du courant sont déterminés. Ce convertisseur est constitué des composants présentés dans le tableau 11 suivant :

Tableau 11 : BOM du DAB choisi pour l'expérimentation.

Composants	Nombre	Position sur PCB
MOSFET	8	Verso
Inductance	1	Recto
Transformateur planar	1	Recto
Optocoupleurs	2	Recto
Drivers	4	Verso
Régulateurs	2	Recto

Les caractéristiques électriques et thermiques de ce convertisseur sont présentées dans le tableau 12 : les tensions d'entrée et de sortie varient entre 6V et 20V, avec un courant de sortie maximum de 2.5A, en convection naturelle, et 5A, en convection forcée, pour une température maximale critique évaluée à 100°C à la surface du PCB.

Tableau 12 : spécifications électriques et thermiques du convertisseur DAB du G2Elab

Caractéristiques	Valeurs
Tension d'entrée maximum	20V
Tension d'entrée minimum	6V
Tension de sortie maximum	20V
Tension de sortie minimum	6V
Courant de sortie maximum (convection forcée)	5A
Température maximale critique	100°C

Pour pouvoir tester le convertisseur sur la plupart des points de fonctionnement, les paramètres électriques sont balayés dans la fourchette des valeurs autorisées. Un nombre de points de fonctionnement minimal est donc obtenu, suffisamment représentatif du système étudié.

Pour créer des modèles statistiques qui prédisent avec un degré de confiance acceptable la variable de sortie (température de surface du composant), le plan expérimental ci-dessous a été établi et 130 points de fonctionnement ont été examinés. Le tableau 13 donne les fourchettes balayées par chaque variable pour recréer les 130 points de fonctionnement.

Le choix des fourchettes balayées par chaque variable est très important pour limiter le nombre de photos infrarouges à prendre. Il faut tout de même choisir une plage de valeurs représentatives du fonctionnement du convertisseur. Les deux températures ambiantes ont été choisis dans un ordre de grandeur de température estivale et hivernale. Les variables électriques ont été choisis dans la zone de fonctionnement « sûre » (i.e. ne menant pas un défaut immédiat).

Tableau 13 :Plages de variation des variables des points de fonctionnement électriques et thermiques du convertisseur.

Points de fonctionnement				
V_{in} [V]	**V_{out}-V_{in}[V]**	**I_{out} [A]**	**V_{air} [m/s]**	**T_a[°C]**
[10-20]	[-6-6]	[0.75,1.5,2,3.5]	[0,4,8]	[23,40]

Le banc de test dans lequel le convertisseur est testé est décrit dans le schéma figure 52 ci-dessous, ce banc de test sert à créer des conditions de fonctionnement types, proches de celles qui pourraient être en situation réelles.

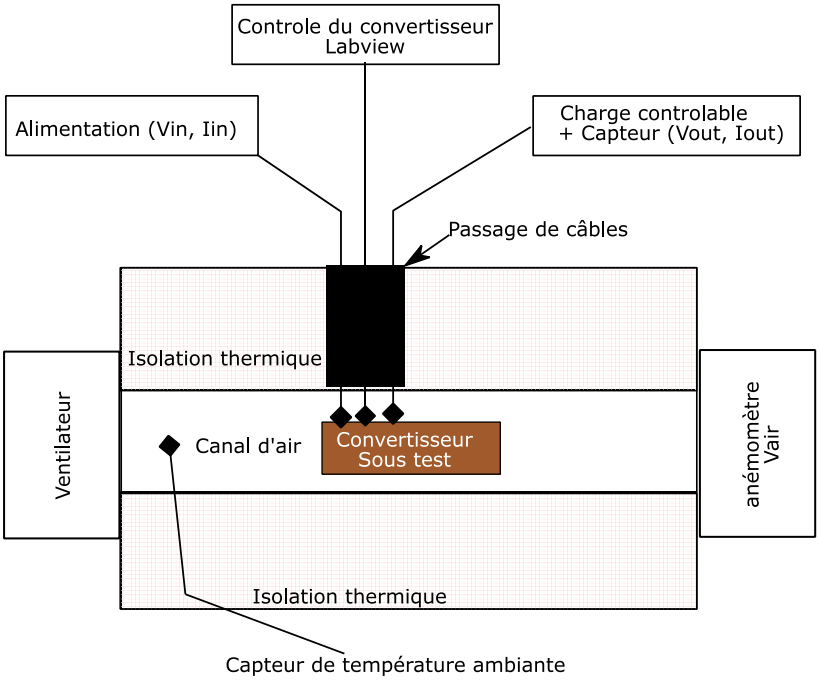


Figure 52 : Vue de dessus du banc de test et de mesure de la température et des points de fonctionnement du convertisseur.

Le banc de test est constitué d'un environnement contrôlé en température et en vitesse d'air et d'humidité grâce à un ventilateur et une résistance chauffante. L'expérimentation part d'un banc de test existant au laboratoire développé dans le cadre de la thèse d'André Andreta pour lequel il a fallu réaliser quelques modifications pour la nouvelle application. Le convertisseur est placé dans un canal d'air hermétique isolé, fabriqué pour les besoins de l'expérimentation en fabrication additive, permettant de cibler le flux d'air sur le convertisseur. Une fenêtre est réalisée sur le dessus du canal pour permettre l'acquisition d'images avec la caméra IR.

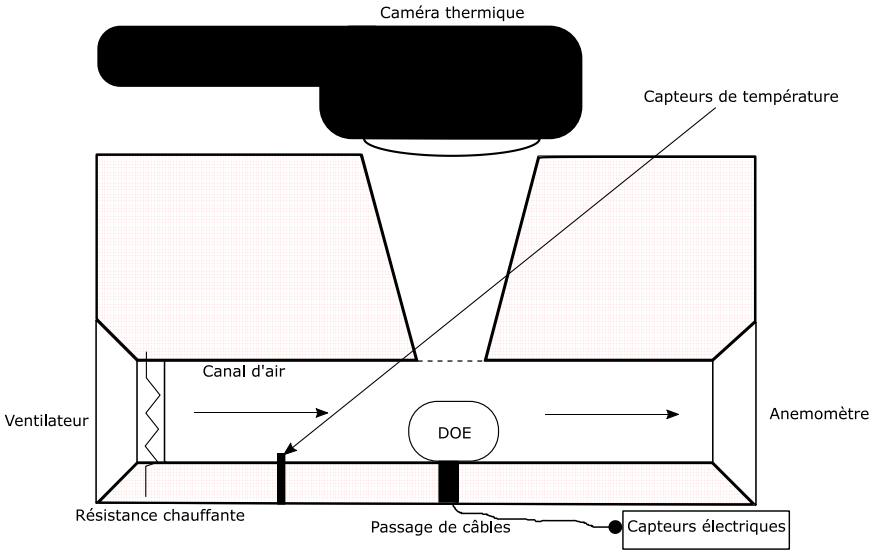


Figure 53 : Vue en coupe du banc de test et de mesure de la température et des points de fonctionnement du convertisseur (emplacement de la caméra thermique et des différents capteurs).

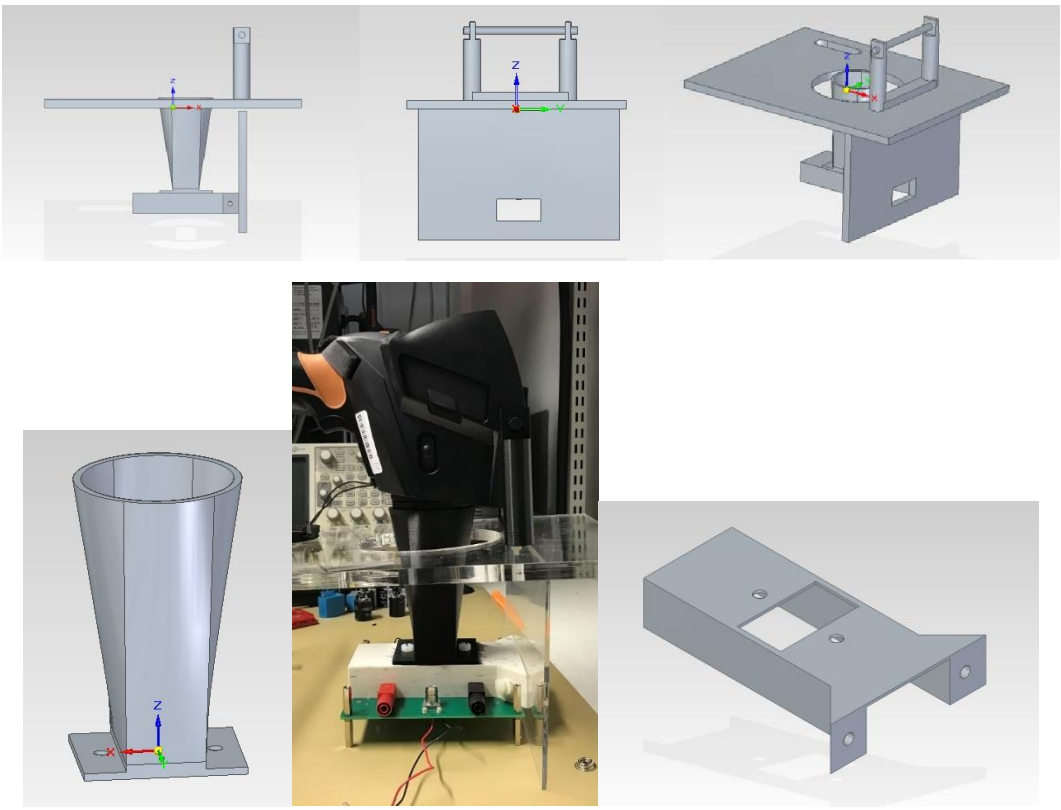


Figure 54 : Pièces pour la construction du banc de test ; En haut une vision sur plusieurs angles de toutes les pièces imbriquées, en bas à gauche l'entonnoir de maintien de la caméra thermique, en bas à droite le canal d'air avec la fenêtre de la dimension du convertisseur DAB, le tout mis dans le banc de test où la température et la vitesse de l'air sont contrôlées

La figure 54 présente les pièces conçues pour l'expérimentation, et apporte une indication sur l'échelle du montage sachant que la fenêtre du convertisseur dans le canal d'air fait 12x5cm. Le banc de test est complété par un générateur DC, une résistance électronique ainsi qu'un Wattmètre le tout pilotable informatiquement à l'aide d'une liaison série RS232 afin d'appliquer au convertisseur les points de fonctionnement préalablement établis et de mesurer la tension d'entrée, le courant d'entrée, la tension de sortie, le courant de sortie ainsi que la température du convertisseur et la vitesse de l'air. Ces données sont exportées en un seul fichier CSV exploitable en post-traitement. Les appareils de mesures ainsi que les variables d'entrée et de sortie sont décrits dans le tableau 14 :

Tableau 14 : Listes des appareils de mesure, les variables mesurées et les détails de mesure.

Appareil de mesure	**Variables mesurables**	**Description**
Capteurs de température	Température ambiante du convertisseur	3 capteurs sont placés dans le canal d'air, et la température calculée est la moyenne des 3 mesures. La précision de mesure est de +/- 1°C.
Anémomètre	Vitesse de l'air	L'anémomètre est placé à l'extrémité du canal d'air, nous supposons qu'en régime permanent le débit est conservé tout le long du canal. L'appareil sélectionné Chauvin Arnoux C.A.1224 a une précision de 3% donc ±0.1m/s
Alimentation (générateur à courant continue) 	Courant et tension d'entrée	La tension d'entrée est contrôlable grâce à l'interface HM. Cette tension est mesurée grâce au wattmètre Fluke NORMA 5000 d'une précision de ±0.03%.
Wattmètre 	Courant et tension de sortie	Permet de mesurer les tensions et les courants de l'entrée et de la sortie et les envoie au contrôleur sur LabVIEW qui régule la tension en sortie du convertisseur d'une précision de ±0.03%.
Caméra thermique 	Cartographie thermique du convertisseur	Le convertisseur est peint en noir pour que la caméra thermique ne capte que les infrarouges émis par le DUT. La caméra prend une série de photos cadencées par le rythme de changement de points de fonctionnement avec quelques minutes d'attente entre les prises pour assurer l'arrivée au régime permanent. La caméra utilisée, une Testo 875i, a une précision de ±2°C

3.2.2. Traitement d'images et extraction de la température du composant

La caméra thermique donne la température en surface de chaque composant du convertisseur pour un point de fonctionnement. Pour la plupart des composants actifs du convertisseur, il a été considéré que la température de jonction est à peu près égale à la température obtenue en surface du PCB, à proximité immédiate du composant $T_J \cong T_{surface}$. En effet, pour les composants actifs présents dans cette expérimentation (cf. tableau de la BOM), la résistance thermique entre le casing et l'ambient est plus grande que la résistance entre la jonction et le casing.

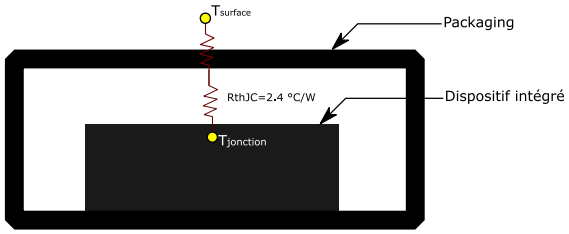


Figure 55 : Schématisation thermique simplifiée du package du MOSFET.

En ce qui concerne les composants passifs considérés dans cette expérimentation (transformateur, inductances et condensateurs), la même hypothèse est maintenue mais le point de mesure sera localisé dans des zones clés du composant. Pour les condensateurs céramiques, la température de surface représente correctement la température interne du composant.

Pour les composants magnétiques, les pertes peuvent être classées en deux catégories (les pertes dans le conducteur et les pertes dans le noyau magnétique). Depuis la surface, la caméra thermique a accès à la surface du matériau magnétique ainsi que les bords des conducteurs et leurs liaisons avec le PCB. La température maximale entre la surface 1 et la surface 2 est considérée pour l'utilisation dans les modèles FIDES. Comme schématisé dans la figure 56, en changeant le point de détection de la température il est possible d'aller chercher la température au niveau des enroulements qui se diffuse dans la brasure au niveau des pates des composants.

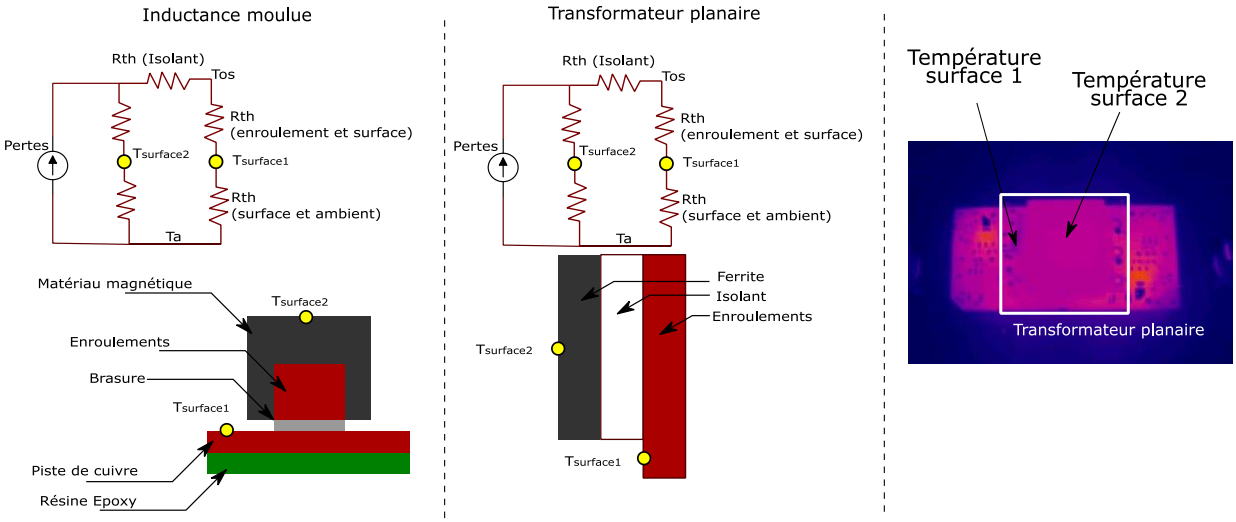


Figure 56 : Schématisation thermique simplifiée, à gauche de l'induction et à droite celle de transformateur.

La température considéré pour un composant est le pixel ayant la valeur maximale dans l'encadré de chaque composant (comme celui du transformateur figure 56). La taille de l'encadré est plus grande que celle du composant afin de prendre en considération les broches, le PCB voisin et le couplage thermique avec les composants voisins.

Le processus d'extraction de la température de surface des composants des 130 photos prises par caméra IR est constitué de 4 grandes étapes :

- **Réglage de la caméra thermique et capture d'images (Fig. 12) :** la campagne de capture d'images s'effectue dans l'environnement contrôlé avec une caméra thermique réglée sur une plage fixe de température entre 20°C et 100°C avec une sensibilité de 1°C. Avec ce réglage le code couleur de toutes les images est donc le même et les images thermiques n'arrivent pas à saturation. Un temps d'attente pour arriver au régime permanent est maintenu entre chaque capture avant de faire l'acquisition des paramètres électriques et des images thermiques et le processus est répété jusqu'à la capture de la dernière image du dernier point de fonctionnement. Chaque fichier d'image est nommé avec un code contenant les paramètres électriques pour le traitement ultérieur des données.

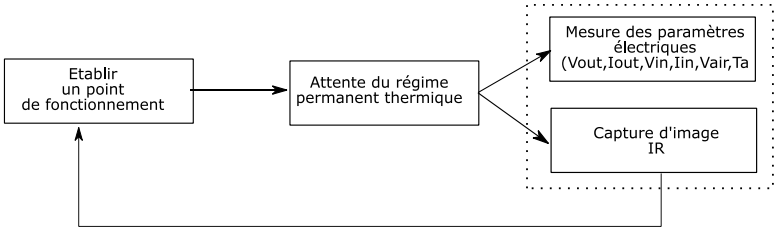


Figure 57 : Protocole de capture d'image avec la caméra thermique utilisée dans l'expérimentation.

- **Conversion de l'image thermique en matrice de points de température :** les caméras thermiques commerciales enregistrent les images en format propriétaire contenant différentes données permettant de déduire une température. Pour faire impasse du logiciel propriétaire et se donner plus de degrés de liberté au niveau du traitement de l'image, les images ont été converties en format matriciel RVB puis trois points thermiques ont été sélectionnées pour déterminer les paramètres RVB selon la formule :

$$\alpha \times R + \beta \times V + \gamma \times B = T_{pixel} \text{ (En °C)} \qquad (3.8)$$

La température de chaque pixel est donnée par une somme pondérée des couleurs RVB de chaque pixel. Ces paramètres dépendent de la caméra thermique et donc doivent être déterminés relativement à cette dernière, selon la résolution ci-dessous :

$$\begin{cases} 27\alpha + 0\beta + 128\gamma = 30 \\ 213\alpha + 36\beta + 105\gamma = 60 \\ 255\alpha + 224\beta + 33\gamma = 90 \end{cases} \xrightarrow[résolution]{} \begin{cases} \alpha = 0.1468 \\ \beta = 0.2046 \\ \gamma = 0.2034 \end{cases} \qquad (3.9)$$

Nous obtenons ainsi un tableau contenant les températures de chaque pixel.

- **Détection des composants :** la température ambiante est prise comme référence pour détecter les contours du convertisseur. Le convertisseur étant en fonctionnement il émet naturellement des ondes infrarouges. Nous passons donc l'image RVB par un filtre passe bas, selon un seuil correspondant à la température ambiante. Les pixels

résultants sont ceux contenant le convertisseur. Une fois le convertisseur détecté le reste des composants le constituant sont détectables par proportionnalité pour les deux faces. La figure 58 montre les rectangles de la détection automatisée des composants.

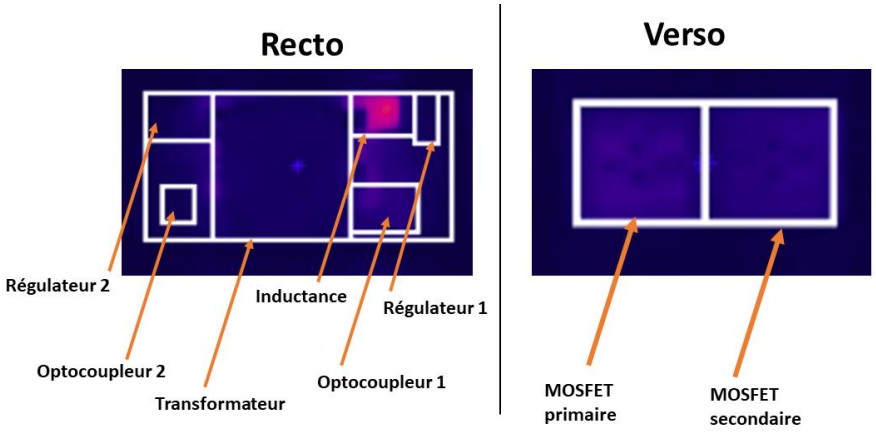


Figure 58 : Image IR recto verso du convertisseur avec détection automatique des principaux composants.

- **Extraction des températures et constitution de la base de données :** une fois les contours des composants délimités par une surface rectangulaire incluant une surface de PCB, la température maximale dans le rectangle est prise pour chaque composant. En faisant référence à la nomenclature des images, les points de fonctionnement sont associés, ce qui permet de constituer le tableau 15 d'équivalence présentant les paramètres techniques par mesure (i.e. image). La température des composants est déduite dans chaque cas.

Tableau 15 : Représentation sous la forme d'un tableau de la base de donnée.

Type de données	/numéro d'image Paramètres/	Image 1	(…)	Image 260
Variables d'entrée	Vin			
	Iin			
	Vout			
	Iout			
	Vair			
	Ta			
Variables de sortie	Températures du transformateur			
	Températures de l'inductance			
	Températures des régulateurs			
	Températures optocoupleurs			
	Températures MOSFET			
	Températures du PCB			

Pour résumer la partie 3.2, le processus d'obtention de la température des composants depuis la capture d'images jusqu'à l'extraction des données de cette image est décrit dans le schéma 59 :

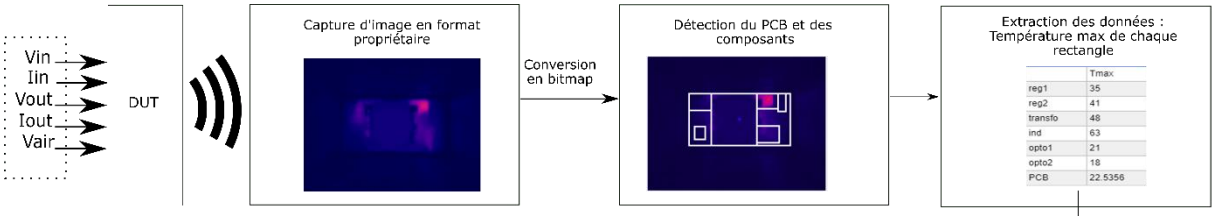


Figure 59 : Protocole expérimental complet résumé.

Une fois que la base de donnée est constituée, il faut maintenant trouver un lien entre les données d'entrée et celle de sortie, en d'autres termes, disposer d'un modèle statistique entre les deux.

La partie 3.3 traite des modèles statistiques utilisés pour exploiter la base de données obtenue dans cette partie. Tout d'abord en 3.3.1 les variables statistiques de base sont définies puis en 3.3.2 les modèles statistiques sont appliqués pour exploiter la base de données.

3.3. Modélisation statistique de prédiction du comportement thermique du convertisseur

3.3.1. Introduction à la modélisation statistique

Les travaux présentés dans cette partie ont pour objectif de déterminer et de proposer un modèle statistique capable de prédire le comportement thermique du convertisseur à partir d'une base de données de mesures thermiques par point de fonctionnement, obtenue par expérimentation, telle que décrite dans la partie précédente.

Une modélisation statistique permet d'exploiter des mesures expérimentales afin de construire, en mode apprentissage, un modèle prédictif avec un certain degré d'erreur. Pour bien construire ce modèle il est important de connaître les concepts statistiques fondamentaux qui sont, en particulier, les suivants : la qualité de prédiction, la variance, le biais, l'apprentissage supervisé et non supervisé.

L'apprentissage : a pour objectif la détermination d'une tendance entre des données d'entrée et des données de sortie d'un système d'étude. Ce processus est appelé l'apprentissage supervisé.

Le processus d'apprentissage s'effectue par régression, c'est-à-dire, en prédisant une donnée de sortie continue telle que la température ou telle qu'un rayonnement électromagnétique.

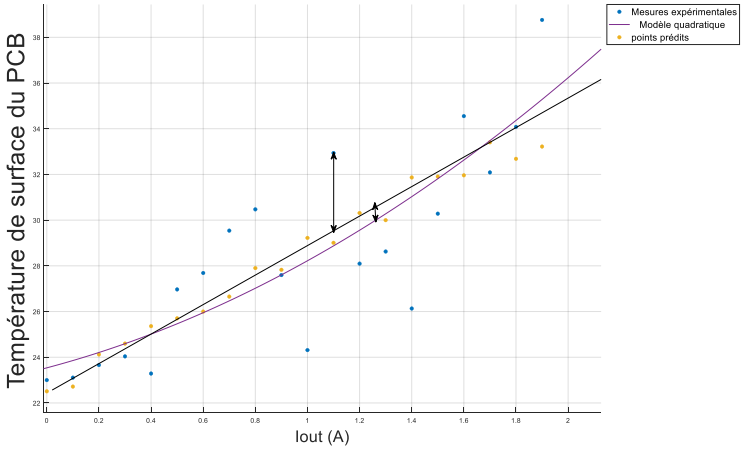


Figure 60 : La température de surface du PCB complet (moyenne des valeurs des pixels de température du convertisseur entier) par rapport au courant de sortie du DAB.

Les modèles statistiques comparés aux mesures expérimentales réelles créent deux types d'erreurs. Le premier type d'erreurs est lié au choix de la fonction d'approximation (linéaire, quadratique, …). Elle apparaît dans la figure 60 ci-dessus en forme de petite flèche. Ce type d'erreur correspond à la variance. L'autre type d'erreurs correspond au biais sur les données et équivaut à l'écart entre le modèle choisi et les points expérimentaux obtenus, comme précisé dans la formule ci-dessous :

$$biais = \frac{\sum_{i=1}^{n}(T'_i - T_i)}{n} \; T' \; est \; l'estimateur \; de \; T \qquad (3.10)$$

Le but de la modélisation statistique et de trouver un compromis entre ces deux types d'erreurs en les minimisant ensemble au maximum :

- Si un modèle présente un large biais et une faible variance, le modèle est dit « sous-ajusté » aux données et n'explique pas correctement les intrants mais donne une tendance plutôt correcte.
- Dans le cas contraire ou la variance est grande et le biais faible, le modèle est dit « sur-ajusté » et reste très spécifique aux données d'entrées et la tendance reflète moins l'état général.

Pour évaluer la qualité de l'apprentissage, la base de données doit être divisée en un échantillon d'apprentissage et un échantillon de test. Le premier échantillon sert à construire le modèle, le second sert à valider sa précision. Ainsi l'analyste peut déterminer si son compromis Variance-Biais est bien performant.

Il est possible de comparer les modèles entre eux grâce à l'indicateur ANOVA représenté par :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(T'_i - T_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(T_i - T_{moyen}\right)^2} \qquad (3.11)$$

Plus le R^2 est proche de 1, meilleure est la prédiction.

La technique de régression : consiste à déterminer un modèle mathématique qui puisse expliquer correctement la majorité des mesures expérimentales. Cette technique nécessite d'abord d'observer les données d'entrée afin de formuler des hypothèses préliminaires sur le type de fonction d'approximation. Ainsi l'analyste peut décider quel type de modèle statistique expliquera le mieux ses données, il peut aussi se servir de modèles physiques pour ne pas s'éloigner du bon sens physique. Prenons l'exemple de la température du PCB du convertisseur par rapport au courant de sortie de ce dernier :

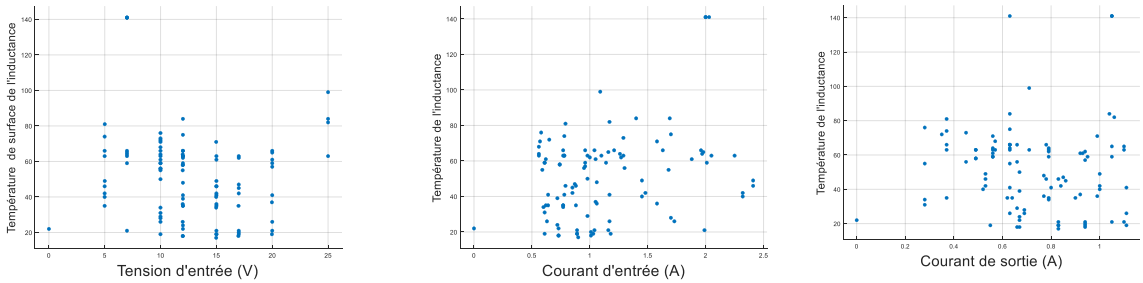
$$T_{PCB}(I_{out}) = a_0 + a_1.I_{out} \quad (3.12)$$
$$ou\ T_{PCB}(I_{out}) = a_0 + a_1.I_{out} + a_2{I_{out}}^2 \quad (3.13)$$

Les paramètres $(a_0, a_1, \dots, a_n)$ sont estimés par la méthode des moindres carrés depuis les mesures obtenues par expérimentation.

Dans le cas d'étude d'estimation de la température par rapport aux données électriques mesurées, plusieurs fonctions mathématiques seront mises en œuvre et leurs performances d'approximation seront mesurées grâce à l'indicateur de l'erreur quadratique moyenne RMSE, donné par :

$$T_i = f(V_{out}, V_{in}, I_{out}, I_{in}, T_a, V_{air})\ avec\ i : le\ composant \quad (3.14)$$
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(T'_i - T_i)^2}{n}}\ n\ étant\ le\ nombre\ d'échantillons \quad (3.15)$$

L'exploitation de la base de données : correspond aux 130 températures de surface de l'inductance dans notre cas d'étude. La même opération s'applique aux neuf autres composants du convertisseur étudiés ici.



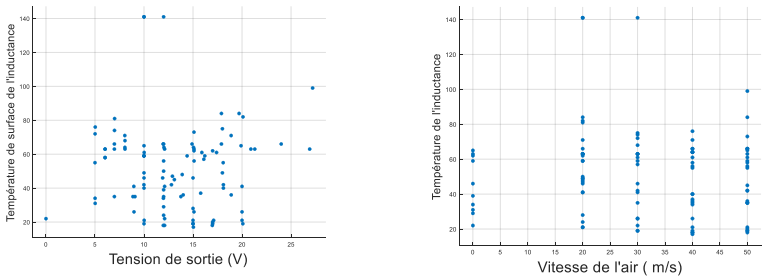
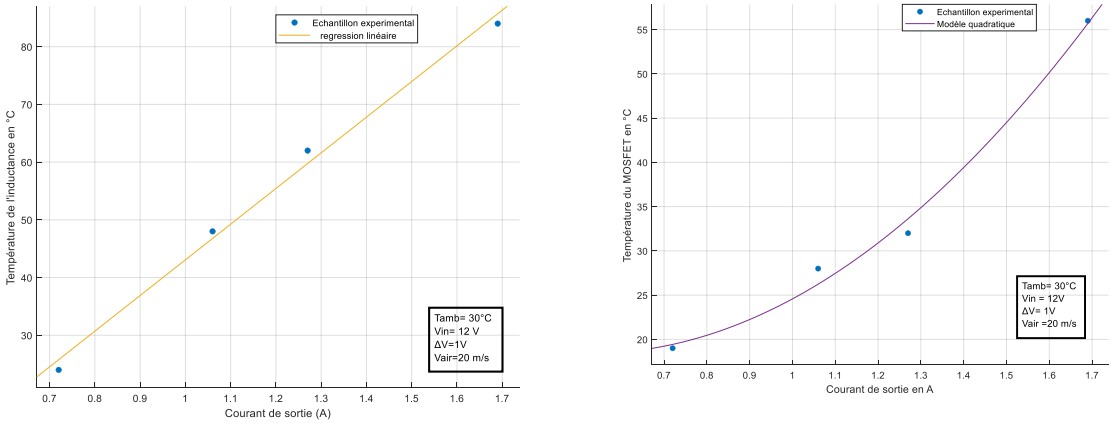


Figure 61 : La base de données complète pour l'inductance uniquement, le nuage de points de la température maximale de surface de l'inductance par rapport au point de fonctionnement et à la vitesse de l'air, pour une température ambiante de 23°C .

La base de données sert d'intrant pour l'outil d'apprentissage supervisé de MATLAB « Régression learner ». Cet outil permet de calculer tous les paramètres statistiques présentés préalablement. Il s'agit ensuite de valider les modèles en séparant la base de données en deux bases : une base pour la construction du modèle et une autre pour la validation de ce dernier. La partie suivante présente les résultats des modèles statistiques pour l'estimation de la température de chaque composant.

3.3.2. Modélisation des résultats du traitement des images thermiques

Avant de commencer l'apprentissage, il faut vérifier que les données récoltées sont saines et de bonne qualité ; il faut alors observer au préalable les données pour vérifier si elles représentent dans leurs distributions un sens physique. Ci-dessous quelques points sélectionnés parmi les 130 points de mesure, permettant de vérifier les incohérences dans les données :



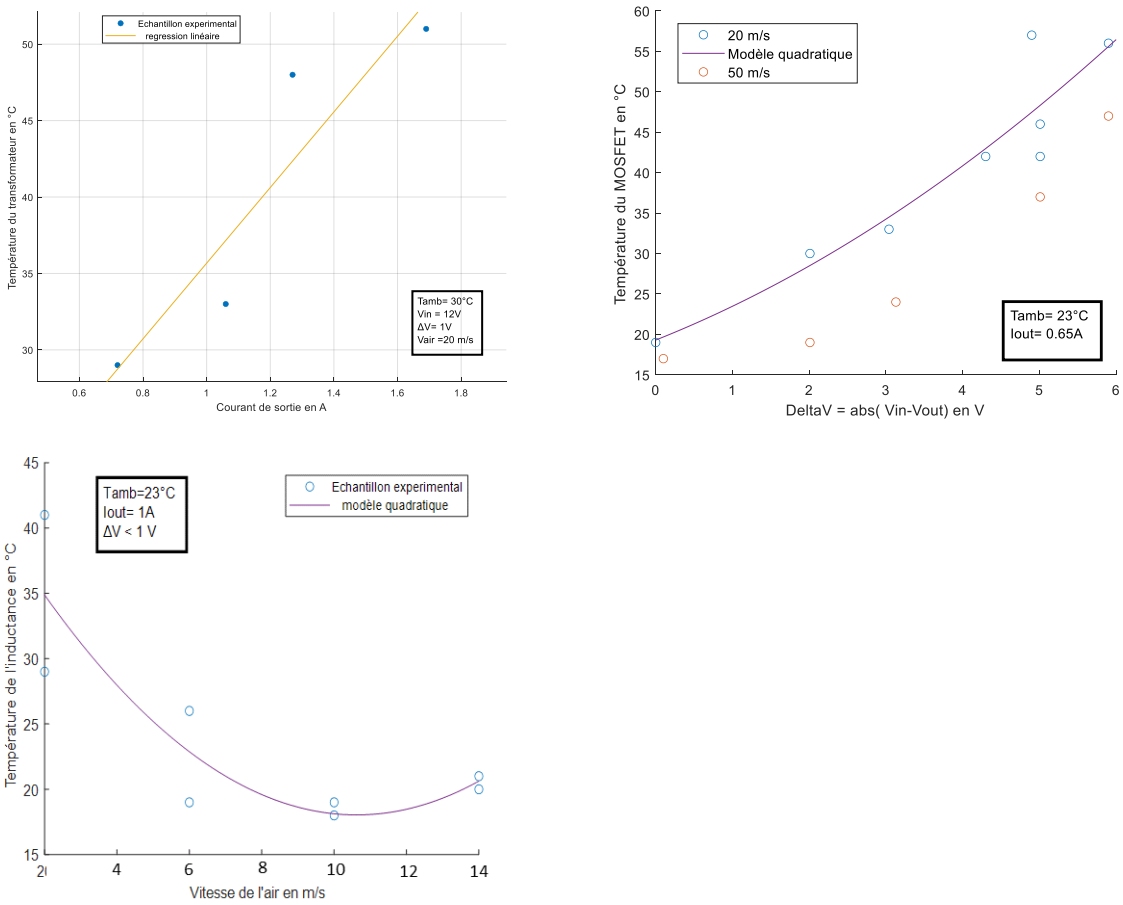


Figure 62 : Vérification en amont de la « propreté » des données et leur compatibilité à la logique physique avec un échantillon de données.

On remarque que les comportements thermiques des composants semblent correspondre à la logique physique. Par exemple la température de l'inductance augmente par rapport au courant DC de sortie du convertisseur ce qui semble cohérent d'un point de vue physique. L'augmentation du courant de sortie induit une augmentation du courant dans le AC link du convertisseur. Cette augmentation produit davantage d'effet Joules dans l'inductance qui chauffe à son tour. La croissance des pertes dans une inductance par rapport au courant est normalement quadratique, le manque de données ne nous permet pas de noter cette évolution.

On remarque aussi que la température du MOSFET augmente par rapport au ΔV. Cela s'explique par l'augmentation du courant RMS quand le gain en tension augmente [24]. Les pertes thermiques radiatives, par convection ou par conduction diminuent avec l'élévation de la vitesse de l'air autour du composant. Ce qui explique le graphique obtenu figure 62 pour les pertes dans l'inductance. Le modèle quadratique n'est pas approprié car il ajoute une montée de la température pour les hautes vitesses d'air alors que celle-ci reste stable après une certaine vitesse d'air seuil, la légère montée est surement dû à l'erreur de capture de la caméra thermique.

Cette étape permettra de valider la qualité des données collectées et de guider le choix de régression adéquate pour chaque modèle, Il s'agit de déterminer les modèles d'approximation correspondant à une logique physique.

Une fois la base de données validée, la méthode procède à un apprentissage supervisé sur MATLAB qui donne une prédiction. Le logiciel divise automatiquement la base de données en deux parties : 85% des points servent à construire le modèle statistique et 15% des points restants servent à valider le modèle obtenu. Nous avons essayé trois types de modèles d'interpolation différents et comparé leurs performances grâce à l'erreur quadratique moyenne RMSE et l'indicateur d'ANOVA.

Tableau 16 : Comparaison des trois modèles de régression de la température par rapport au point de fonctionnement par leurs erreurs quadratiques et le R2 (les cases noircies sélectionnent le modèle pour chaque composant).

Composants	Modèle linéaire	Modèle gaussien	Modèle quadratique	RMSE (en °C)	R^2
Régulateur gauche	■			1,2	0,84
		■		1,18	0,84
			■	1	0,85
Régulateur droit	■			1,1	0,85
		■		1,1	0,85
			■	0,9	0,89
Transformateur	■			0,7	0,9
		■		0,9	0,87
			■	0,8	0,87
Inductance	■			2	0,8
		■		2	0,5
			■	1	0,65
Optocoupleur gauche	■			2	0,86
		■		3	0,8
			■	4	0,84
MOSFET bras primaire	■			1,8	0,74
		■		3	0,63
			■	2	0,8
MOSFET bras secondaire	■			2	0,8
		■		2,6	0,54
			■	3	0,8

La différence de performance entre les modèles est minime pour les régulateurs, le transformateur et les optocoupleurs. Cependant, pour l'inductance le modèle linéaire donne une meilleure représentation des données, pour les MOSFETs les modèles linéaires sont légèrement moins performants que les modèles quadratiques.

Les figures 63 montre la distribution des données expérimentales en bleu et les prédictions en jaune en choisissant le meilleur modèle de prédiction pour l'inductance par exemple. Les

erreurs d’estimation de la température oscillent pour une mesure minimale de 20°C entre 1°C et 3°C pour certains cas extrêmes ce qui est acceptable vu la sensibilité en erreur des capteurs choisis et le petit effet d’une petite variation en température sur la MTBF.

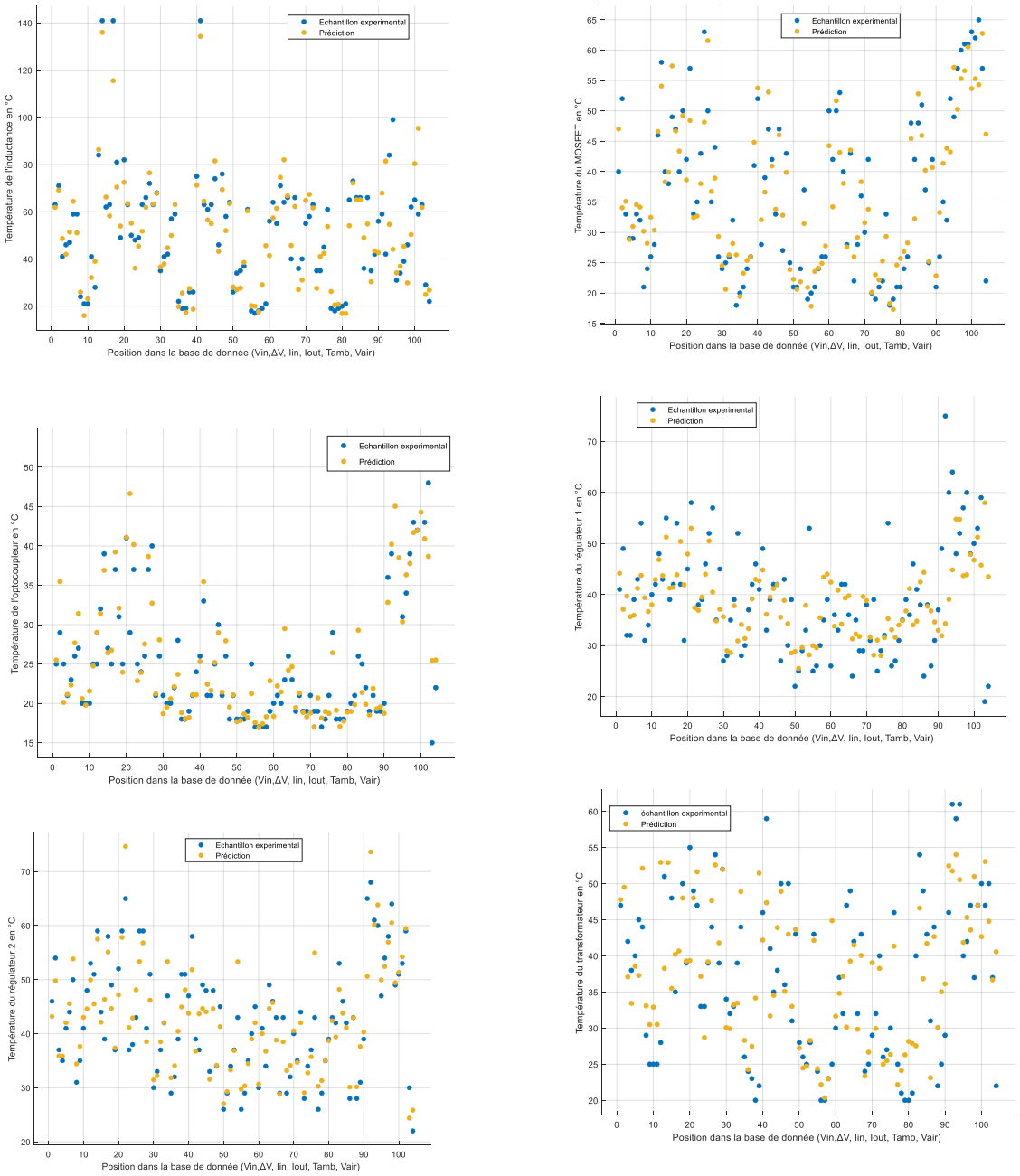


Figure 63 : En Bleu les données expérimentales des températures de l’inductance à plusieurs points de fonctionnement différents, en jaune les points issus des modèles statistiques. (Cette figure est à titre observationnel)

Des modèles statistiques liant la température de chaque composant et les variables électriques et thermiques globales au convertisseur sont donc obtenus à la fin de cette étape. Ces modèles

sont utilisés dans les équations de fiabilité de FIDES présentés à la section suivante : à partir d'une température prédite avec des données électriques, la durée de vie restante des composants peut être calculée.

3.4. Prédiction en temps réel de la durée de vie restante

3.4.1. Algorithme de calcul de la durée de vie résiduelle

Selon le modèle théorique de durée de vie des composants présentés dans le tableau 3, le taux de fiabilité λ permet de calculer la durée de vie restante à partir des données/paramètres également disponibles dans le tableau 3. Ce paramètre λ est calculé à partir de modèles empiriques extraits du manuel de fiabilité FIDES. Il est aussi possible de considérer des modèles de fiabilité issus d'essais de vieillissement accéléré plus spécifiques aux composants et aux technologies utilisées.

Dans le cadre de cette étude, la méthode de suivi de la durée de vie restante se fonde sur le principe de la « modélisation de l'accumulation des facteurs de vieillissement ». Dans la littérature plusieurs essais prouvent que l'accumulation des facteurs de vieillissement pour le calcul de la MTBF donne le même résultat que si le profil de mission était connu auparavant [25]. Il existe d'autres études théoriques comme celle de la règle de « Palmgren-Miner » qui est le modèle le plus simple d'accumulation des contraintes. Cette règle théorique admet que les contraintes endurées par un composant s'accumulent par une multiplication par le rapport entre le nombre de cycles à un niveau de charge donné et le nombre de cycles avant défaillance à ce niveau de charge.

Dans notre étude, chaque pas temporel correspond à un changement de cycle. Les stress calculés seront donc réintégrés dans le calcul grâce à un ratio, dans ce cas, temporel et non cyclique, selon la formule suivante :

$$Stress(t+\Delta t) = Stress(t-\Delta t) \times \frac{t-\Delta t}{t} + stress(t) \times \frac{\Delta t}{t} \quad (3.16)$$

Le stress imposé au temps t est une accumulation du stress accumulé de [0, t-Δt] et le nouveau stress appliqué entre [t, t+Δt], $avec\ \Delta t\ étant\ le\ pas\ temporel\ de\ passage$. C'est finalement une moyenne pondérée des stress vécus. Cependant, cela implique de changer la méthode d'utilisation du modèle de cyclage thermique de FIDES pour les composants électroniques. Le modèle de vieillissement lié au cyclage thermique de FIDES pour l'inductance par exemple devient :

$$\pi_{TCy} = \left(\frac{12 \times N_{cy}}{t_{pf}}\right) \times \left(\frac{\Delta T_{cy}}{20}\right)^{1,9} \times \left(\frac{\min(\Delta t, 2)}{2}\right)^{\frac{1}{3}} \times e^{1414 \times \left[\frac{1}{313} - \frac{1}{(T_j+273)}\right]} \quad (3.17)$$

Avec :

$N_{cy} = 1$ puisque pendant ce suivi, le nombre de fois un point de fonctionnement correspond à un cycle est inconnu.

$t_{pf} = \Delta t$: le temps de fonctionnement au point de fonctionnement donné.

ΔT_{cy}: la différence de température entre deux cycles successifs.

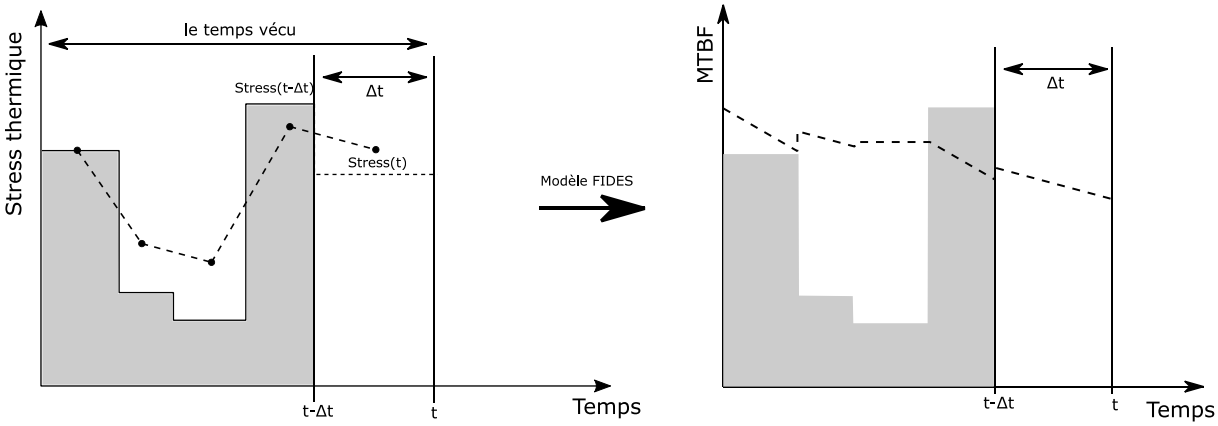


Figure 64 : Explication du calcul pas à pas de la contrainte thermique accumulée et depuis ce calcul l'obtention de la MTBF équivalente à chaque accumulation.

La figure 64 présentent deux graphes : à gauche le calcul du cumul des stress avec le temps permet d'obtenir le facteur « contrainte » au moment t. Sur le graphique de droite, à partir du cumul de stress, la MTBF est recalculée, donc, selon le stress reflétant le vécu réel du composant.

Par la suite, il s'agit de comparer le résultat des modèles MTBF de FIDES sans le monitoring (i.e. si l'on connaissait le profil de mission vécu par le composant à l'avance) et avec monitoring (i.e. si l'on ignore le profil de mission du composant, la MTBF est mise à jour au fur et à mesure de la vie de ce dernier), pour valider de manière théorique cette approche d'accumulation des stress.

Nous proposons de réaliser trois tests pour valider le degré d'approximation « acceptable » de la méthode de la MTBF proposée dans ces travaux de recherche:

1- Comparer le résultat des deux approches pour un profil de mission périodique avec un pas en température constant.
2- Comparer le résultat des deux approches pour un profil de mission périodique avec un pas en température non constant.
3- Comparer le résultat des deux approches pour un profil de mission périodique avec un pas en température et en temps de phase non constant.

- **Test 1 appliqué sur le transformateur :** le profil de mission choisi pour calculer la MTBF sur cet exemple est présenté sur le graphique figure 65 (oscillations en température entre 40 à 80°C avec des rampes en température de 40°C par sec et une période de 5 sec)

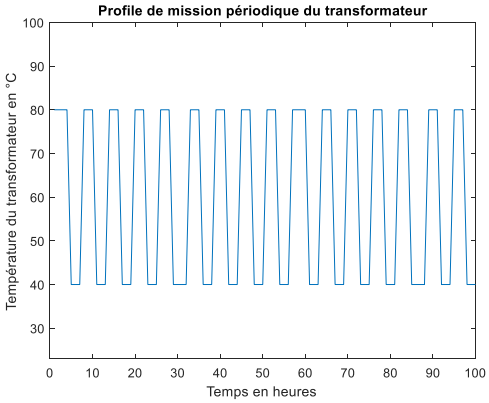


Figure 65 : Profil de mission simple périodique.

Nous calculons la MTBF puis la fiabilité, par la formule $R = e^{-t/MTBF}$ par l'approche monitorée et par l'approche classique, dont les résultats sont présentés sur les graphes dans la figure 66 :

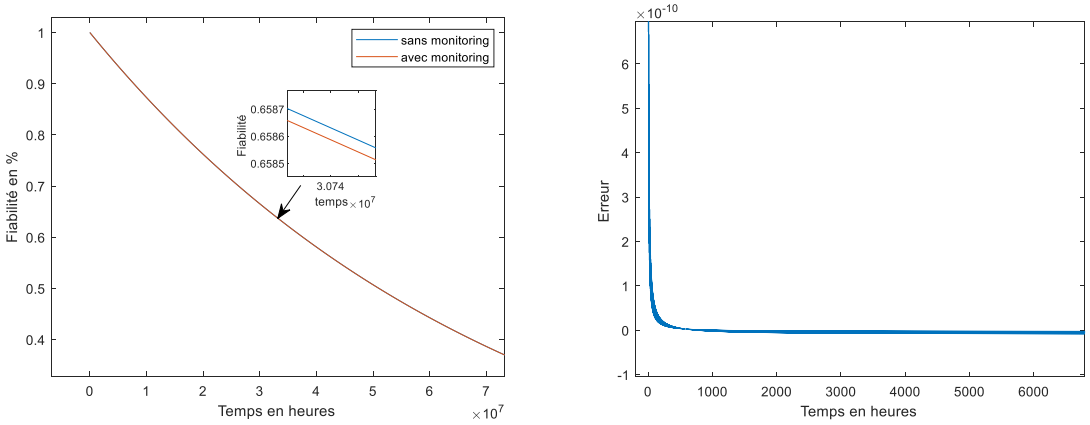


Figure 66 : A gauche la fiabilité par rapport aux heures de fonctionnement pour un profil de mission périodique, à droite la différence entre la fiabilité avec et sans monitoring.

Les deux courbes (avec et sans monitoring) sont confondues. L'erreur peut être considérée comme négligeable : $erreur = \Delta\lambda \ll 10^{-10}$. Les premières itérations génèrent d'avantage d'erreur, à partir d'un certain nombre d'itérations l'erreur devient négligeable. Ce premier test permet de conclure de la validité mathématique de la méthode de monitoring proposée pour un signal périodique simple ou le delta température est constant tout le long de la vie du composant.

Le pas de calcul est constant et bien choisi pour bien échantillonné le signal ; Cependant dans le but de suivre l'état de santé d'un composant, le profil d'usage est méconnu et donc il est difficile de choisir un pas de calcul permettant d'échantillonner un signal aléatoire sans pouvoir le stocker en partie. Une étude comparative est effectuée afin de répondre à cette question plus bas.

- **Test 2 sur l'exemple du transformateur :** le profil de mission choisi pour calculer la MTBF est présenté dans le cas où le delta température n'est pas constant ; il varie entre les valeurs : 60,40 et 20°C, la durée de chaque phase est constante. Présenté sur le graphe 67 :

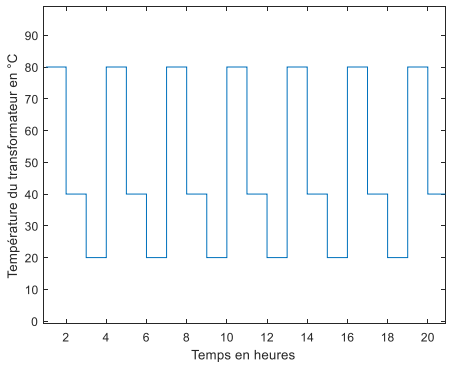


Figure 67 : Profil de mission simple périodique à 2 phases.

La MTBF peut être calculée, puis la fiabilité selon la formule : $R = e^{-t/MTBF}$ dans le cas monitorée et par l'approche classique. On obtient les résultats présentés dans les deux graphiques 68 :

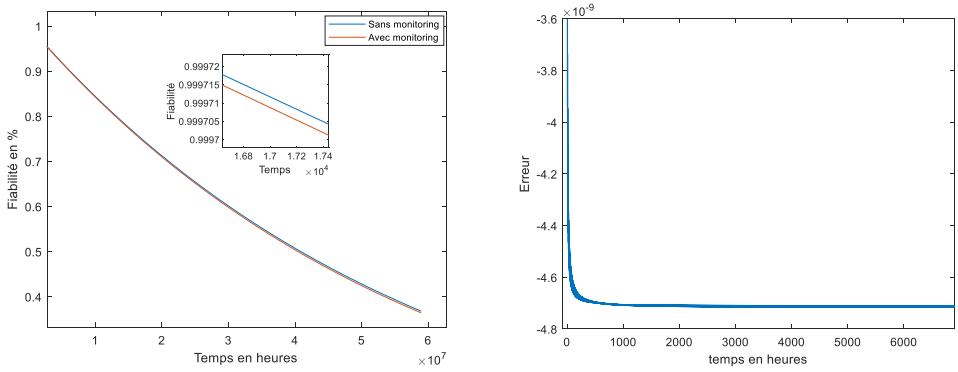


Figure 68 : A gauche la fiabilité par rapport aux heures de fonctionnement pour un profil de mission périodique à 2 phases, à droite la différence entre la fiabilité avec et sans monitoring.

En bleu la fiabilité selon l'approche classique et en rouge en utilisant un monitoring. Comme pour le test 1, l'erreur peut être considérée comme négligeable.

- **Test 3 en prenant l'exemple du transformateur :** le profil de mission choisi pour calculer la MTBF est le cas où delta température n'est pas constant, c'est-à-dire, il prend les valeurs de (60, 40 ou 20) avec un pas temporel associé à chaque point de fonctionnement durant (3h, 2h ou1h). Ci-dessous le profil de mission, Fig. 69 :

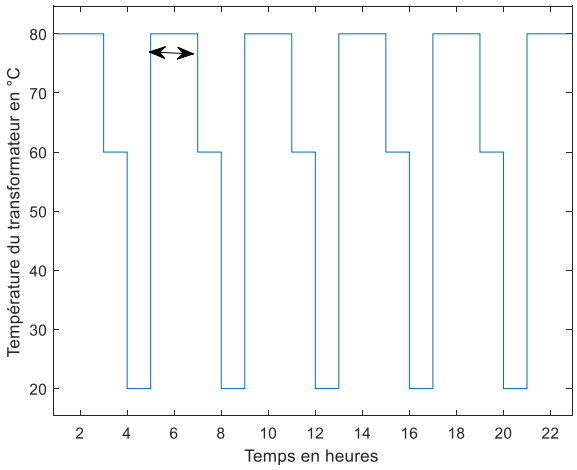


Figure 69 : Profil de mission simple périodique à 3 phases de durées différentes.

On obtient les résultats de calcul de la MTBF présentés dans les graphiques 70 : à gauche les deux courbes présentant la fiabilité en fonction du temps avec et sans monitoring et à droite l'erreur entre ces deux courbes en fonction du temps.

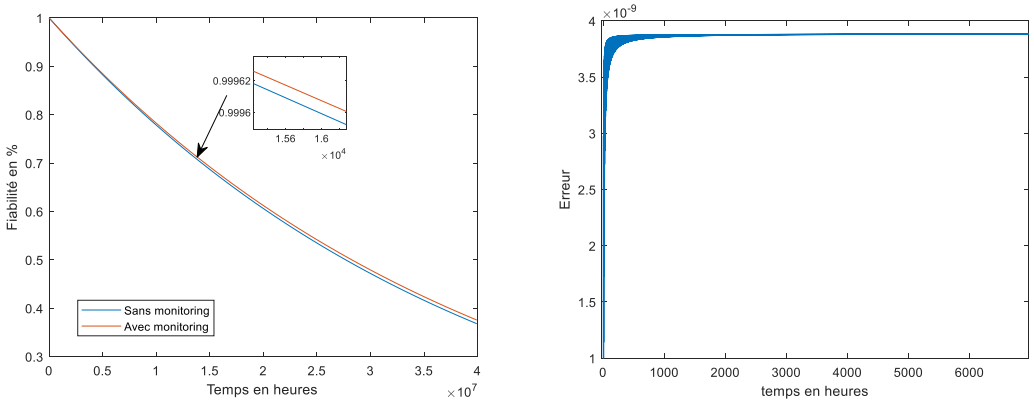


Figure 70 : A gauche la fiabilité par rapport aux heures de fonctionnement pour un profil de mission périodique à 3 phases de durées différentes, à droite la différence entre la fiabilité avec et sans monitoring.

On observe que l'erreur entre les deux méthodes est négligeable. Cela valide la méthode proposée pour les différents profils de mission dans cette étude.

En revanche, cette méthode d'accumulation des stress ne prends pas en compte la dynamique de passage d'un point de fonctionnement à un autre. Or, le vieillissement est aussi sensible à cette dynamique même si la plupart des modèles de fiabilité existants considèrent comme nul le temps de passage d'un point de fonctionnement à un autre. Le graphique figure 71 illustre cette différence entre le profil de mission théorique et le profil de mission prenant en compte les temps de passage. Les pas utilisés pour les calculs sont précisés par des points noirs.

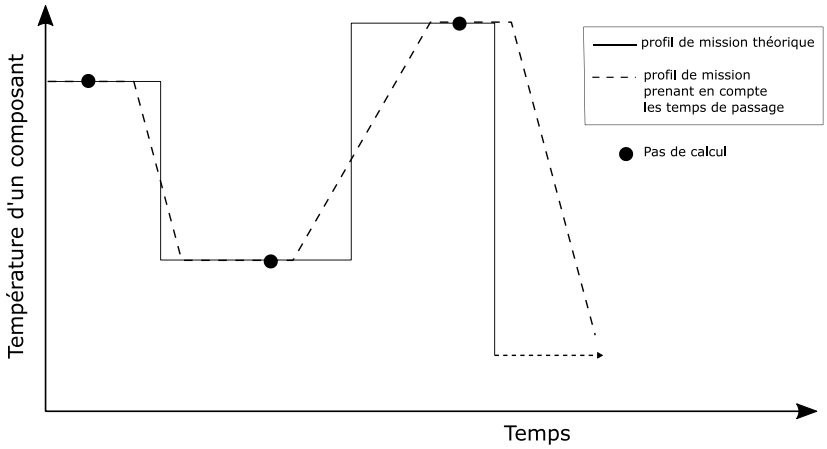


Figure 71 : Un profil de mission fictif vs. un profil de mission réaliste avec de l'inertie thermique.

La littérature propose deux méthodes pour palier à cette simplification :

Proposition 1 : il s'agit d'ajouter un facteur de vieillissement correspondant à l'effet du passage d'un point de fonctionnement à un autre dans les modèles de vieillissement [26]

$$\lambda = \lambda_0 \times \pi_{th} \times \pi_{cy_th} \times \pi_{pass_th} \times \pi_{ch} \times \pi_{méca} \quad (3.18)$$

Avec π_{th} le facteur d'accélération du vieillissement correspondant à la valeur absolue de la température de chaque point de fonctionnement ;

π_{cy_th} le facteur dû au cyclage thermique ;

π_{pass_th} le facteur représentant la dynamique de passage d'une température à une autre.

Proposition 2 : il s'agit de réduire le pas d'échantillonnage pour prendre en considération toutes les différentes phases. Cette méthode est traitée dans la sous-section suivante 3.4.2

3.4.2. Tolérance du calcul par rapport au pas de calcul

Tout d'abord, le signal à échantillonner doit respecter le théorème de Nyquist-Shannon pour éviter le sous-échantillonnage, soit :

$$f_{echantillonage} \gg 2 \times f_{max} \quad (3.19)$$

Avec :

$f_{echantillonage}$ la fréquence d'échantillonnage déterminée par le pas de calcul.

f_{max} la fréquence de cyclage thermique maximale du profil de mission des composants.

Cependant, respecter cette équation ne garantit pas d'éviter le sur-échantillonnage. Il s'agit pour cela de définir correctement les phases pendant le vécu des composants : cela peut se réaliser de manière active en détectant le passage d'une phase à une autre avec un degré de sensibilité élevé (technique asynchrone), ou en considérant le pas de calcul constant et correspondant à l'inertie thermique des différents composants (technique synchrone). Une étude spéciale est

menée dans la partie suivante concernant la dynamique thermique à considérer pour chaque composant.

Dans la figure 72, deux pas d'échantillonnage ont été considérés), afin de comparer les résultats de la MTBF et conclure sur la sensitivité du modèle des accumulations des stress par rapport au pas de calcul. Le profil de mission en rouge est celui qui a parfaitement été échantillonné sans perte de données, le profil de mission en bleu est celui qui est sous-échantillonné et donc perd en détail. L'erreur obtenue en comparant les fiabilités obtenues à 10000h est de 10%. Ceci est un exemple bien précis, dans plusieurs cas l'erreur dû au pas de calcul est entre 10% et 15%.

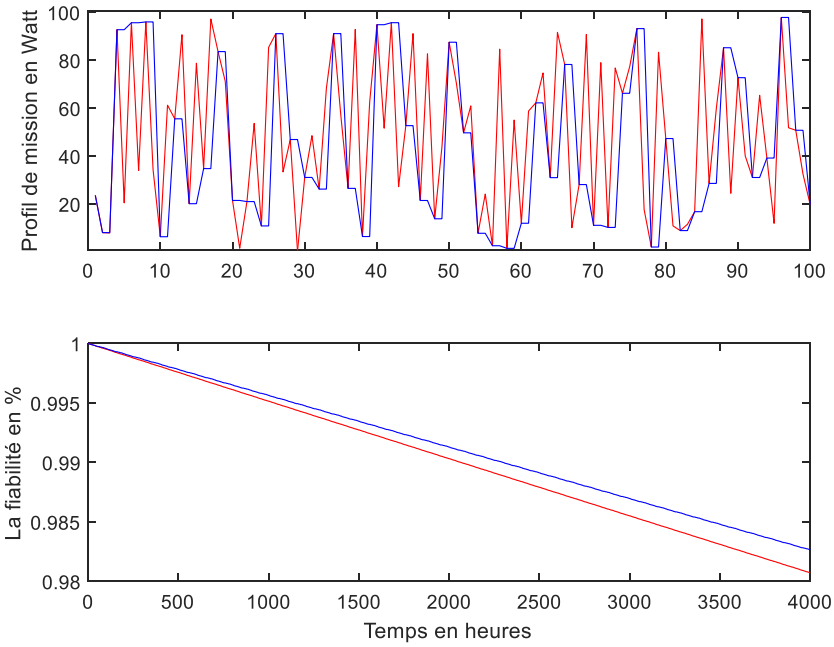


Figure 72 : En haut un profil de mission en puissance périodique sur 100h, la courbe bleue est un profil de mission sous-échantillonné, En bas la fiabilité de l'inductance du DAB selon chaque profil de mission.

L'hypothèse de travail dans cette étude est que les temps d'échantillonnage fonction de l'inertie thermique des composants peuvent être considérés comme pas de calcul et permettraient de refléter correctement le comportement thermique de chaque composant. Décrire correctement le comportement thermique du composant implique de bien décrire le profil de mission que ce dernier subit.

Dans la partie suivante, un cas d'application de cette méthode de suivi d'état de santé des composants du même convertisseur DAB décrit plus haut est mené. Ce cas d'étude ne prouve pas l'exactitude des modèles développés plus haut, seule un essai de vieillissement accéléré combiné à l'outil peut nous permettre de faire cela.

Cependant il sert à démontrer la possibilité d'implémentation dans un microcontrôleur sans altérer le fonctionnement de ce dernier et du convertisseur. Tout en mettant en exergue les possibles verrous liés à l'implémentation d'un observateur d'état non intrusif.

4. Cas d'étude

4.1. Description du cas d'étude

Le convertisseur utilisé dans ce cas d'étude est le DAB [20V,5A] utilisé plus haut en amont. La méthode de monitoring expliquée dans les parties précédentes nécessite 5 valeurs pour alimenter le modèle thermique : les tensions d'entrée et de sortie, les courants d'entrée et de sortie, la vitesse de l'air et la température ambiante. Il fallait donc mettre en place cinq capteurs, deux pour la tension, deux pour le courant, un pour la température ambiante, la vitesse de l'air étant une variable disponible dans le microcontrôleur.

Tout d'abord, pour les tensions, un pont diviseur permet d'abaisser la tension avant de l'appliquer en entrée dans le microcontrôleur. Ce dernier ne peut pas prendre une tension qui dépasse les 3,3V donc, sachant que les tensions d'entrée et de sortie peuvent monter jusqu'à 30V, il faut les diviser par 10. Pour ce faire, il faut prendre des valeurs de résistances appropriées, par exemple 10kΩ et 90kΩ. Un amplificateur opérationnel en suiveur a été ajouté afin d'isoler les tensions d'entrée et de sortie.

Concernant la température, la manière la plus simple de réaliser un capteur de température est de placer une thermistance dans un pont diviseur de tension. La thermistance étant une résistance variable en fonction de la température, elle reflète donc la température ambiante si cette dernière est placée correctement par rapport au convertisseur.

Concernant les courants, il existe plusieurs méthodes de mesure, voici ci-dessous un tableau comparatif des principales méthodes :

Tableau 17 : Comparaison des différents capteurs de courants

Capteurs	**Alimentation externe**	**Prix**	**Avantage**	**Inconvénient**
Shunt	non	≈1 €	Robuste	Intrusif et inductance parasite
Transformateur de courant	non	≈5 €	Robuste et simple	Uniquement les mesures AC
Bobine de Rogowski	non	≈5 €		Uniquement les mesures AC
Capteur à effet Hall	Oui, DC	≈3 €	Mesure AC et DC	Dérive en température
Magnétorésistance	Oui, DC		Miniaturisation	
Fluxgate	Oui, AC	≈5 €	Grande précision	

Les capteurs shunt sont placés en série avec le conducteur traversé par le courant, ils sont donc intrusifs mais restent une solution robuste et pas chère quand l'isolation de la mesure du courant n'est pas nécessaire.

Les transformateurs de courant sont des tores ferromagnétiques comportant un enroulement primaire et un autre secondaire avec une résistance à ses bornes. La mesure repose sur le théorème d'ampère. Ce capteur est utilisé uniquement pour des mesures en AC et ne nécessite pas une alimentation externe. La différence avec les bobines de Rogowski réside dans l'utilisation d'un noyau amagnétique, le conducteur primaire est encerclé d'un enroulement hélicoïdal. Ce capteur est souvent en forme de pince donc la mesure dépend du centrage de cette dernière par rapport au conducteur primaire.

Les capteurs à effet Hall sont les plus abondants dans le marché des composants et fonctionnent sous le principe de l'effet Hall qui repose sur l'apparition d'une différence de potentiel appelée tension de Hall entre le sommet et la base de l'échantillon semi-conducteur. Cette tension est proportionnelle au champ magnétique appliqué et dépend donc du courant à mesurer. L'échantillon semi-conducteur est sensible à la variation en température.

Les capteurs à base de matériaux magnéto résistants voient leur résistance varier au carré du cosinus de l'angle entre l'aimantation et le courant de commande.

Les capteurs fluxgates repose sur la modulation de la perméabilité d'un noyau magnétique au moyen d'un flux magnétique créé par un bobinage d'excitation. Ces capteurs se distingue par leur précision de mesure.

La méthode shunt est la plus simple à mettre en place mais elle ne reste efficace qu'avec une plage de mesure faible avec des courants qui ne varient pas beaucoup en amplitude. Dans notre cas les courants varient de 0 à 5A ce qui est considéré comme étant une grande variation. L'option du transformateur a été rapidement écartée car cette méthode est utilisée pour mesurer des courants alternatifs. Quant aux fluxgate, ils sont souvent très peu disponibles en stock et assez chers. L'option choisie est donc le capteur à effet Hall.

Une carte de mesure regroupe ces capteurs, des buffers, des filtres et le microcontrôleur de calcul et de sauvegarde en mezzanine de cette carte. Le convertisseur est contrôlé par le même microcontrôleur que celui réalisant les calculs du monitoring. Il s'agit de voir si la méthode de monitoring développée ne gêne pas le bon contrôle des interrupteurs et donc le bon fonctionnement du convertisseur. Ci-dessous figure 73 une photo du banc de test regroupant les différentes cartes de mesure et le convertisseur.

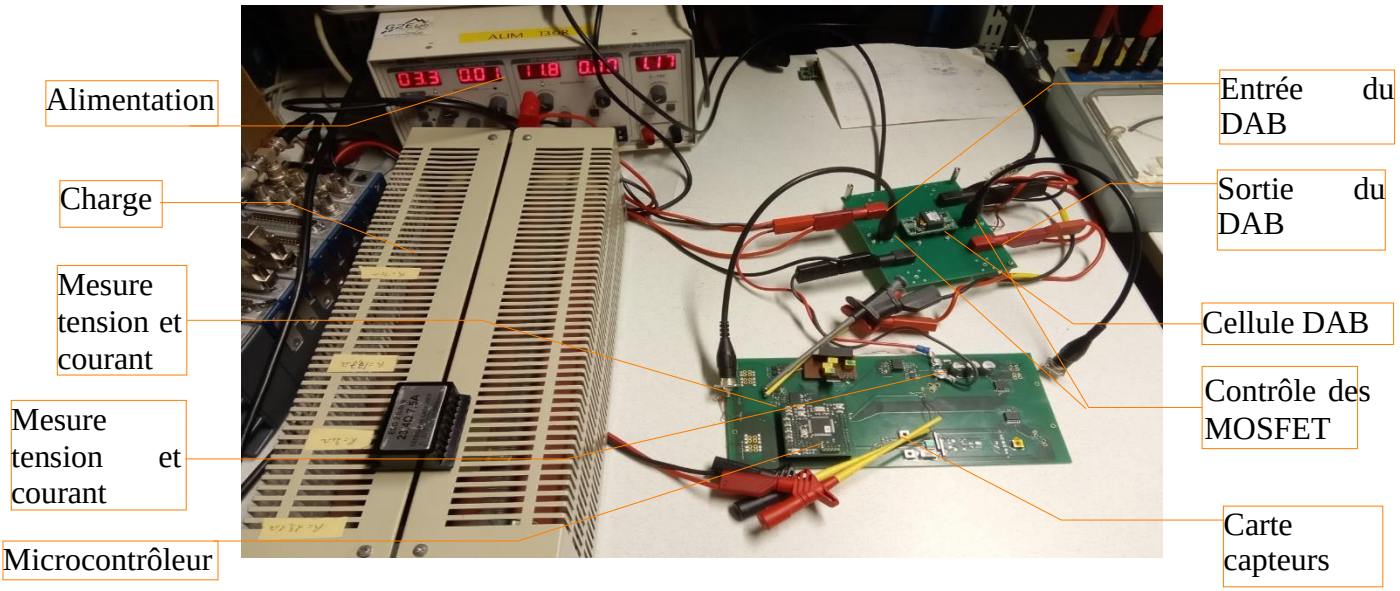


Figure 73 : Le banc de test du monitoring sur un convertisseur DC/DC DAB.

Avant de commencer l'implémentation de l'algorithme de monitoring dans le microprocesseur, il s'agit d'abord de déterminer les pas de calcul et de mesure. Nous avons choisi de considérer les constantes de temps thermiques comme un indicateur de passage d'un état à un autre. Comme les modèles développés sont tous liés à la température des composants, il faut donc se caler sur les temps de réponses thermiques pour éviter de sur-échantillonner ou sous-échantillonner.

En effet si les composants du DAB mettent quelques secondes à atteindre une certaine température il est inutile de monitorer à la milliseconde même si le microcontrôleur est capable de le faire. Pour déterminer les constantes de temps thermiques, nous avons utilisé une caméra thermique Fluke permettant de prendre des vidéos et nous imposons au convertisseur de passer d'un point de fonctionnement à un autre pendant la capture de vidéo pour former un échelon de pertes.

Ci-dessous, figure 74, les résultats pour les composants étudiés. Le tableau 18 donne les constantes de temps thermiques liées à l'inertie de chaque composant au même point de fonctionnement. Le composant arrive au régime permanant thermique à, à peu près, 3τ. Cette durée sera considérée comme un indicateur du pas de calcul du suivi de l'état de santé.

Tableau 18 : Temps de réponse thermique des composants dans le DAB.

Composants	**Temps de réponse thermique τ**
Régulateur au primaire	1min 36s
Régulateur au secondaire	1min 36s
Inductance	5min
Transformateur	3min 18s
MOSFET au primaire	1min
MOSFET au secondaire	1min
Optocoupleur au primaire	2min
Optocoupleur au secondaire	2min

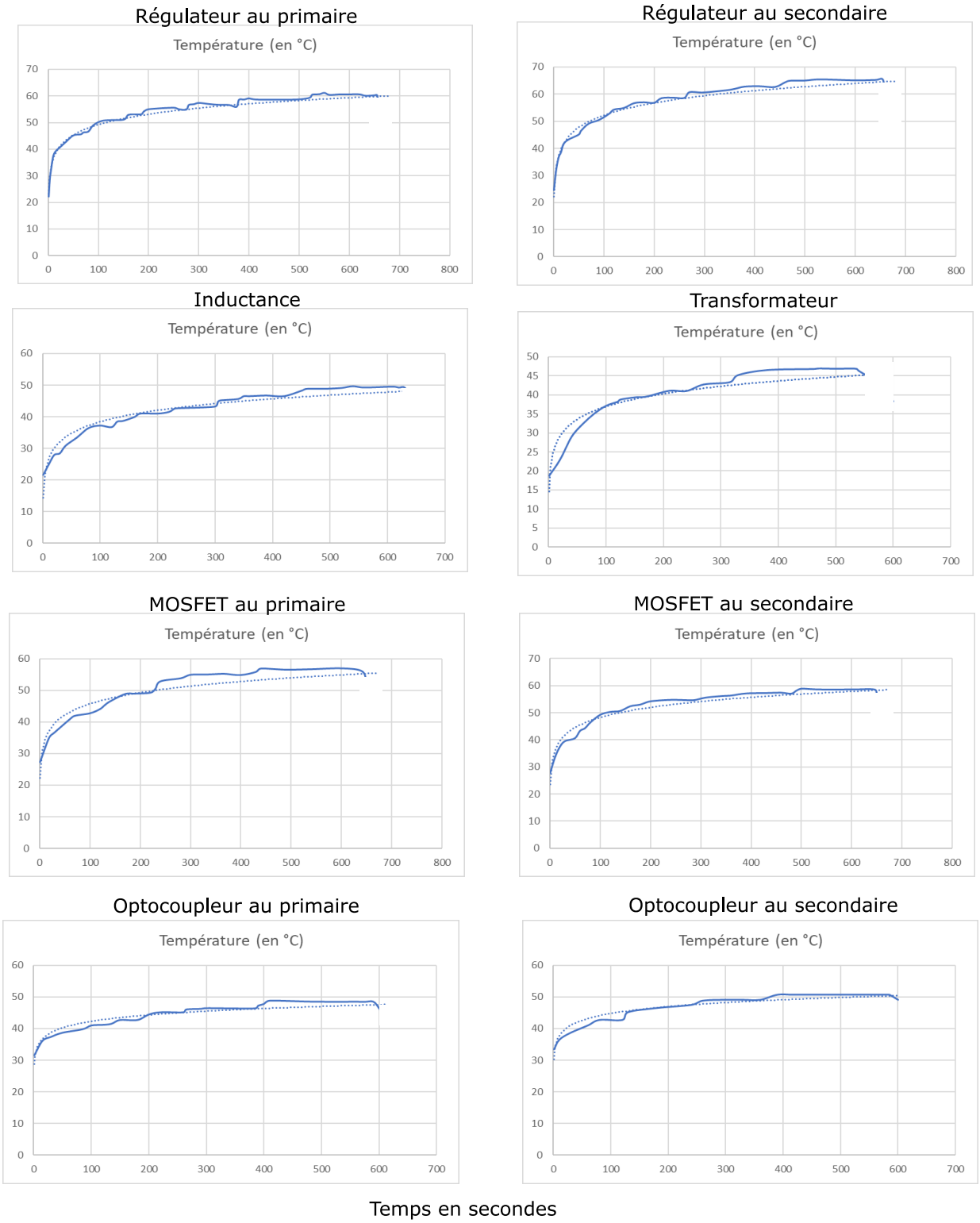


Figure 74 : A gauche l'évolution de la température du régulateur de tension en fonction du temps sous différents points de fonctionnement, à droite l'évolution de la température de l'inductance en fonction du temps pour différents échelons de pertes produits par différents points de fonctionnement

Selon l'application il sera plus judicieux de prendre le **3xmin(τ), 3xmax(τ)** ou le triple de la valeur moyenne de **τ** comme pas de calcul pour l'algorithme de suivi de l'état de santé. Comme l'algorithme du suivi de santé est basé sur l'approximation de la température, il devrait donc fonctionner le mieux avec un pas de calcul lié à l'inertie thermique.

Une fois les mesures obtenues par les capteurs, le microcontrôleur calcule le stress comme expliqué dans la partie précédente. Il met à peu près 3195 cycles d'horloge pour approximer la température et calculer le stress au temps t présent, et 1830 cycles d'horloge pour réaliser l'intégrale et l'accumulation des stress pour obtenir le stress final. Ce qui donne respectivement 79,87µs et 48µs. Ce qui est bien dessous du pas de calcul qui est aux alentours de [1min,10min]

Les variables intermédiaires comme la température des composants à l'instant t et le stress à l'instant sont sauvegardées en RAM au fur et à mesure du calcul. De plus, il est important de sauvegarder en ROM la valeur du stress final en cas de coupure de courant. Le PIC utilisé dans ce cas d'étude n'a pas de mémoire EEPROM, nous avons donc utilisé la mémoire où est stocké le programme sur le PIC. Cette procédure ajoute du temps de développement puisqu'elle impose de reprogrammer une fonction de sauvegarde en langage assembleur. Mais il est possible dans d'autres convertisseurs d'avoir d'autres technologie de microprocesseur et de mémoire. Les technologies de mémoires mortes existantes sont toutes limitées en écriture, la dernière génération en développement promet une capacité d'écriture de 100 millions de fois comme le montre le tableau 19 ci-dessous.

Tableau 19 : les différents types de mémoire.

Types de mémoire	Définition	Nombres d'écritures
ROM *(Read only memory)*	Le contenu est établi à la fabrication	1
PROM *(Programmable read only memory)*	Programmable une seule fois par l'utilisateur	1
EPROM *(erasable programmable read only memory)*	Effaçable et programmable par l'utilisateur	100 000 écritures
UVPROM *(Ultra-violet programmable read only memory)*	Effaçable à l'aide de rayon ultraviolet, nécessite donc de la retirer de son circuit hôte	100 000 écritures
Flash EEPROM *(flash electrically erasable read only memory)*	Plus faciles à effacer que les EPROM, effaçable grâce à des impulsions électriques	10 000 écritures
FRAM *(ferroelectric RAM)*	Basée sur la technologie DRAM avec une couche ferroélectrique pour obtenir la non volatilité des données	100 millions d'écritures

Les cases de mémoire flash du PIC ne peuvent supporter que 10000 écritures avant d'être endommagée (cf. la datasheet du dsPIC33FJ64GS610), ce qui pose la question des limites du suivi de l'état de santé au niveau de la possibilité de stockage des données au fur et à mesure.

Une solution peut être de changer de case de mémoire au fur et à mesure du calcul. Toutefois, les premières cases mémoire étant occupées par le programme de contrôle, il s'agit de prendre une sécurité de quelques cases pour éviter de récrire dessus.

Par exemple, si on venait à calculer le stress accumulé toutes les 10 minutes, une seule case mémoire peut être utilisée 56 jours toute les 8000 écritures sachant que la mémoire flash a 168 cases mémoire de disponible ce qui nous permet un stockage du stress accumulé pendant 24 ans. Ce temps dépend donc du pas de calcul. La trame de données stockée inclus le stress final pour chaque composant, le temps écoulé depuis l'allumage, le numéro de la case mémoire et le nombre d'écritures pour une case mémoire. La figure 75 ci-dessous résume toutes les étapes du monitoring ainsi que les périphériques mis en œuvre pour le cas d'étude.

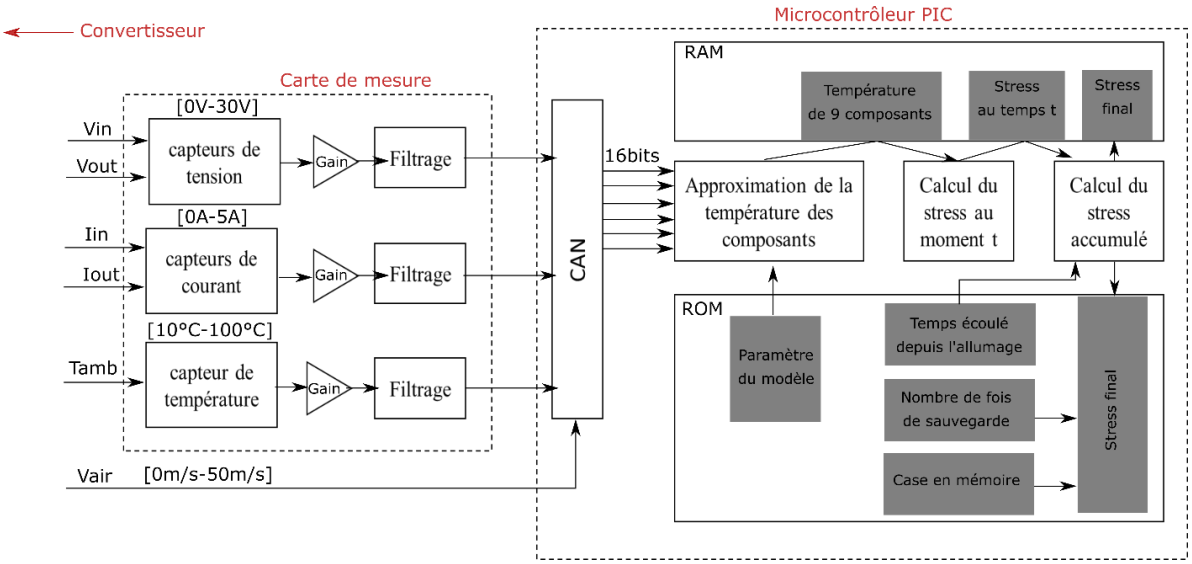


Figure 75 : Schéma de synthèse des étapes du monitoring mettant en jeu la carte de mesure et le microcontrôleur PIC.

La méthode de suivi de l'état de santé des composants commence tout d'abord par la mesure des tensions et des courants d'entrée et sortie, de la température ambiante et de la vitesse de l'air par des capteurs existants et communs dans plusieurs convertisseurs commerciaux, les signaux mesurés sont filtrés, rendus propre au traitement et convertis en données numériques pour être traités par le microprocesseur.

Le microprocesseur stocke dans sa mémoire ROM les paramètres du modèle d'estimation de la température pour chaque composant. Ce qui permet d'approximer la température de chaque composant selon les variables d'entrées.

Ces températures approximées sont stockées dans la RAM afin de les utiliser par la suite dans le calcul du stress thermique à cet instant de la vie du convertisseur. Finalement le stress à l'instant t est cumulé au stress vécu auparavant pour arriver au stress final accumulé qui affine l'estimation de la durée de vie restante de chaque composant.

Quand une panne a lieu, il faut être capable de récupérer ce stress final et la case mémoire où ce dernier est stocké. Ces données sont stockées dans la ROM. Mémoriser la case de stockage permet de réutiliser le microprocesseur correctement et d'éviter de stocker les données dans des cases mémoires déjà endommagées par des écritures excessives répétées.

4.2. Résultats et analyse

Le cas d'étude a pu révéler des verrous technologiques pour le suivi de l'état de santé des composants, ces verrous sont liés au microprocesseur du contrôle du convertisseur.

L'ajout de l'algorithme de suivi de l'état de santé n'affecte pas le bon fonctionnement du contrôle du convertisseur. Cependant le choix du pas de calcul peut mettre en exergue une limite physique des mémoires mortes des microprocesseurs. Le vieillissement des mémoires dû aux environnements défavorables réduisent le temps de non volatilité de l'information (les fuites sont accélérées par les températures élevées ou les radiations). Les PROM sont limitées par leur nombre d'écriture ; parce qu'elles sont écrites en forçant les électrons à traverser une couche d'isolant électrique pour atteindre une grille de transistors, les ROM programmables ne peuvent supporter qu'un nombre limité de cycles d'écriture et d'effacement avant que l'isolant ne soit définitivement endommagé.

En revanche, en réduisant le pas d'échantillonnage, on introduit une erreur d'estimation de la MTBF si le pas de calcul sous-échantillonne le profil de mission réel. Les graphiques ci-dessous montrent cela, le premier illustre la durée de vie fonctionnelle de la mémoire avant consommation totale des cases mémoires par rapport au pas de calcul. Le deuxième graphique présente l'erreur d'estimation de la MTBF par rapport au pas de calcul (l'erreur entre la MTBF considérant le pas de passage d'état réel et la MTBF considérant un pas de calcul plus élevé).

$$Précision = 1 - \frac{\left|MTBF_{pas\ réel} - MTBF_{sous\ échantillonée}\right|}{MTBF_{pas\ réel}} \qquad (3.20)$$

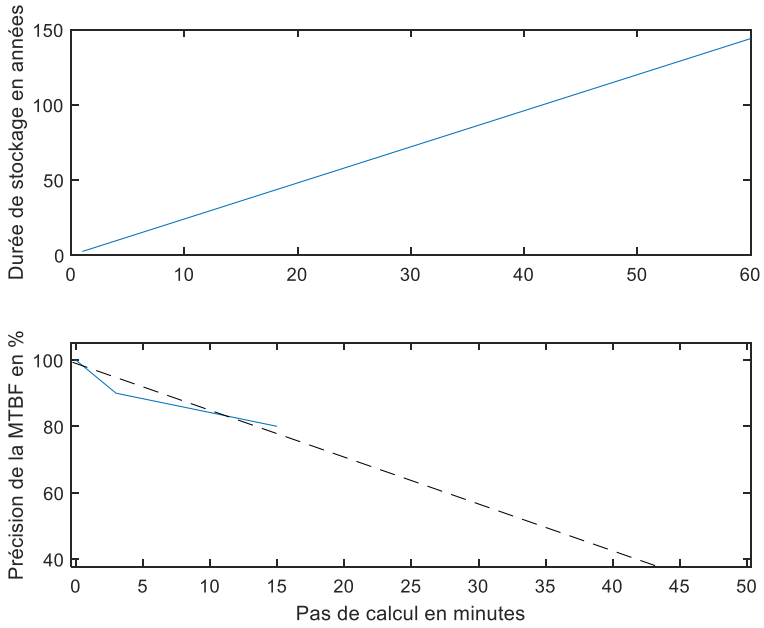


Figure 76 : En haut la durée de stockage mémoire possible en années par rapport au pas de calcul, en bas l'erreur d'estimation de la MTBF par rapport à celle faites avec le pas de changement de phase réel.

La durée de vie de la mémoire est plus élevée quand la durée entre deux estimations du stress est plus élevée. Cependant l'erreur augmente avec l'augmentation du pas de calcul. Il existe donc un optimum qui dépend des besoins en précision. Si on considère trois fois le minimum entre composant de la constante thermique comme un pas de calcul, la mémoire pourra stocker la MTBF pendant à peu près 8 ans avec une précision de 90%.

Le nombre possible d'écriture en case mémoire étant relatif aux avancées technologiques fait que le choix du pas de calcul le sera aussi.

5. Conclusion

Pour conclure, la valeur résiduelle a été définie dans le chapitre 1, en indiquant les paramètres clés de son évaluation. On a vu que le paramètre important influençant l'estimation de la valeur résiduelle est la durée de vie restante. C'est pour cela qu'un algorithme de prédiction de la durée de vie restante, basé sur la prédiction de la température dans les composants, a été proposé dans ce chapitre et illustré dans un cas d'étude. Cette étude a été réalisée dans le but de déterminer la valeur résiduelle d'un composant en vue de sa réutilisation même après la défaillance du convertisseur le mettant en œuvre. Seul un suivi en temps réel de sa vie fonctionnelle permet d'estimer la durée de vie résiduelle potentielle réelle. Cette estimation est une base pour garantir un fonctionnement normal de ce composant s'il est réutilisé dans un système similaire.

Pour réintroduire ces composants dans d'autres convertisseurs similaires ou les vendre sur un marché existant de composants d'occasion, les convertisseurs doivent être standardisés, en ce qui concerne leur constituant et les processus de démontage/assemblage engagés. Car les modèles de l'algorithme de suivi de l'état de santé sont basés sur une modélisation au préalable du convertisseur.
Comme les BMS des batteries qui suivent constamment le SOH, on pourrait introduire le concept de « Système de suivi du convertisseur » (SSC) intégré au convertisseur et qui permettrait d'estimer la durée de vie restante des composants de ce dernier. Dans le cas de notre étude le SSC est un algorithme directement implémenté dans le microcontrôleur de contrôle du convertisseur et utilisant les organes de mesures déjà existants dans le convertisseur.
Comme pour le SOH, l'indicateur de la durée de vie résiduelle peut permettre de garantir une possible réutilisation du composant pour la même fonction. Connaitre la durée de vie restante ou l'état de vieillissement du composant pourrait aussi permettre d'obtenir la valeur des paramètres électriques des composants à ce moment-là de leurs vies et la dispersion de ces valeurs et ainsi savoir dans quelle application/topologie/architecture de convertisseurs sera-t-il possible de réintroduire le composant.
Les perspectives de ce travail incluent l'amélioration de la proposition du modèle de durée de vie restante en considérant l'impact des processus de réparation dans l'estimation de la durée de vie. Car en plus d'induire des dysfonctionnements mécatroniques, les processus de désassemblage, d'extraction, de logistique induisent une accélération du vieillissement dans le temps qui n'est pas géré par le SCC puisque le convertisseur n'est pas en marche.

Conclusion générale de la thèse

Le cycle de vie des dispositifs électriques est décrit dans cette recherche à travers trois étapes principales :

- La première étant l'étape de production : incluant l'extraction des matières premières, la fabrication des composants, l'assemblage du système et les diverses logistiques associées.

- Deuxièmement, l'étape d'utilisation : incluant le temps d'utilisation du dispositif, les procédures de maintenance et de réparation, pour des réutilisations multiples, ainsi que la logistique associée.

- Enfin, l'étape de la fin de vie du dispositif, qui ne concerne pas nécessairement tous ses composants : elle comprend la collecte, le tri, le démontage et la remise en état ou le recyclage, l'incinération ou la mise en décharge, ainsi que la logistique associée.

Au cours de sa durée de vie, le convertisseur se dégrade. Chaque composant vieillit différemment à des vitesses différentes. Ainsi, au sein du système, de nombreux sous-systèmes ont des valeurs résiduelles différentes lorsque l'ensemble du convertisseur se brise. Il est donc nécessaire de détecter la valeur résiduelle de chaque sous-système ou composant pour envisager de les sauver du flux de déchets et de recycler leur utilisation. La valeur résiduelle d'un composant électronique est la valeur restante de ce composant après un certain temps d'utilisation dans certaines conditions. Elle représente sa capacité à continuer à remplir ses tâches et ses principales caractéristiques. Cette valeur diminue généralement en fonction du temps d'utilisation, car le composant vieillit et ses propriétés électriques et matérielles se dégradent. Toutefois, en cas de rareté de l'approvisionnement, elle peut augmenter.

Cependant, la valeur fonctionnelle ne doit pas seulement être basée sur une estimation des coûts. La valeur d'un dispositif n'est pas statique comme une garantie à vie, un certain nombre de facteurs contribuent à la hausse ou à la baisse de la valeur résiduelle d'un composant, par exemple

- Le taux de réutilisation : une valeur empirique obtenue à partir d'expériences de réparation ; elle indique le nombre de fois que les composants peuvent être successivement réutilisés, conférant une valeur élevée pour les phases d'utilisation suivantes, ce taux doit intégrer la valeur fonctionnelle dans sa complexité inhérente.

- L'empreinte environnementale et le coût des processus de réutilisation : un indicateur théorique composé d'un système de notation qui regroupe trois autres critères - le nombre d'outils de démontage utilisés, le temps passé et l'énergie consommée en plus des estimations de l'empreinte environnementale.

- RLT : est la durée de vie restante. Le composant voit sa valeur sauvegardée si sa durée de vie restante l’est aussi.

Cette valeur résiduelle devrait être calculée pendant la phase de diagnostic juste après la " dernière " utilisation et devrait aider les fabricants à décider si l'appareil vaut la peine d'être remis à neuf ou non. La valeur fonctionnelle résiduelle n'est pas une valeur économique ; c'est un indicateur d'aide à la décision pour le tri de l'état de santé des composants. La valeur

économique pourrait être calculée à partir de la valeur résiduelle en ajoutant les coûts des processus suivants et les marges prises par les acteurs de la remise à neuf concernés.

Les méthodes existantes de surveillance de l'état des composants pour des raisons de sécurité sont soit basées sur des modèles, soit basées sur des capteurs. La méthode proposée dans cet article consiste à surveiller la valeur résiduelle en contrôlant la durée de vie restante au niveau des composants et des sous-systèmes. Cette surveillance est effectuée à l'aide d'un mélange de méthodes basées sur des modèles de défaillances FIDES et de méthodes expérimentales basées sur des capteurs obtenus par capture d'images thermiques IR. FIDES est un guide pour effectuer des calculs de fiabilité prédictifs pour les composants et systèmes électroniques avec des modèles empiriques. Cette complémentarité des méthodes et des modèles devrait permettre d'améliorer la précision des modèles théoriques, rendant possible l'ajustement de la valeur résiduelle fonctionnelle de tout composant.

Cette recherche vise à contribuer à cet objectif : développer, sur des équipements existants, une connaissance et une expertise supérieures, telles que des indicateurs spécifiques à l'électronique de puissance qui seraient ajoutés aux indicateurs des stratégies de circularité développés aujourd'hui pour cibler la durabilité circulaire.

Cette thèse contribue à une meilleure évaluation de la valeur fonctionnelle résiduelle des systèmes basés sur l'électronique de puissance.

Le chapitre 1 décrit une fonction de valeur résiduelle générique, dépendant de plusieurs paramètres, dont le temps moyen entre défaillances (MTBF). Cette proposition de quantification s’inspire d’autres domaines tel que l’automobile. Le but de quantifier la valeur résiduelle est d’assister les acteurs à la décision en fin d’usage pendant la phase de diagnostic en cas de panne du convertisseur.

Le chapitre 2 propose une contribution de méthode d’estimation du taux de réutilisation de quelques composants passifs dans le but de quantifier l’impact des processus de démontage des composants sur la durée de vie des composants. Un protocole expérimental basé sur les essais de vieillissement accéléré permet d’obtenir des tendances de vieillissement selon le nombre de cyclage au four à refusion. Les résultats obtenus pour le transformateur sont un début de preuve de la possibilité de pouvoir réutiliser les composants les plus robustes encore plus que ce qui est indiqué sur la fiche technique du composant. Les composants « fragiles » tel que les condensateurs électrolytiques voient leurs caractéristiques se dégrader rapidement après seulement quelques passages au four à refusion. Il reste donc difficile avec les moyens actuels de réutiliser les condensateurs.

Le chapitre 3 propose une méthode d'estimation de la MTBF "en temps réel" adaptée aux convertisseurs de puissance standards. La méthode commence par un travail de collecte de données en température en amont. Dans le cas d’étude de ces travaux de thèse, cette collecte est issue de l’expérimentation en amont de l’utilisation du convertisseur avec une caméra thermique et un banc de test pour recréer des conditions d’utilisation réelles. Ensuite il s’agit de construire des modèles statistiques grâce aux données collectées. Dans le cas de ces travaux de thèse, les modèles statistiques fondés sur les données collectées, seront aussi associés à des résultats empiriques et à des modèles de fiabilité de FIDES. Et finalement le concepteur peut intégrer la méthode de calcul des modèles de fiabilité améliorés dans le microcontrôleur du convertisseur. Ceci permet de développer un suivi de la durée de vie restante de chaque

composant alimenté par la mesure des points de fonctionnement du convertisseur. Avec cette approche dite « embarquée », l'évolution de l'état de santé se fera au fil du temps et sera accessible en permanence via une interrogation au niveau du microcontrôleur.

Toutes ces études développées pendant la thèse contribue au diagnostic des composants d'un convertisseur pour leurs réutilisations et nous rapproche petit à petit d'une réalité de réutilisation des composants dans un contexte industriel.

Perspectives

Les travaux expliqués dans ce manuscrit sont un début de réflexion plus large sur la circularité en électronique de puissance. Les perspectives du chapitre 1 est la continuation d'une étude plus approfondie de la théorie de la valeur en électronique de puissance, puis combiner cela à des protocoles expérimentaux d'économie expérimentale et des expériences d'études comportementalistes du marché de l'occasion.

Le chapitre 2 tente un début de démonstration de la possibilité de réutiliser quelques composants, ce travail doit être mené pour tous les composants pour ainsi créer une base de donnée permettant la décision de désassembler ou pas le composant selon son état.

Le chapitre 3 décrit une méthode originale de suivi de l'état de santé des convertisseurs de puissance, cette méthode doit être validé par des essais accélérés de vieillissement et un retour d'expérience de terrain après usage de la méthode. Cela devrait permettre de montrer les limites de cette méthode mais aussi l'intérêt de son utilisation.

D'un point de vue plus général, les réflexions étudiées durant la thèse ont mené à plusieurs autres pistes d'études dans le domaine de la circularité en électronique de puissance. Ces travaux ont montré le potentiel de l'application de l'écoconception aux méthodes de conception classiques de convertisseur. Un projet ANR « VIVAE » porté par le G2Elab, Gscop, I2M et deux industriels a suivi les premiers résultats de la thèse pour élargir les ambitions de recherche dans ce domaine.

Ce projet est divisé en plusieurs missions « Work package » qui constituent en quelques sortes les perspectives de mes travaux de thèse :

- Etudier plus en détail les conceptions de convertisseurs « standards » et « modulaires », les limites de ces pratiques et leurs impacts sur la sauvegarde la valeur fonctionnelle du convertisseur après son premier usage.
- Identifier les acteurs de la chaine de valeur en fin de vie et en fin d'usage du convertisseur pour augmenter la cohésion entre ces derniers et intégrer davantage des critères de circularité dans leurs pratiques.
- Développements des technologies pour faciliter la circularité, la réparation et la seconde vie : Cela peut passer par l'automatisation des moyens de diagnostic et de désassemblage des composants dans un convertisseur mais aussi par la création de consignes de conception intégrant les contraintes de désassemblage.
- Confronter les nouvelles idées d'écoconception aux méthodes classiques de conception pour s'inscrire dans un cadre industriel est réaliste.

Références

- **Références du chapitre 1 :**

[1] STEFFEN, Will, SANDERSON, Regina Angelina, TYSON, Peter D., et al. Global change and the earth system: a planet under pressure. Springer Science & Business Media, 2006

[2] DIEDEREN, A. M. Metal minerals scarcity: A call for managed austerity and the elements of hope. TNO Defence, Security and Safety, 2009, p. 2.

[3] Rockström, J., W. Steffen, K. Noone, Å. Persson, F. S. Chapin, III, E. Lambin, T. M. Lenton, M. Scheffer, C. Folke, H. Schellnhuber, B. Nykvist, C. A. De Wit, T. Hughes, S. van der Leeuw, H. Rodhe, S. Sörlin, P. K. Snyder, R. Costanza, U. Svedin, M. Falkenmark, L. Karlberg, R. W. Corell, V. J. Fabry, J. Hansen, B. Walker, D. Liverman, K. Richardson, P. Crutzen, and J. Foley. 2009. Planetary boundaries:exploring the safe operating space for humanity. Ecology and Society 14(2): 32

[4] VENN, Fiona. The oil crisis. Routledge, 2016.

[5] LENTON, Timothy M., ROCKSTRÖM, Johan, GAFFNEY, Owen, et al. Climate tipping points—too risky to bet against. 2019.

[6] SACHS, Jeffrey, KROLL, Christian, LAFORTUNE, Guillame, et al. Sustainable development report 2022. Cambridge University Press, 2022.

[7] VIDALENC, Eric, BERGEY, Jean-Louis, QUINIOU, Valérie, et al. Quatre scénarios pour la transition écologique. Futuribles, 2022, vol. 448, no 3, p. 5-21.

[8] Rapport RTE octobre 2021, Futurs énergétiques 2050

[9] Rapport ADEME, Transitions 2050 choisir maintenant agir pour le climat

[10] A Statistical Analysis and Model of the Residual Value of Different Types of Heavy Construction Equipment

[11] Nicolas N. Treich. La valeur de la vie humaine en économie. Futuribles, Association Futuribles, 2015, 404. ⟨hal-02641593⟩

[12] USHER, Dan. An imputation to the measure of economic growth for changes in life expectancy. In : The measurement of economic and social performance. NBER, 1973. p. 193-232.

[13] T.L., and G.M. Perry.“Depreciation Patterns for Agricultural Machinery.”Amer. J. Agr. Econ.77(Feb. 1995):194–204.

[14]- Véhicule d'occasion (définition fiscale) [archive] - Service-public.fr

[15] Le marché de l'automobile d'occasion rembraye [archive] « Copie archivée » (version du 22 avril 2012 sur l'Internet Archive) - Emmanuel Egloff, Le Figaro, 21 avril 2011

[16] Surendra M. Gupta, Aşkıner Güngör, Kannan Govindan, Eren Özceylan, Can Berk Kalaycı, Rajesh Piplani. (2020) Responsible & sustainable manufacturing. International Journal of Production Research 58:23, pages 7181-7182.

[17] Feltham, Gerald A., and James A. Ohlson. "Uncertainty Resolution and the Theory of Depreciation Measurement." Journal of Accounting Research, vol. 34, no. 2, 1996, pp. 209–34. JSTOR, https://doi.org/10.2307/2491500. Accessed 13 Jul. 2022

[18] Junmin Wan, Qiqi Qiu. (2022) Depreciation Rate by Industrial Sector and Profit after Tax in China. The Chinese Economy 55:2, pages 111-128.

[19] Boiteux, M. (1956). L'amortissement dépréciation des automobiles. Revue de statistique appliquée, 4(4), 57-73.

[20] Cote Argus RENAULT Kangoo, la valeur de référence - L'argus (largus.fr)

[21] BETTS, Stephen C. et TARAN, Zinaida. A test of prospect theory in the used car market: The non-linear effects of age and reliability on price. Academy of Marketing Studies Journal, 2006, vol. 10, no 2, p. 57.

[22] https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/asmb.1911

[23] Disparities in public charging infrastructure deployment and inequitable electric vehicle ownership cost based on income and race.

[24] SHAFIULLA, B. Marketing Strategies of Car Makers in the Pre-Owned Car Market in India. Indian Journal of Marketing, 2012, vol. 42, no 2, p. 8-16.

[25] PRADO, Sylvain M., et al. The European used-car market at a glance: Hedonic resale price valuation in automotive leasing industry. Economics Bulletin, 2009, vol. 29, no 3, p. 2086-2099.

[26] SENTENAC-CHEMIN, Elodie et LANTZ, Frédéric. ANALYSE DES TENDANCES ETDES RUPTURES SURLE MARCHE AUTOMOBILE FRANCAIS.

[27] LÖHE, Jan et LEGNER, Christine. Assessment of SOA potentials in B2B networks-concept and application to German used car distribution networks. BLED 2009 Proceedings, 2009, p. 22.

[28] https://www.certificat-air.gouv.fr voir les certificats vignettes Crit'Air

[29] Second-life EV batteries: The newest value pool in energy storage by Hauke Engel, Patrick Hertzke, and Giulia Siccard

[30] A novel framework to operationalise value-pluralism in environmental valuation: Environmental value functions

[31] Value uncaptured perspective for sustainable business model innovation

[32] RIVERA-BARRERA, Juan Pablo, MUÑOZ-GALEANO, Nicolás, et SARMIENTO-MALDONADO, Henry Omar. SoC estimation for lithium-ion batteries: Review and future challenges. Electronics, 2017, vol. 6, no 4, p. 102.

[33] ZHANG, Caiping, JIANG, Jiuchun, ZHANG, Linjing, et al. A generalized SOC-OCV model for lithium-ion batteries and the SOC estimation for LNMCO battery. Energies, 2016, vol. 9, no 11, p. 900.

[34] HOW, Dickson NT, HANNAN, M. A., LIPU, MS Hossain, et al. State of charge estimation for lithium-ion batteries using model-based and data-driven methods: A review. Ieee Access, 2019, vol. 7, p. 136116-136136.

[35] DAI, Haifeng, SUN, Zechang, et WEI, Xuezhe. Online SOC estimation of high-power lithium-ion batteries used on HEVs. In : 2006 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety. IEEE, 2006. p. 342-347.

[36] WINDARKO, Novie Ayub et CHOI, Jae-Ho. SOC estimation based on OCV for NiMH batteries using an improved takacs model. Journal of Power Electronics, 2010, vol. 10, no 2, p. 181-186.

[37] MENG, Jinhao, RICCO, Mattia, LUO, Guangzhao, et al. An overview and comparison of online implementable SOC estimation methods for lithium-ion battery. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, vol. 54, no 2, p. 1583-1591.

[38] FATHONI, Ghufron, WIDAYAT, Sigit Agung, TOPAN, Paris Ali, et al. Comparison of State-of-Charge (SOC) estimation performance based on three popular methods: Coulomb counting, open circuit voltage, and Kalman filter. In : 2017 2nd International Conference on Automation, Cognitive Science, Optics, Micro Electro-Mechanical System, and Information Technology (ICACOMIT). IEEE, 2017. p. 70-74.

[39] SPAGNOL, Pierfrancesco, ROSSI, Stefano, et SAVARESI, Sergio M. Kalman filter SoC estimation for Li-ion batteries. In : 2011 IEEE International Conference on Control Applications (CCA). IEEE, 2011. p. 587-592.

[40] PILLER, Sabine, PERRIN, Marion, et JOSSEN, Andreas. Methods for state-of-charge determination and their applications. Journal of power sources, 2001, vol. 96, no 1, p. 113-120.

[41] CORON, Eddy. Diagnostic d'état de santé des batteries au lithium utilisées dans les véhicules électriques et destinées à des applications en seconde vie. 2021. Thèse de doctorat. Université Grenoble Alpes [2020-....].

[42] Beverungen, Daniel; Klör, Benjamin; Bräuer, Sebastian; and Monhof, Markus, "Will They Die Another Day? A Decision Support Perspective on Reusing Electric Vehicle Batteries" (2015). ECIS 2015 Research-in-Progress Papers. Paper 36. ISBN 978-3-00-050284-2

[43] Second Life-Batteries As Flexible Storage For Renewables Energies

[44] CHENG, Ka Wai Eric, DIVAKAR, B. P., WU, Hongjie, et al. Battery-management system (BMS) and SOC development for electrical vehicles. IEEE transactions on vehicular technology, 2010, vol. 60, no 1, p. 76-88.

[45] https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/c6199b83-a368-4853-8bed-bc678404221e

[46] MONTOYA-BEDOYA, Simon, SABOGAL-MONCADA, Laura A., GARCIA-TAMAYO, Esteban, et al. A circular economy of electrochemical energy storage systems:

Critical review of SOH/RUL estimation methods for second-life batteries. Green Energy and Environment, 2020, vol. 10.

[47] SERZHENA, Tcyrempilova. The circular economy on South Korea. The case of Samsung. Hungarian Agricultural Engineering, 2019, vol. 36, p. 75-80.

[48] DAVIS, Nathan T., HOOMAAN, Ehssan, AGRAWAL, Anil K., et al. Foundation reuse in accelerated bridge construction. Journal of Bridge Engineering, 2019, vol. 24, no 10, p. 05019010.

[49] O'NEILL, John. The varieties of intrinsic value. The Monist, 1992, vol. 75, no 2, p. 119-137.

[50] JOHNSON, M. R. et WANG, M. H_. Economical evaluation of disassembly operations for recycling, remanufacturing and reuse. International Journal of Production Research, 1998, vol. 36, no 12, p. 3227-3252.

[51] ERICSEN, Terry, HINGORANI, Narain, et KHERSONSKY, Yuri. PEBB-power electronics building blocks from concept to reality. In : 2006 Record of Conference Papers-IEEE Industry Applications Society 53rd Annual Petroleum and Chemical Industry Conference. IEEE, 2006. p. 1-7.

[52] L. Solero, V. Serrao, P. Taglioni and F. Crescimbini, "Low-voltage power electronics building block for automotive applications," Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC '06., 2006, pp. 7 pp.-, doi: 10.1109/APEC.2006.1620605.

[53] L. Solero, V. Serrao, P. Taglioni and F. Crescimbini, "Low-voltage power electronics building block for automotive applications," Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC '06., 2006, pp. 7 pp.-, doi: 10.1109/APEC.2006.1620605.

[54] ABILDGAARD, Elisabeth N. et MOLINAS, Marta. Modelling and control of the modular multilevel converter (MMC). Energy Procedia, 2012, vol. 20, p. 227-236.

[55] Wang, Y.; Aksoz, A.; Geury, T.; Ozturk, S.B.; Kivanc, O.C.; Hegazy, O. A Review of Modular Multilevel Converters for Stationary Applications. Appl. Sci. 2020, 10, 7719. https://doi.org/10.3390/app10217719

[56] Kerachev, L., Andreta, A., Lembeye, Y., & Crebier, J. C. (2017, May). A new step towards the power electronics design automation. In PCIM Europe 2017; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (pp. 1-8). VDE.

[57] Kerachev, Lyubomir, et al. "Generic approach for design, configuration and control of modular converters." PCIM Europe 2017; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. VDE, 2017.

[58] Théo Lamorelle. Contribution à la conception et la production automatique en électronique de puissance via les réseaux de convertisseurs

[59] A. Andreta, « Automatic Design for Manufacturing in Power Electronics Based on Power Converter Arrays », phdthesis, Université Grenoble Alpes, 2019

- **Références du chapitre 2 :**

[1] HANNAN, M. A., LIPU, MS Hossain, KER, Pin Jern, *et al*. Power electronics contribution to renewable energy conversion addressing emission reduction: Applications, issues, and recommendations. *Applied energy*, 2019, vol. 251, p. 113404.

[2] CHENG, Xiang, HU, Xiaoya, YANG, Liuqing, *et al*. Electrified vehicles and the smart grid: The ITS perspective. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, vol. 15, no 4, p. 1388-1404.

[3] BOSE, Bimal K. Global energy scenario and impact of power electronics in 21st century. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, vol. 60, no 7, p. 2638-2651.

[4] HAWKES, Alan G. A bivariate exponential distribution with applications to reliability. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 1972, p. 129-131.

[5] MCCOOL, John I. *Using the Weibull distribution: reliability, modeling, and inference*. John Wiley & Sons, 2012.

[6] BALASOORIYA, Uditha et BALAKRISHNAN, N. Reliability sampling plans for lognormal distribution, based on progressively-censored samples. *IEEE Transactions on Reliability*, 2000, vol. 49, no 2, p. 199-203.

[7] CHEN, Zhe, GUERRERO, Josep M., et BLAABJERG, Frede. A review of the state of the art of power electronics for wind turbines. *IEEE Transactions on power electronics*, 2009, vol. 24, no 8, p. 1859-1875.

[8] MATISSE, Georges. La loi d'ARRHENIUS contre la regle du coefficient de temperature. Archives Internationales de Physiologie, 1921, vol. 16, no 1-4, p. 461-466.

[9] LALL, Pradeep, SHIRGAOKAR, Aniket, et ARUNACHALAM, Dinesh. Norris–Landzberg Acceleration Factors and Goldmann Constants for SAC305 Lead-Free Electronics. Journal of Electronic Packaging, 2012, vol. 134, no 3, p. 031008.

[10] SCHUBERT, A., DUDEK, R., AUERSWALD, E., et al. Fatigue life models for SnAgCu and SnPb solder joints evaluated by experiments and simulation. In : Electronic components and technology conference. IEEE; 1999, 2003. p. 603-610.

[11] PECK, D. Stewart. Comprehensive model for humidity testing correlation. In : 24th International Reliability Physics Symposium. IEEE, 1986. p. 44-50.

[12] D'ANTUONO, Pietro. An analytical relation between the Weibull and Basquin laws for smooth and notched specimens and application to constant amplitude fatigue. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2020, vol. 43, no 5, p. 991-1004.

[13] TEKRONY, Dennis M. Accelerated aging test: principles and procedures. Seed Technology, 2005, p. 135-146.

[14] VAN DE WALLE, G. Integration of passive components: An introduction. Philips journal of research, 1998, vol. 51, no 3, p. 353-361.

[15] CHARLES JR, Harry K. Miniaturized electronics. *Johns Hopkins APL technical digest*, 2005, vol. 26, no 4, p. 402-413.

[16] KOTADIA, Hiren R., HOWES, Philip D., et MANNAN, Samjid H. A review: On the development of low melting temperature Pb-free solders. *Microelectronics Reliability*, 2014, vol. 54, no 6-7, p. 1253-1273.

[17] Abeliotis, K.; Boikou, K.; Chroni, C.; Kalafata, K.; Angelakopoulos, H.; Lasaridi, K. WEEE Preparing for Reuse in Greece: Potential and Initiatives. Waste Biomass Valorization 2021, 12, 2959–2968

[18] les acteurs de la chaine de valeur de la réparation

[19] Laitala, K.; Klepp, I.G.; Haugrønning, V.; Throne-Holst, H.; Strandbakken, P. Increasing repair of household appliances, mobile phones and clothing: Experiences from consumers and the repair industry. J. Clean. Prod. 2021, 282, 125349.

[20] GEYER, Roland et DOCTORI BLASS, Vered. The economics of cell phone reuse and recycling. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, vol. 47, no 5, p. 515-525.

[21] McCollough, J. The effect of income growth on the mix of purchases between disposable goods and reusable goods. Int. J. Consum. Stud. 2007, 31, 213–219

[22] Wieser, H.; Tröger, N. Exploring the inner loops of the circular economy: Replacement, repair, and reuse of mobile phones in Austria. J. Clean. Prod. 2018, 172, 3042–3055.

[23] RIO, Maud, KHANNOUSSI, Khawla, CREBIER, Jean-Christophe, et al. Addressing Circularity to Product Designers: Application to a Multi-Cell Power Electronics Converter. Procedia CIRP, 2020, vol. 91, p. 134-139.

[24] Boubakr Rahmani, Yves Lembeye, Maud Rio, Jean-Christophe Crebier. Analysis of Passive Power Components Reuse. *PCIM Europe digital days (International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management Proceedings)*, May 2021, berlin (on line), Germany. pp.956-963.

[25] Europäisches Parlament. Europäischer Rat Verordnung (EU) 2019/2022 der Kommission vom 1. Oktober 2019 zur Festlegung von Ökodesign-Anforderungen an Haushaltsgeschirrspüler gemäßder Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1275/2008 de 2019; Amtsblatt der Europäischen Union: Brussels, Belgium, 2019.

[26] MILOVANTSEVA, Natalia et FITZPATRICK, Colin. Barriers to electronics reuse of transboundary e-waste shipment regulations: An evaluation based on industry experiences. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, vol. 102, p. 170-177.

[27] FLETCHER, Desmond et GU, Pingping. Adaptable design for design reuse. *Proceedings of the Canadian Engineering Education Association (CEEA)*, 2005.

[28] MUSALLAM, Mahera, YIN, Chunyan, BAILEY, Christopher, *et al.* Mission profile-based reliability design and real-time life consumption estimation in power electronics. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, vol. 30, no 5, p. 2601-2613.

[29] ZHOU, Dao, WANG, Huai, et BLAABJERG, Frede. Mission profile based system-level reliability analysis of DC/DC converters for a backup power application. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, vol. 33, no 9, p. 8030-8039.

[30] SABBAGHI, Mostafa, CADE, Willie, BEHDAD, Sara, *et al.* The current status of the consumer electronics repair industry in the US: A survey-based study. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, vol. 116, p. 137-151.

[31] MEYYAPPAN, Karumbu, MCALLISTER, Alan, KOCHANOWSKI, Mike, *et al.* Effects of glue on the bend performance of flip chip packages. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2008, vol. 31, no 3, p. 670-677.

[32] Home - robot-hub.org

[33] STOUKATCH, Serguei, VAESEN, Kristof, MENG, Ho Hong, *et al.* Mixed assembly on PCB of wide variety components (MCM-D, SMDs, bare dies) using wire bonding and SMT. In : *52nd Electronic Components and Technology Conference 2002.(Cat. No. 02CH37345)*. IEEE, 2002. p. 1671-1674.

[34] JUDD, Mike et BRINDLEY, Keith. *Soldering in electronics assembly*. Elsevier, 1999.

[35] GARG, Akhil, ZHOU, Lin, ZHENG, Jun, et al. Qualitative framework based on intelligent robotics for safe and efficient disassembly of battery modules for recycling purposes. In : IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2020. p. 012159.

[36] SHNAWAH, Dhafer Abdulameer, SABRI, Mohd Faizul Mohd, et BADRUDDIN, Irfan Anjum. A review on thermal cycling and drop impact reliability of SAC solder joint in portable electronic products. *Microelectronics reliability*, 2012, vol. 52, no 1, p. 90-99.

[37] TUNGA, Krishna, PYLAND, James, PUCHA, Raghuram V., et al. Study on the choice of constitutive and fatigue models in solder joint life prediction. In : ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. 2002. p. 329-335.

[38] MARIN, J. J. et POLLARD, R. W. Experience report on the FIDES reliability prediction method. In : Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2005. Proceedings. IEEE, 2005. p. 8-13.

[39] WANG, Huai et BLAABJERG, Frede. Power electronics reliability: State of the art and outlook. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2020.

[40] L. M. Moore et H. N. Post, « Five years of operating experience at a large, utility-scale photovoltaic generating plant », Prog. Photovolt. Res. Appl., vol. 16, n o 3, p. 249–259, 2008.

[41] U. Choi, S. Member, F. Blaabjerg, K. Lee, et S. Member, « Study and Handling Methods of Power IGBT Module Failures in Power Electronic Converter Systems », IEEE Trans. Power Electron.,vol. 30, n o 5, p. 2517-2533, 2015.

[42] P. Venet, A. Lahyani, G. Grellet, et A. Ah-Jaco, « Influence of aging on electrolytic capacitors function in static converters: Fault prediction method », Eur. Phys. J. Appl. Phys., vol. 5, n o 1, p.71-83, janv. 1999.

[43] A. Komatsu et T. Ogawara, « Electrolytic solution for electrolytic capacitor and electrolytic capacitor using the same », sept-2001.

[44] M. Ouhab, « Estimation de durée de vie restante de modules de puissance en fonctionnement dans des convertisseurs industriels », PhD Thesis, Paris Saclay, 2017.

[45] M. L. Gasperi, « Life prediction model for aluminum electrolytic capacitors », in , Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference, 1996. Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS '96, 1996, vol. 3, p. 1347-1351 vol.3, doi: 10.1109/IAS.1996.559241.

[46] J. Renwick, C. S. Kulkarni, et J. R. Celaya, « Analysis of electrolytic capacitor degradation under electrical overstress for prognostic studies », in Proceedings of the Annual conference of the prognostics and health management society, 2015.

[47] EL HAYEK, Antoine. *Analyse de vieillissement, estimation de la durée de vie et méthode de surveillance de l'état de santé des condensateurs électrolytiques*. 2020. Thèse de doctorat. Université de Lyon.

[48] JOUBERT, Charles. Etude des phénomènes électromagnétiques dans les condensateurs à films métallisés-Nouvelle génération de condensateurs. 1996. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lyon. [49] R. Jano et D. Pitica, « Accelerated ageing tests of aluminum electrolytic capacitors for evaluating lifetime prediction models », Acta Tech. Napoc., vol. 53, n o 2, p. 36, 2012.

[50] P. Venet, F. Perisse, M. H. El-Husseini, et G. Rojat, « Realization of a smart electrolytic capacitor circuit », IEEE Ind. Appl. Mag., vol. 8, n o 1, p. 16-20, janv. 2002, doi: 10.1109/2943.974353.

[51] P. Venet, « Amélioration de la sûreté de fonctionnement des dispositifs de stockage d'énergie », thesis, Université Claude Bernard - Lyon I, 2007.

[52] Y. Yu, T. Zhou, M. Zhu, et D. Xu, « Fault diagnosis and life prediction of dc-link aluminum electrolytic capacitors used in three-phase ac/dc/ac converters », in 2012 Second International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control, 2012, p.825–830

[53] J. Renwick, C. S. Kulkarni, et J. R. Celaya, « Analysis of electrolytic capacitor degradation under electrical overstress for prognostic studies », in Proceedings of the Annual conference of the prognostics and health management society, 2015

[54] I.-I. E. Commission, « IEC 60068-1 », 2013

[55] Series catalog (panasonic.com)

[56] CRÉBIER, Jean-Christophe, PHUNG, Thanh-Hai, NGUYEN, Van-Sang, et al. DC-AC Isolated Power Converter Array. Focus on Differential Mode Conducted EMI. Electronics, 2019, vol. 8, no 9, p. 999.

[57] CATHEY, Leconte et JOYNER, Keith A. Investigation of the Dissipation Process in Electrolytic Capacitors. Electrocomponent Science and Technology, 1980, vol. 6, no 2, p. 49-53.

[58] 120 W PoE SMT Planar Transformers for Active Clamp Forward Topology | Coilcraft

[59] ANDRETA, André, LAVADO VILLA, Luiz Fernando, LEMBEYE, Yves, et al. A novel automated design methodology for power electronics converters. Electronics, 2021, vol. 10, no 3, p. 271.

[60] WANG, Yongqiang, FENG, Changhui, FEI, Ruoyu, et al. Thermal-ageing characteristics of dry-type transformer epoxy composite insulation. High Performance Polymers, 2020, vol. 32, no 7, p. 741-752.

[61] MUTHANNA, Kshira T., SARKAR, Abhinanda, DAS, Kaushik, *et al.* Transformer insulation life assessment. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, vol. 21, no 1, p. 150-156.

[62] CHRISTINA, AJa, SALAM, M. A., RAHMAN, Q. M., *et al.* Causes of transformer failures and diagnostic methods–A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 82, p. 1442-1456.

[63] SHEN, Zhan, WANG, Qian, et WANG, Huai. Degradation analysis of planar magnetics. In : *2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. IEEE, 2020. p. 2687-2693.

[64] LEBEY, Thierry. Les décharges partielles dans le diagnostic des systèmes électriques. *J3eA*, 2005, vol. 4, p. 003.

[65] AUGE, J.-L., LESAINT, Olivier, et THI, AT Vu. Partial discharges in ceramic substrates embedded in liquids and gels. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2013, vol. 20, no 1, p. 262-274.

[66] DX Engineering DXE-RPA-1 DX Engineering RPA-1 Receive Preamplifiers | DX Engineering

[67] Modes d'emploi (pdix.com)

[68] M. Donners, “Fracture of mnzn ferrites,” PhD dissertation, Eindhoven, The Netherlands: Technische Universiteit Eindhoven, 1999, pp. 1377–1388.

[69] M. de Graaf, L. Dortmans, and A. Shpilman, “Mechanical reliability of ferrite cores used in inductive components,” in Proc. :Elec. Electron. Insul. Conf. Elec. Manufacturing Coil Winding Conf, Sep. 1995,pp. 485–488.

[70] Z. Chun, “A study of polyimide thin films-physical aging and plasticization behaviors,” PhD dissertation, Singapore: National University of Singapore, 2003.

[71] S. Murray, C. Hillman, and M. Pecht, “Environmental aging and deadhesion of polyimide dielectric films,” J. Electron. Packag., vol. 126, no. 3, pp. 390–397, 2004.

[72] IEC 60076-12:2008 - European Standards (en-standard.eu)

- **Références du chapitre 3 :**

[1] PECHT, Michael, TUCHBAND, Brian, VICHARE, Nikhil, et al. Prognostics and health monitoring of electronics. In : 2007 International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation Experiments in Microelectronics and Micro-Systems. EuroSime 2007. ieee, 2007. p. 1-8.

[2] Ding, Y.; Loh, P.C.; Tan, K.K.; Wang, P.; Gao, F. Reliability evaluation of three-level inverters. In Proceedings of the 25th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Palm Springs, CA, USA, 21–25 February 2010; pp. 1555–1560

[3] Alam, M.K.; Khan, F.H. Reliability analysis and performance degradation of a boost converter. In Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Denver, CO, USA, 15–19 September 2013; pp. 5592–5597.

[4] Li, D.; Li, X. Study of degradation in switching mode power supply based on the theory of PoF. In Proceedings of the International Conference Computing Science and Service Systems, Nanjing, China, 11–13 August 2012; pp. 1976–1980.

[5] Jiang, N.; Zhang, L.; Liu, Z.Q.; Sun, L.; Long, W.M.; He, P.; Xiong, M.Y.; Zhao, M. Reliability issues of lead-free solder joints in electronic devices. Sci. Technol. Adv. Mater. 2019, 20, 876–901

[6] Susinni, G.; Rizzo, S.A.;Iannuzzo, F. Two Decades of Condition Monitoring Methods for

Power Devices. Electronics 2021, 10,683. https://doi.org/10.3390/ electronics10060683

[7] AGARWAL, Mridul, PAUL, Bipul C., ZHANG, Ming, et al. Circuit failure prediction and its application to transistor aging. In : 25th IEEE VLSI Test Symposium (VTS'07). IEEE, 2007. p. 277-286.

[8] Parsley, M. The use of thermochromics liquid crystals in research applications, thermal mapping and non-destructive testing. In

[9] Brekel, W.; Duetemeyer, T.; Puk, G.; Schilling, O. Time Resolved in situ Tvj Measurements of 6.5 kV IGBTs during Inverter Operation. In Proceedings of the PCIM Europe 2009: International Exhibition & Conference for Power Electronics Intelligent Motion Power Quality, Nurember, Germany, 12–14 May 2009

[10] Motto, E.R.; Donlon, J.F. IGBT module with user accessible on-chip current and temperature sensors. In Proceedings of the Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Orlando, FL, USA, 5–9 February 2012; pp. 176–181.

[11] Ka, I.; Avenas, Y.; Dupont, L.; Vafaei, R.; Thollin, B.; Crebier, J.C.; Petit, M. Instrumented chip dedicated to semiconductor temperature measurements in power electronic converters. In Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Milwaukee, WI, USA, 18–22 September 2016; pp. 1–8.

[12] Jasperneite, J.; Sauter, T.; Wollschlaeger, M. Why We Need Automation Models: Handling Complexity in Industry 4.0 and the Internet of Things. IEEE Ind. Electron. Mag. 2020, 14, 29–40

[13] Cheraghi, M.; Karimi, M.; Booin, M.B. An investigation on acoustic noise emitted by induction motors due to magnetic sources. In Proceedings of the 9th Annual Power Electronics, Drives Systems and Technologies Conference (PEDSTC), Tehran, Iran, 13–15 February 2018; pp. 104–109.

[14] Luo, H.; Wang, X.; Zhu, C.; Li, W.; He, X. Investigation and emulation of junction temperature for high-power IGBT modules considering grid codes. IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron. 2018, 6, 930–940

[15] Hunger, T.; Schilling, O. Numerical investigation on thermal crosstalk of silicon dies in high voltage IGBT modules. In Proceedings of the PCIM International Exhibition & Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Power Quality, Nuremberg, Germany, 27–29 May 2008.

[16] Ceccarelli, L.; Luo, H.; Iannuzzo, F. Investigating SiC MOSFET body diode's light emission as temperature-sensitive electrical parameter. Microelectron. Reliab. 2018, 88–90, 627–630

[17] HE, Yunze, LI, Mengchuan, MENG, Zhiqiang, et al. An overview of acoustic emission inspection and monitoring technology in the key components of renewable energy systems. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, vol. 148, p. 107146.

[18] K. Fischer et al., "Field-Experience Based Root-Cause Analysis of PowerConverter Failure in Wind Turbines," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 5, pp. 2481-2492, May 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2361733

[19] PEYGHAMI, Saeed, PALENSKY, Peter, et BLAABJERG, Frede. An overview on the reliability of modern power electronic based power systems. IEEE Open Journal of Power Electronics, 2020, vol. 1, p. 34-50.

[20] https://www.fides-reliability.org/en/node/610

[21] Susinni G, Rizzo SA, Iannuzzo F. Two Decades of Condition Monitoring Methods for Power Devices. Electronics. 2021; 10(6):683. https://doi.org/10.3390/electronics10060683.

[22] EVERTS, Jordi, KRISMER, Florian, VAN DEN KEYBUS, Jeroen, et al. Optimal ZVS modulation of single-phase single-stage bidirectional DAB AC–DC converters. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, vol. 29, no 8, p. 3954-3970.

[23] ANDRETA, Andre G., LAMORELLE, Theo, LEMBEYE, Yves, et al. A high efficiency and power density, high step-up, non-isolated DC-DC converter based on multicell approach. In : CIPS 2018; 10th International Conference on Integrated Power Electronics Systems. VDE, 2018. p. 1-5.

[24] DE FREITAS LIMA, Glauber, LEMBEYE, Yves, NDAGIJIMANA, Fabien, et al. Modeling of a DAB under phase-shift modulation for design and DM input current filter optimization. In : 2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe). IEEE, 2020. p. P. 1-P. 10.

[25] KAUZLARICH, J. J. The Palmgren-Miner rule derived. In : Tribology Series. Elsevier, 1989. p. 175-179.

[26] BELKHEIRI, Rachel Ares et ZURBUCH, Kevin. EXPLOITATION DE DONNEES DE RETOURS D'EXPERIENCE MULTI-INDUSTRIELS POUR LA CONSOLIDATION DES MODELES FIDES. In : QUALITA2013. 2013.

Annexes

- **La conception traditionnelle en EP**

La fonction principale de l'électronique de puissance est de traiter et de contrôler le flux de l'énergie électrique en fournissant des tensions et des courants sous une forme (amplitude, fréquence, phase) qui convient de manière optimale aux charges de l'utilisateur.

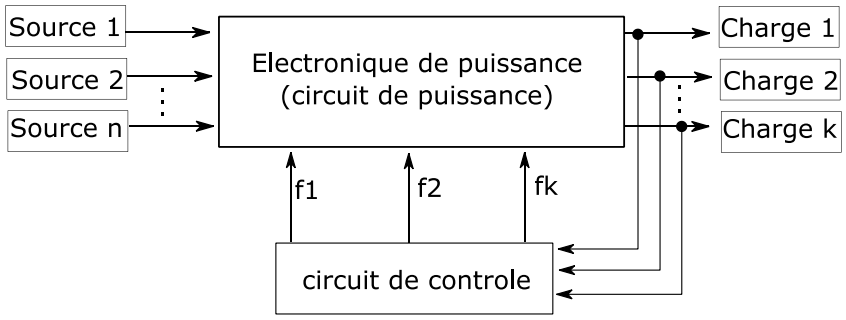


Fig. 5. Un système d'électronique de puissance vulgarisé, fi sont les consignes du contrôle

Cependant, un convertisseur de puissance présente plusieurs sous-fonctions additionnelles permettant de répondre à la fonction principale et permettant le bon fonctionnement de ce dernier. La conception consiste donc à choisir parmi différents composants, assemblages de composants ou technologies afin de dimensionner le système fonctionnel envisagé. Ainsi, le concepteur fait des choix permettant de proposer des solutions de conception correspondant aux sous-fonctions demandées.

Il n'existe pas encore d'outil ou de protocole universellement accepté et établi pour l'analyse de la conception des circuits de puissance et des circuits de commande de l'électronique de puissance. Les méthodes de conception sont diverses, car les solutions permettant de répondre à une sous-fonction sont diverses et offrent différents avantages.

Les parties suivantes décrivent les étapes de conception d'un système d'électronique de puissance et les différents acteurs entrants en jeu.

- **L'analyse des spécifications**

Comme pour n'importe quel système, le client ou l'utilisateur établit un cahier des charges traduisant ses besoins et explicitant ses contraintes. Ce cahier des charges est repris par le concepteur d'électronique de puissance pour formuler les règles de conception en plus des règles existantes qui seront traitées tout le long de la conception par des spécialistes de chaque besoin fonctionnel exprimé par le client.

Les exigences du client peuvent être divisées en 3 grandes parties :

- **Spécifications générales :** elles relèvent de toutes les normes et standards dont l'usage est rendu obligatoire dans les systèmes électriques et électroniques ; ces normes sont souvent liées à l'applicatif (par exemple les normes liées aux systèmes électriques dans

les navires diffèrent de celles que l'on retrouve dans les onduleurs pour une application de photovoltaïque domestique).

Ces exigences peuvent être de natures différentes comme illustré avec une description non exhaustive (deuxième colonne) et des exemples dans le tableau ci-dessous :

Exigences	**Description non exhaustive**	**Exemples**
Environ-nementales	- Éviter les substances toxiques, interdites en Europe - les exigences environnementales relatives au pays d'utilisation	RoHS, REACH
Électriques	- exigence de qualité de l'énergie - prise en compte des surcharges - tension et courant nominaux …	Normes du réseau électrique (NF C 14-100, NF C 15-100, ...) ; Exigences liées à la source et la charge …
Protectrices	- sans danger pour les humains et les animaux - sans danger pour les appareils environnants …	- Mise à la terre, blindage, Normes IEC 60364, NF C 15-100 …

- **Spécifications de conception** : elles relèvent de toutes les exigences dimensionnelles liées principalement à la manufacture du convertisseur, elles peuvent aussi être divisées en 3 grandes familles :

Exigences	**Description non exhaustive**	**Exemples**
Physiques	-dimensions, formes, volumes, masse, …	Les limites de masse/ volume pour des convertisseurs embarqués dans des systèmes à tracter
De fiabilité	- maintenabilité ; - s'adapter aux limites des contraintes chimiques/thermiques et mécaniques ambiantes ; - Séparabilité, isolation, …	Résister aux vibrations dans les véhicules électriques, à l'humidité dans les systèmes marins…
D'industri alisation	- Durée, contraintes et coûts d'usinage ; - Disponibilité des composants et du savoir-faire au sein de l'entreprise, …	Prise en compte de la fluctuation des coûts des matériaux et composants au niveau international …

- **Spécifications de performance :** ces exigences peuvent être imposées par l'application ou par le client et/ou l'utilisateur et concernent l'usage du produit.

Exigences	**Description non exhaustive**	**Exemples**
Liées à l'application	- Le rendement énergétique ; - La densité de puissance ; - Durée de la tenue aux surintensités ; - Plage de puissance de fonctionnement ; - Performances CEM (Compatibilité électromagnétique) - L'interopérabilité, l'adaptabilité ;	Les systèmes photovoltaïques imposent un certain niveau de rendement (ex. : européen).

Liées aux besoins de l'utilisateur	- Interface Homme Machine répondant à des exigences d'usage et d'ergonomie ; - Esthétique du boîtier, encombrement, masse, réparabilité, démontabilité, etc.	Une application téléphonique connectée au contrôleur du convertisseur…

L'ensemble de ces exigences est intégré par le concepteur qui dimensionne des solutions technologiques adaptées aux niveaux de contraintes imposées par le cahier des charges, puis conçoit un prototype qui sera caractérisé et testé pour vérifier le bon respect de ces contraintes. La démarche de conception est itérative afin de converger vers une solution satisfaisante (compromis multi-critère). La mesure de la performance des choix de conception permet d'optimiser le convertisseur selon les fonctions prioritaires et les contraintes imposées.

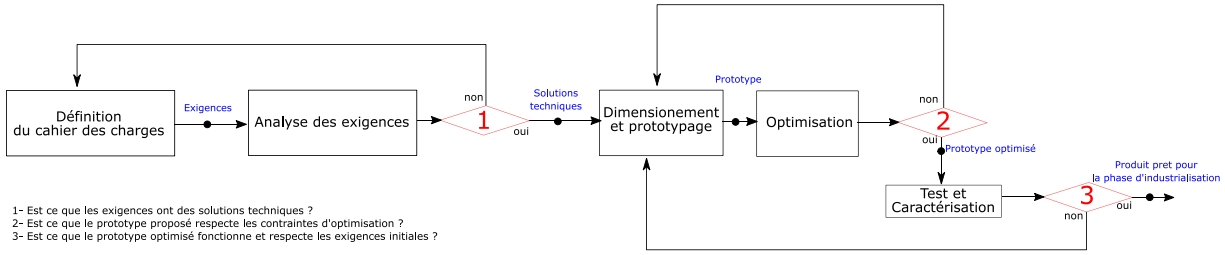


Fig. 6. Les premières étapes de conception d'un produit en EP : de la définition du cahier des charges fonctionnell à la conception préliminaire et détaillée

Le processus traditionnel de conception en EP met en priorité le rendement (énergétique), la densité de puissance et le coût (économique) du convertisseur de puissance. Les solutions et les choix techniques ont un impact direct sur ces trois paramètres.

L'optimisation des prototypes porte sur les pertes énergétiques des différents composants (rendement énergétique) et de leurs tailles (densité de puissance). Le tableau ci-dessous résume les objectifs de conception en électronique de puissance, les paramètres variables sur lesquels le concepteur peut agir et les différentes contraintes qui limitent ses actions.

Objectifs	**Variables de conception essentielles**		**Contraintes de conception**
Densité de puissance ($W \cdot m^{-3}$)	Choix de la topologie et de la stratégie de commande		Spécifications générales
	Choix des composants	Choix des composants actifs (Vin, f, Rdson…)	
		Choix des composants passifs (L, C…)	
		Choix de la connectique (Irms,f…)	
Coût ($, €)	Choix de la fréquence de commutation, …		Spécifications de conception
Rendement énergétique	Choix du système de protection		Spécifications de performance
	Choix du système de refroidissement		
	Choix de la stratégie de contrôle		

Dans la figure 2 après l'analyse des spécifications, le concepteur commence le dimensionnement du convertisseur. Ces choix de dimensionnement pour créer un prototype se font dans une certaine chronologie, il n'existe pas de chronologie universelle, mais il existe cependant des bonnes pratiques recommandées par IEEE (Institute of electrical and electronics engineers) et dans.

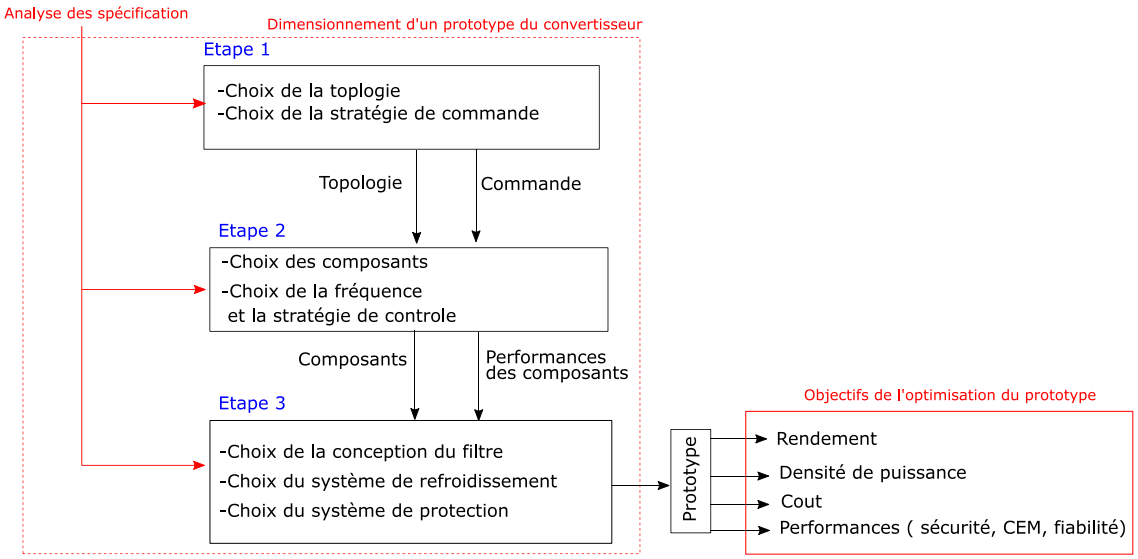


Fig. 7. Les principales étapes de dimensionnement d'un convertisseur de puissance

- **Étape 1 :** Les systèmes d'électroniques de puissance s'adressent à une fonction, le concepteur peut d'ores et déjà choisir des topologies, des architectures et des stratégies de commande typiques pour ce genre d'application, comme présenté dans le tableau ci-dessous.

L'application du convertisseur	Topologie typique
Convertisseur de fréquence (AC) (AC/AC)	Cyclo convertisseur, convertisseur matriciel, convertisseur back to back AC/DC/AC (redresseur avec onduleur), Thyristors.
Redresseur AC (AC/DC)	Diode ou thyristors, Redresseur de courant/tension.
Onduleur DC (DC/AC)	Convertisseur de source de tension ou de courant.
Convertisseur DC (DC/DC)	Pont ou push-pull résonant ou pas, isolé ou pas en PWM
Commutateur de transfert statique	Pont de diodes, Triac, Thyristor
Filtre actif de puissance	Convertisseur de source de tension ou de courant, peut-être connecté en shunt ou en série
Variateurs de fréquence	Onduleur à source de tension (VSI - pour l'onduleur, ou VSI avec redresseur à diode pour AC/AC)
…	…

Le concepteur choisit aussi la stratégie de commande à tous les niveaux, au niveau composant pour l'ouverture et la fermeture des interrupteurs, le contrôle des capteurs (courant, tension …), les protections contre les courts-circuits, etc., mais aussi au niveau système, dans ce cas il s'agit de variations plus lentes comme une mission de charge et décharge de batterie ou une synchronisation avec la fréquence du réseau. Tout cela doit être pensé avant pour constituer les dispositifs et les ressources nécessaires à sa réalisation.

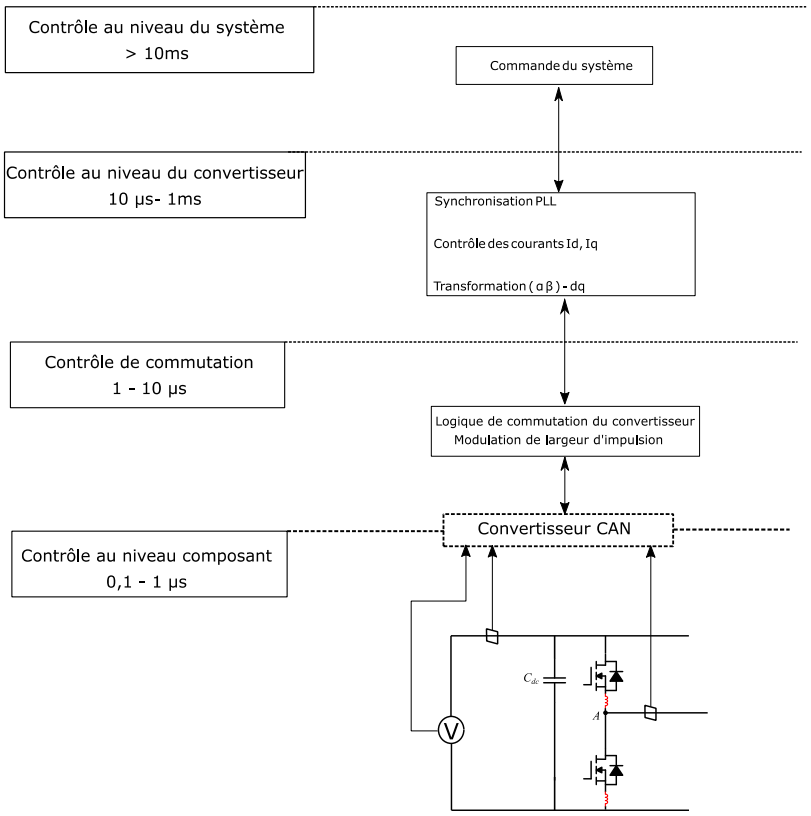


Fig. 8. Les niveaux de commande du convertisseur dans son application

- **Étape 2 :** choisir parmi les composants, les dispositifs et les matériaux selon les critères d'optimalité (coût, rendement, fiabilité, volume, masse …) ; des compromis sur les composants apparaissent nécessaires pour déterminer le convertisseur optimal.
  Par exemple pour réduire la taille des composants passifs, les concepteurs ont souvent recourt à l'augmentation de la fréquence de découpage des interrupteurs, cependant, cette solution se heurte à des limites pratiques de réalisation quand la puissance dépasse les dizaines de kW. L'augmentation de la fréquence implique aussi l'utilisation de matériaux magnétiques adaptés à la haute fréquence et des condensateurs les plus performants résonnant au-delà du MHz. D'autres effets deviennent plus importants tel l'effet de peau et de proximité au niveau des conducteurs.
  En somme, dans l'organe de conversion qui inclue les composants passifs et actifs et le *gate drive (cf. section ci-après)* un compromis doit être atteint. Cela passe par le choix des semi-conducteurs à utiliser, la fréquence de découpage, des matériaux des composants passifs, le type de technologie et le niveau d'intégration.

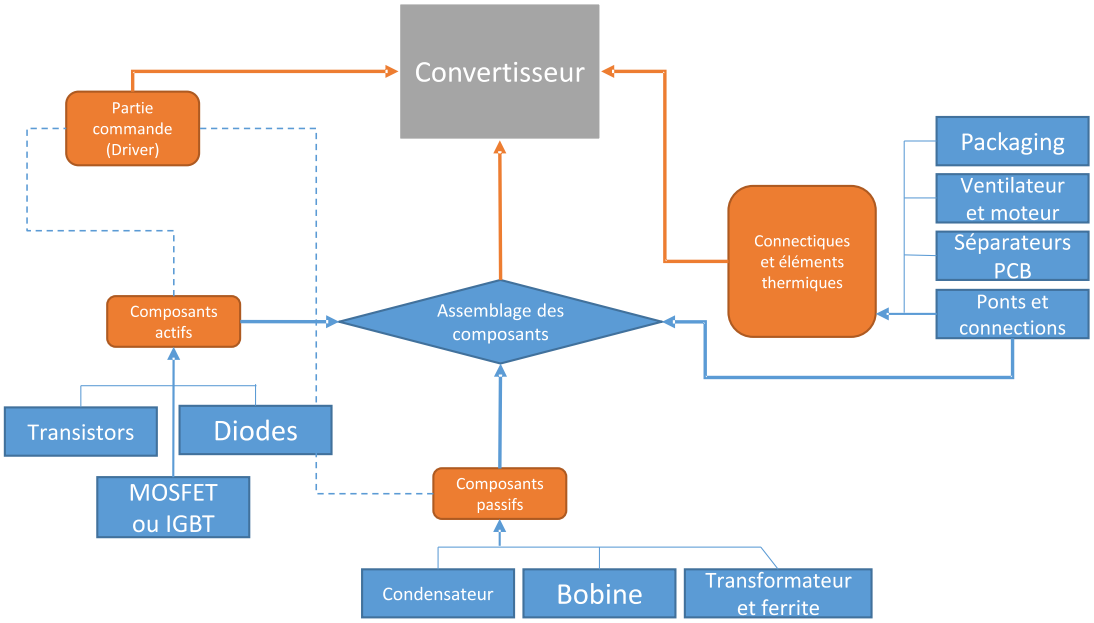


Fig. 9. Les différents composants de l'organe principal de conversion d'un convertisseur de puissance

Dans le processus de dimensionnement juste avant l'optimisation des performances du convertisseur, les facteurs importants sont les éléments passifs, actifs et le niveau d'intégration souhaité.

- **Les éléments actifs :** le dimensionnement des interrupteurs peut se faire grâce à la connaissance des pertes dans les semi-conducteurs, elles impactent directement et indirectement les performances du convertisseur en coût, masse et fiabilité … La masse des éléments passifs est concentrée majoritairement dans les filtres ou les dissipateurs thermiques par exemple. La fréquence de fonctionnement des transistors détermine indirectement les dimensions des éléments passifs. Le concepteur a donc besoin de quantifier les pertes dans ces composants. Une manière de le faire est d'extrapoler les modèles à disposition donnés par les notices des fabricants ou de créer des modèles analytiques alimentés par des informations de la fiche technique tels que la transconductance ou les capacités parasites … Les simulations et l'expérimentation par des mesures de pertes de commutation peuvent être conduites pour observer l'évolution des variables et construire ainsi des modèles analytiques plus précis, car ces mesures sont effectuées sur le transistor dans sa cellule de commutation et donc reflètent réellement les pertes réelles contrairement aux modèles donnés par le fabricant du composant.
- **Les éléments passifs :** représentent 50% en moyenne de la masse du convertisseur complet, ainsi, répondre à quelques critères du cahier des charges passe par un bon choix des composants passifs et les matériaux associés. On retrouve dans cette catégorie : des inductances, des transformateurs, des coupleurs, des condensateurs.
  Dans la catégorie des objets magnétiques, les composants peuvent être dissociés en noyau magnétique et en bobinage. Le premier est dimensionné en fonction du champ d'induction et de ses pertes tandis que le deuxième est dimensionné en fonction des pertes des conducteurs ainsi que des limites physiques intrinsèques aux matériaux

comme la température de Curie pour le noyau et la température maximale des isolants pour les conducteurs.

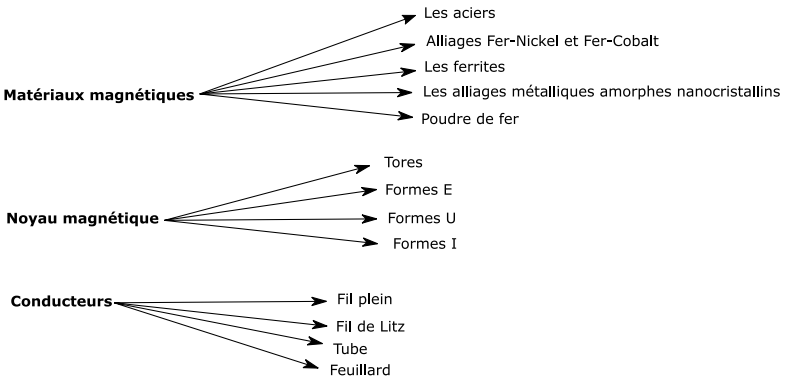


Fig. 10. Illustration des différents matériaux, conceptions et « technologies » pour les objets magnétiques

Parmi les matériaux magnétiques, quelques-uns sont plus adéquats pour des utilisations à haute fréquence ou d'autres applications. Le choix des noyaux magnétiques se fait par le calcul du niveau d'induction, les pertes et l'évitement de la saturation magnétique.

L'autre catégorie des composants passifs est les condensateurs. Ce composant est très sensible à la fréquence de découpage, car cela affecte directement la résistance et l'inductance série équivalente ESR. Sans être exhaustif, il existe trois grandes familles de condensateurs (céramiques, électrolytique et de type condensateurs film), ainsi que des supercondensateurs et des capacités variables :

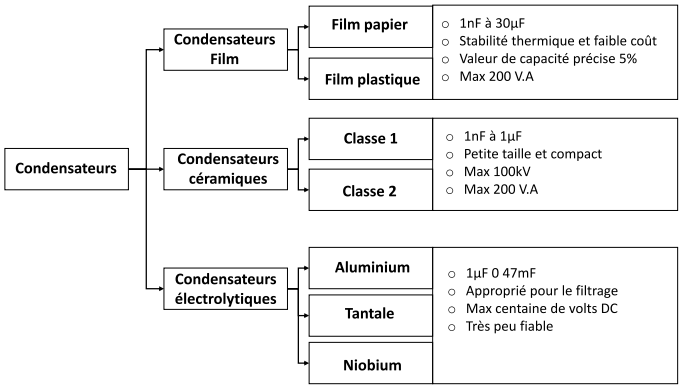


Fig. 11. Les différents matériaux et technologies des familles principales de condensateurs, avec leurs caractéristiques fonctionnelles principales

Selon les contraintes de valeurs de capacités, de l'ondulation, de la tension et du courant ou de la stabilité fréquentielle et thermique, le concepteur peut choisir de favoriser un type de condensateur plutôt qu'un autre.

- **Les niveaux d'intégration :** Est la quantité de fonction contenu dans une même puce électronique. Le développement d'interrupteur à large bande interdite implique une commutation plus rapide, une température de fonctionnement plus élevée et une résistance à l'état passant plus faible. Les conséquences principales sont la miniaturisation, la multiplication des problèmes parasites CEM et l'élévation locale de la température. C'est

ce qui pousse certains concepteurs à intégrer davantage leurs composants pour limiter les inductances parasites dans les boîtiers, les câblages et les pistes et éliminer des causes de défaillances comme la soudure par exemple. Certains concepteurs peuvent aller à un niveau d'intégration très élevé, ou les composants actifs, passifs et la commande rapprochée partage le même substrat et boîtier, les modules de puissance sont un exemple de l'intégration des cellules de commutation avec leur commande rapprochée et des systèmes de monitoring et de protection thermiques.

Pour résumer la deuxième étape de dimensionnement des composants mène à la réalisation d'un prototype. Le concepteur a un choix très large de composants par famille de composant. Il doit dans le cadre dans son application construire des modèles analytiques de ses choix de composants pour modéliser les pertes et les performances thermiques. Le concepteur doit tester s'il le faut dans des conditions expérimentales sur des bancs de test, ces pertes et performances pour s'assurer des niveaux de fonctionnement des choix de composants intégrés dans le convertisseur complet, et ainsi valider son choix. Le schéma ci-dessous résume ce processus de validation de composants menant à la troisième partie du processus de conception qui s'intéresse aux autres organes vitaux d'un convertisseur (le filtrage, la protection et le refroidissement).

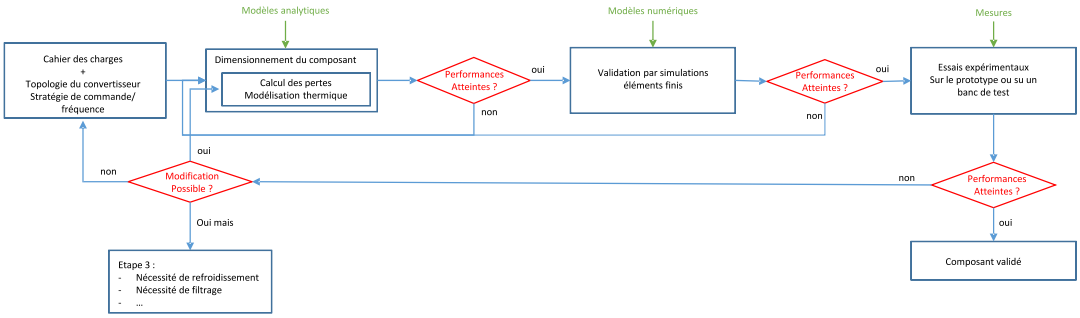


Fig. 12. Processus de conception relatif aux étapes de dimensionnement et de validation des composants par le concepteur, dans une application de convertisseur imposée dans le cahier des charges

- **Étape 3 :** traite de l'organe de conversion c'est-à-dire de la cellule de commutation, des éléments passifs de stockage et d'isolation ainsi que du driver et de la commande rapprochée. Cependant l'organe de conversion ne peut fonctionner correctement et avec fiabilité, que si les autres organes complètent le convertisseur. Le dimensionnement de ces parties doit s'effectuer après celui de la cellule de commutation, car leurs performances dépendent directement des choix antérieurs de la fréquence de commutation, de la valeur de l'inductance, ou encore de la technologie d'interrupteurs choisis.

  - **L'organe de filtrage :** est nécessaire pour la CEM en raison des perturbations conduites et rayonnées créées par la commutation en haute fréquence et du routage du convertisseur. Il existe des normes CEM qui établissent des gabarits fréquentiels en émission conduite et en émission rayonnée définissant les atténuations nécessaires des harmoniques et la fréquence de coupure du filtre pour atténuer cette harmonique.

Les normes sont indispensables pour le dimensionnement du filtre, mais d'autres critères s'ajoutent pour un meilleur fonctionnement tels que la stabilité et le dépassement de la tension lors de l'échelon de charge et décharge.

- **L'organe de refroidissement :** au stade de la deuxième étape, le concepteur a une valeur théorique du rendement de sa topologie avec le dimensionnement de ses composants dû aux pertes générées au sein du convertisseur. Ces pertes sont de plus en plus concentrées à mesure que les densités de puissance sont élevées, ce qui implique que la surface d'évacuation de cette chaleur est de plus en plus faible. Cela impose au concepteur d'intégrer dans sa conception des organes de refroidissement, parmi différents types: convection naturelle, convection forcée, refroidissement liquide…, souvent imposés par le cahier des charges. Par exemple il peut être imposé d'éviter le ventilateur ou le refroidissement liquide pour des raisons de fiabilité et de favoriser le refroidissement passif par convection naturelle.

  Ventilateurs : dimensionnés à partir du débit d'air nécessaire, déterminant le volume du ventilateur.

  Dissipateur : les paramètres à prendre en compte pour ce genre de système sont la longueur et l'épaisseur des ailettes ainsi que l'épaisseur de la base du dissipateur. Il existe des modèles analytiques permettant de dimensionner ce système (Nombre de Prandtl, Reynolds, Nusselt).

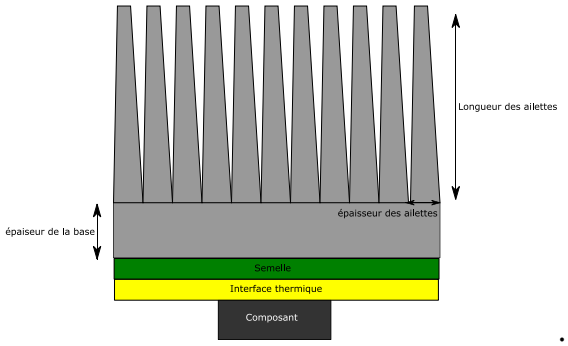


Fig. 13. Schéma de dissipateur thermique, sa semelle et son interface thermique avec un composant et les paramètres clés de dimensionnement physique : l'épaisseur de base, des ailettes et la longueur des ailettes.

Chaque dimensionnement nécessite au préalable une modélisation thermique des composants à l'aide de schéma de résistances et de capacités thermiques.

- **L'organe de protection :** est essentiel dans plusieurs applications pour non seulement protéger des composants contre les pannes, mais aussi l'utilisateur des dangers électriques pouvant survenir en cas de défaut. En dehors des pannes dues au vieillissement intrinsèque des composants dans le convertisseur, il existe des pannes d'usage qui sont souvent des erreurs de fonctionnement ou une conséquence du vieillissement et donc du changement de quelques paramètres électriques. Ces pannes peuvent être classées en 4 catégories.

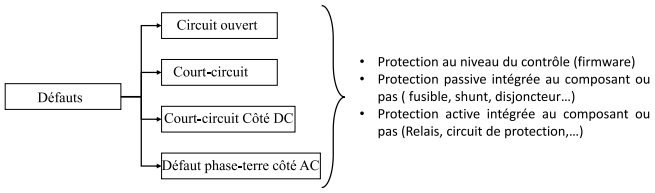


Fig. 14. Les types de sources de pannes répertoriées par la littérature et les dispositifs de protection communs.

Les circuits ouverts : sont souvent dus à une mauvaise soudure ou un décollement d'un « wire-bonding » et cela est induit par des stress thermomécaniques. Une erreur dans le *gate-drive* peut être aussi une autre cause. Des systèmes de *shunt* actif ou passif peuvent offrir un chemin alternatif au courant vers un circuit de décharge par exemple.

Le court-circuit : est un défaut souvent destructeur, potentiellement dû au mauvais fonctionnement d'un *gate driver* ou un défaut de soudure ou le vieillissement des propriétés d'un matériau d'isolation. Les *gate driver* vendus actuellement incluent presque tous des détecteurs de court-circuit rapide (<5µs). Les fusibles thermorésistants peuvent limiter la criticité du défaut.

- **Phase de prototypage et pré industrialisation**

Une fois que la topologie, la stratégie de contrôle, l'architecture et les composants sont choisis et optimisés, le concepteur commence l'étape de prototypage qui est aussi une étape de pré industrialisation, car c'est à ce moment-là que le concepteur se confronte aux exigences de fabrication.

En électronique cette étape est standardisée, les procédés de schématisation et de fabrication sont universels. Le concepteur grâce aux logiciels CAO-Conception Assistée par Ordinateur-de routage (conception PCB) peut générer des fichiers de format standard compréhensible par tous les fabricants de PCB. Cela ressemble à la fabrication de composants en microélectronique ou les procédés de transformation sont standards et cadrés.

La génération de ces fichiers est soumise à plusieurs exigences respectées par les fabricants de PCB (manuels de conception). Les logiciels de conception PCB incluent des méthodes de vérification des règles de conception (Dfm-Design for manufacturing).

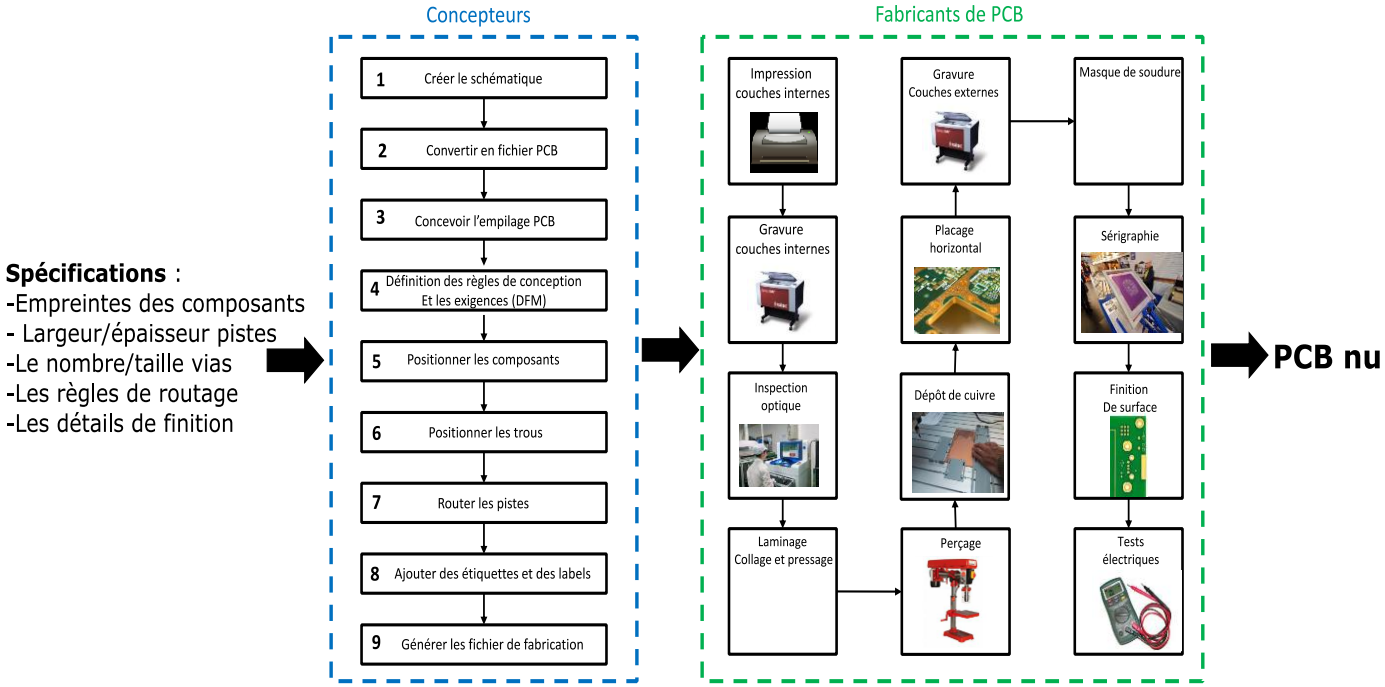


Fig. 15. Étapes de conception des circuits imprimés partant de la création du fichier de fabrication par le concepteur jusqu'à la traduction de ce dernier en procédés de fabrication.