

Influence des modèles de vieillissement sur les impacts environnementaux pour les composants d'électronique de puissance

Briac Baudais ^{1,2}, Hamid Ben Ahmed ¹, Gurvan Jodin ¹, Nicolas Degrenne ², Stéphane Lefebvre ³

¹ SATIE ENS Rennes CNRS, Bruz France

² Mitsubishi Electric Research Centre Europe, France

³ SATIE CNAM CNRS, Paris France

RESUME – L'article présente une méthode de quantification des impacts environnementaux sur une durée d'usage avec remplacement des composants défaillants d'un convertisseur statique à IGBT. Une première partie est allouée à la mise en place de la méthode. Puis, un cas d'étude sans remplacement est exposé avec le calcul des impacts environnementaux d'un module de puissance IGBT à la fabrication et à l'utilisation. Les pertes liées à l'utilisation dominent 15 des 16 impacts environnementaux étudiés, sauf pour l'utilisation de ressources minérales et métaux dominée par la fabrication (80%). S'ensuit une analyse de la sensibilité des différents paramètres influençant la durée de vie et donc les impacts environnementaux.

Mots-clés – Électronique de puissance, ACV, modèles de vieillissement, étude de sensibilité

1. INTRODUCTION

L'électronique de puissance (EP) et l'électronique ont permis un développement rapide de la société. Ce développement s'est fait à un fort coût pour notre environnement, en témoignant les 53 millions de tonnes de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) produits en 2019 [1]. L'électronique de puissance est également et restera au cœur de la production d'énergie [2, 3] et de la mobilité électrique [4, 5]; il constitue un maillon essentiel de la transition énergétique en cours. Cependant, les systèmes électroniques de puissance sont complexes, à forte valeur ajoutée par leur composition, avec un grand nombre de matériaux [6] dont certains sont déjà considérés comme critiques, et les processus de fabrication nécessitent une infrastructure de pointe, de l'énergie, des ressources et des substances pouvant être à fort impact environnemental [7]. C'est dans ce contexte qu'il est primordial d'anticiper, dès la conception, les potentiels impacts et de les réduire au maximum par un dimensionnement éco-optimisé et une conception adaptée dite écoconception. Avant cela, il est d'abord intéressant de connaître les impacts de l'électronique de puissance "standard" sur l'environnement.

Le calcul des impacts environnementaux (IE) peut-être fait grâce à une étude d'analyse sur cycle de vie (ACV) [8]. Cependant, une grande liberté est offerte pour le choix des hypothèses liées au produit, c'est-à-dire pour un même champ d'études (unité fonctionnelle, limites, etc.) les IE finaux, peuvent être différents entre deux études traitant d'un même produit. La figure 12, illustre l'évolution d'un impact environnemental donné en fonction de la durée d'usage pour différents modes d'usage (pertes en fonctionnement) et différentes méthodes d'estimation de durée de vie. Cette dernière avec le nombre de remplacements, et l'énergie consommée (fabrication/recyclage et usage) sont des facteurs d'évolution des IE. C'est pourquoi l'article se concentre sur la présentation d'une méthode de calcul des IE sur une durée d'usage en étudiant la sensibilité des paramètres du modèle d'estimation de la durée de vie vis-à-vis des impacts environnementaux finaux. Dans la littérature, il n'y a pas à la

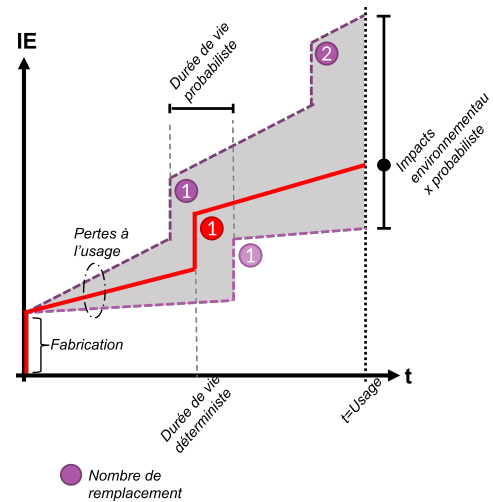


FIG. 1. Évolution des impacts environnementaux sur cycle de vie.

connaissance des auteurs de telles études de sensibilité pour des composants électroniques de puissance [9].

La première partie expose une méthode globale d'analyse du cycle de vie pour les composants d'électronique de puissance. La seconde partie est dédiée à l'application de cette méthode à un module de puissance IGBT FS820R08A6P2B. Dans la troisième partie, nous mettons en œuvre une première étape de la méthode, en utilisant un modèle de perte et une durée de vie déterministe pour prendre en compte le remplacement éventuel du composant. La quatrième partie consiste à étudier la sensibilité de la méthode aux données d'entrée, en se concentrant sur les impacts environnementaux. Enfin, la cinquième partie de l'article développe la fin de la méthode et discute de la vision probabiliste de la durée de vie des composants d'électronique de puissance.

2. PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE

Une méthode de calcul des impacts environnementaux (IE) sur cycle de vie d'un composant d'électronique de puissance basée sur des modèles avec vieillissement est ici présentée. Elle est résumée Figure 2.

Premièrement, le calcul des IE se fait grâce à la méthode ACV. La première étape d'une ACV consiste donc à définir le champ d'études, avec les hypothèses, les limites de l'étude et l'unité fonctionnelle.

Ensuite, il est nécessaire de distinguer les différentes parties du cycle de vie, à savoir, la fabrication, l'utilisation, le transport et

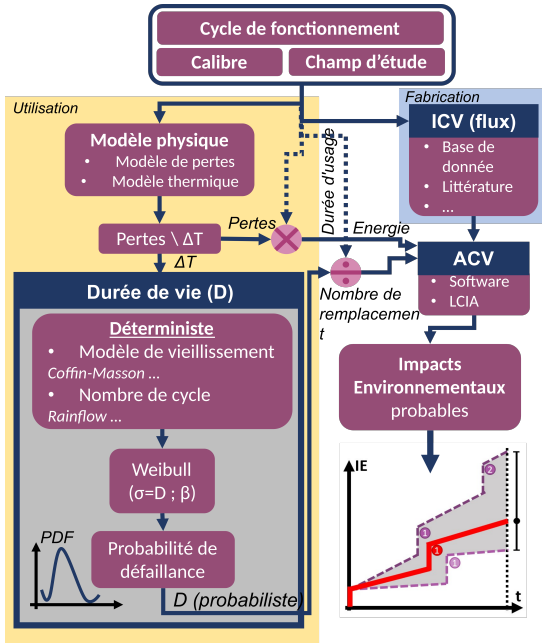


FIG. 2. Méthode de caractérisation des impacts environnementaux sur cycle de vie avec modèles de vieillissement.

la fin de vie.

Les différents matériaux et process nécessaires à la fabrication, le transport et la fin de vie sont déterminés à partir de bases de données, de la littérature, de connaissances sur le produit et/ou d'hypothèses. Ils sont répertoriés dans l'inventaire sur cycle de vie (ICV). La fabrication est très dépendante de la topologie du système et de son calibre.

La partie utilisation d'un composant d'électronique de puissance est représentée par son énergie consommée due à ses pertes sur une durée d'utilisation. Les pertes sont calculées à partir d'un modèle physique du composant.

Pour terminer, il reste à prendre en compte le nombre de remplacements sur une durée d'usage. Les pertes permettent de connaître l'élévation en température du composant. Un modèle thermique de type Foster ou Cauer est utilisé, il se construit à partir de résistances et capacités thermiques spécifiques aux différents matériaux du produit. Le calcul de la température lié à des modèles de vieillissement (type Arrhenius, ...) permet d'estimer la durée de vie du composant et donc le nombre de remplacements [10, 11, 12]. À cela, des lois de probabilité de défaillance sont ajoutées dans le but de connaître la dispersion des IE en sortie.

Pour résumer, la méthode décrite donne les pertes, les temps auxquels interviennent les défauts, ce qui permet, grâce à la durée d'usage, d'une part de calculer le nombre de remplacements, i.e combien de fois les IE à la fabrication sont pris en compte et d'autre part l'énergie consommée.

3. 1^{re} ÉTUDE - CAS SIMPLIFIÉ

3.1. Cas d'étude - Définition des paramètres

Dans l'optique de simplifier l'étude, seule la partie module de puissance du convertisseur statique est sélectionnée. Le module de puissance FS820R08A6P2B HybridPACK Drive 750 V IGBT avec diodes en antiparallèles est sélectionné [13, 14], Figure 3.

La partie de l'ICV qui concerne la fabrication est principalement construite à partir des données de l'étude conduite par System Plus Consulting spécifique au module de puissance FS820R08A6P2B [14]. Mais aussi de l'étude de Nordelöf (2017), présenté dans un modèle évolutif d'ICV d'un onduleur

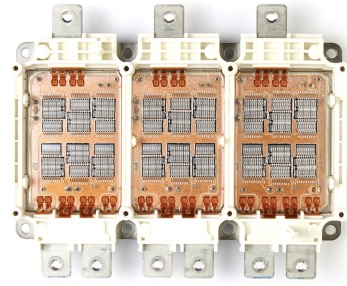


FIG. 3. Module de puissance FS820R08A6P2B HybridPACK Drive 750 V IGBT [14].

traction (un modèle réalisé par l'Université de Chalmers) [15]. Plus d'informations sur la création de l'ICV peuvent être retrouvées dans l'étude de Baudais (2023) [16].

3.2. Calcul simplifié des pertes

Cette partie permet d'introduire un cas simple d'ACV pour un composant d'électronique de puissance. La durée de vie du composant sera considérée égale à la durée totale d'usage. Concernant l'énergie associée aux pertes lors de la phase de fonctionnement, un modèle très simplifié est utilisé dans ce cas consistant à considérer un rendement constant et indépendant de la puissance de sortie.

Pour ce faire, nous considérons une durée d'usage, sans remplacement, de 15 ans, valeur souvent considérée pour l'électronique de puissance, du domaine automobile [17], avec 10 000 heures de fonctionnement, soit 300 000 km. Un rendement équivalent de 97% sur l'ensemble du cycle de fonctionnement a été considéré [18]. Cette valeur est calculée grâce à un cycle de conduite standardisé (WLTP - Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Procedure) [19] et est donnée par le rapport entre l'énergie fournie par le convertisseur à la charge et l'énergie absorbée par l'onduleur. La Volkswagen ID.3 150 kW a été sélectionnée pour la consommation [20], avec une moyenne de 16 kWh / 100 km sur toute la durée de vie. À partir de ces données, on peut calculer l'énergie consommée par l'onduleur sur une durée d'usage avec l'équation 1, elle est de 1,44 MWh.

$$E = C \times d \times (1 - \eta) \quad (1)$$

Avec E : énergie consommée (kWh), C : consommation (kWh/100km), d : distance parcourue (km), η : rendement moyen sur cycle.

3.3. Impacts environnementaux du cas simplifié

La figure 4 présente les IE à la fabrication et à l'utilisation du module de puissance. L'utilisation est prépondérante sur 15 des 16 impacts. Il est important de noter que la provenance de la production d'énergie peut modifier les impacts environnementaux finaux. Ici un mix énergétique mondial a été sélectionné. Une autre production, plus fortement carbonée, augmenterait la part des gaz à effet de serre (GWP).

La fabrication du module de puissance domine l'impact utilisation de ressources minérales (MRD) (80%). Les puces, les contacts et la semelle sont les trois "hotspots" du module. Pour la puce, cela est dû à la complexité du système et au besoin en matériaux. Pour la semelle et les contacts, la cause est aussi le besoin de matériaux et non pas les efforts de production. Pour terminer, pour le DCB (direct copper bonding), les feuilles de cuivre, mais aussi les différents gaz utilisés dans le four afin de lier les feuilles de cuivre à la céramique sont impactants.

4. 2^e ÉTUDE - VIEILLISSEMENT DÉTERMINISTE

Ici, la méthode avec vieillissement est implémentée, sans la partie probabiliste pour la durée de vie, à partir du cas d'étude

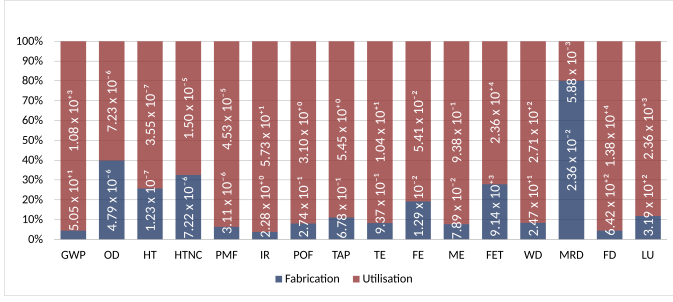


FIG. 4. Impacts environnementaux module de puissance FS820R08A6P2B à la fabrication et à l'utilisation avec modèle de pertes simplifié. Les acronymes des différents impacts (GWP, OD, ...) sont définis dans [8] et sont rappelés en annexe dans le tableau 4.

présenté précédemment pour étudier l'influence de la finesse des modèles sur le calcul des impacts environnementaux.

4.1. Implémentation d'un modèle de pertes

Cette partie présente l'implémentation d'un modèle de pertes issu de [21], le cas d'une commande avec une référence sinusoïdale en modulation scalaire linéaire. L'impact de la température sur les paramètres du modèle n'est pas pris en compte. Les paramètres sont spécifiques au composant choisi et proviennent principalement des documentations techniques. Le modèle de pertes est présenté avec les équations 2 à 5.

$$P_{cond,IGBT} = \left(\frac{1}{2\pi} + \frac{m \cdot \cos\Phi}{8} \right) \cdot V_{CE0} \cdot \sqrt{2} \cdot I + \left(\frac{1}{8} + \frac{m \cdot \cos\Phi}{2\pi} \right) \cdot R_{CE} \cdot 2 \cdot I^2 \quad (2)$$

$$P_{com,IGBT} = f_{sw} \cdot E_{on+off} \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{I}{I_{ref}} \left(\frac{V_{dc}}{V_{ref}} \right)^{K_{V,IGBT}} \quad (3)$$

$$P_{cond,diode} = \left(\frac{1}{2\pi} + \frac{m \cdot \cos\Phi}{8} \right) \cdot V_{f0} \cdot \sqrt{2} \cdot I + \left(\frac{1}{8} + \frac{m \cdot \cos\Phi}{2\pi} \right) \cdot R_f \cdot 2 \cdot I^2 \quad (4)$$

$$P_{com,IGBT} = s_{sw} \cdot E_{rr} \frac{\sqrt{2}}{\pi} \left(\frac{I}{I_{ref}} \right)^{K_{I,diode}} \left(\frac{V_{dc}}{V_{ref}} \right)^{K_{V,diode}} \quad (5)$$

P_{cond} représente les pertes en conduction et P_{com} les pertes en commutation. $K_{V,IGBT}$, $K_{V,diode}$ et $K_{I,diode}$ sont des coefficients de dépendance en tension et en courant, ici, $K_{V,IGBT}=1.35$, $K_{V,diode}=0.6$ et $K_{I,diode}=0.6$ comme proposé dans [21].

Le cycle de fonctionnement est construit à partir des cycles de conduite normalisés (WLTP) d'une durée de 1800 secondes, le module permet de fournir les courants pour une machine à rotor bobiné (59 kW, 4 paires de pôles) [19]. Le cycle en vitesse et les pertes totales sont présentés figure 5. L'énergie consommée sur un cycle de fonctionnement atteint 0.42 kWh, soit 0.84kWh/h. Cela correspond à un rendement énergétique de 92.4%.

Pour pouvoir comparer l'énergie consommée calculée en 3.2, il faut considérer le même nombre de cycles/heure. C'est-à-dire, 10000 heures sur 15 ans pour l'automobile [17]. Le modèle précédent donnait sur sa durée d'usage une énergie consommée de 1.44 MWh, celui-ci donne 6 fois plus de pertes (8.38 MWh pour 10000h de fonctionnement). Ce qui amène à des impacts environnementaux 6 fois plus élevés avec ce modèle de pertes, les différents IE sont présentés figure 6.

4.2. Modèle thermique

Les pertes provoquent une élévation de la température. Ces flux de chaleur sont évacués par conduction vers le dissipateur.

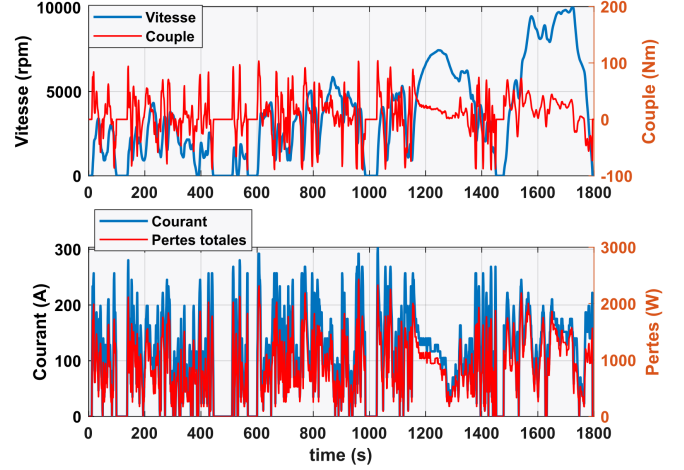


FIG. 5. Cycle normalisé WLTP et pertes totales sur cycle de fonctionnement.

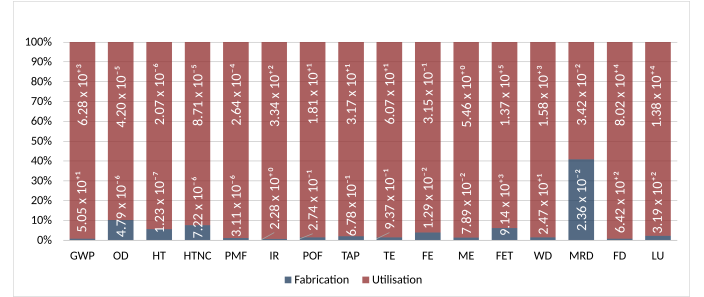


FIG. 6. Impacts environnementaux du module de puissance FS820R08A6P2B à la fabrication et à l'utilisation avec implémentation du modèle de pertes. Les acronymes des différents impacts (GWP, OD, ...) sont définis dans [8] et sont rappelés en annexe dans le tableau 4.

Un fluide caloporteur transporte par convection la chaleur au niveau du refroidisseur. Les différentes couches possèdent des résistances thermiques et capacités thermiques. Un modèle type Foster [22] est utilisé pour décrire le comportement thermique du système et illustré figure 7. Les valeurs des résistances et capacités thermiques sont spécifiques au composant et sont données par le constructeur.

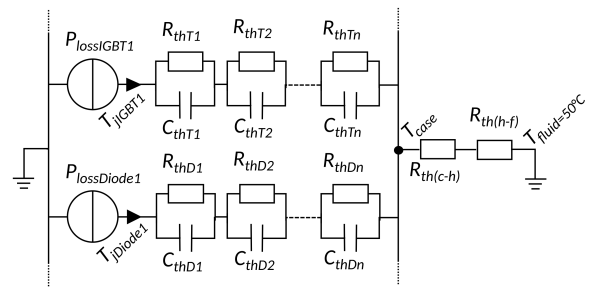


FIG. 7. Modèle thermique équivalent (seul un module IGBT-Diode sur les six est représenté).

4.3. Lois de durée de vie

Une loi empirique basée sur des données provenant de cyclage accéléré est d'abord utilisée. Par exemple, avec un modèle de Coffin-Manson [10], le nombre de cycles maximum dépend des variations de température. Mais encore, avec une

loi d'Arrhenius, l'influence du paramètre température moyenne est ajoutée. Le choix d'une loi peut donc être fait à partir des données disponibles. Le modèle de durée de vie sélectionné pour le cas d'étude sera ceux de Coffin-Manson et d'Arrhenius, équation 6. Les valeurs des paramètres sont obtenues à partir de l'étude d'un module de puissance de chez Infineon [12] et présentées dans le tableau 1.

S'ensuit un algorithme de comptage des cycles thermiques permettant d'obtenir une matrice comprenant l'amplitude des variations ΔT_j subies par le module et le nombre de cycles associés [11]. Pour cela, la méthode rainflow est proposée, elle est largement utilisée en analyse de fatigue thermodynamique, car elle est facile d'utilisation et permet moins d'erreurs que les autres algorithmes de comptage [11].

Enfin, une loi de cumul d'endommagement permet de sortir la durée de vie du système. La loi de cumul d'endommagement linéaire est proposée, c'est l'outil le plus utilisé pour estimer les durées de vie restantes, mais suppose l'hypothèse forte d'un cumul linéaire d'endommagement.

$$Nf = A \cdot \Delta T_j^\alpha \cdot \exp\left(\frac{Ea}{k \cdot T_{jmean}}\right) \quad (6)$$

TABEAU 1. Paramètres de la loi de vieillissement récupérés à partir de l'étude d'un module de puissance de chez Infineon [12].

A	3.5535×10^{15}
α	-7.039
Ea	2.7172×10^{-20}

4.4. Résultat IE avec vieillissement déterministe

Les pertes sur cycle et le modèle thermique permettent d'obtenir le cycle thermique. Puis grâce à la méthode de comptage de cycle, rainflow, la matrice des cycles thermiques est déterminée. Les résultats du cas d'étude considéré sont présentés figure 8.

La durée de vie des différentes diodes est de 10 ans pour les

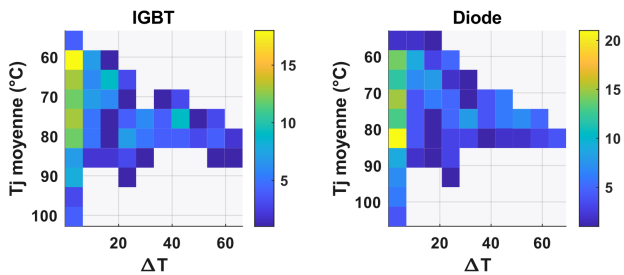


FIG. 8. Matrice des cycles thermiques pour une puce IGBT et une diode.

diodes et de 17 ans pour les IGBT.

Connaissant les IE à la fabrication, les IE liés aux pertes en fonctionnement et la durée de vie du composant, les IE sur un cycle d'usage peuvent ainsi être calculés. Dans l'optique d'avoir une vision à plus long terme, un cycle d'usage de 30 ans a été sélectionné (le précédent était de 15 ans). La figure 9 présente l'évolution des 16 IE définis dans [8] et la figure 10 se concentre sur l'impact utilisation de ressources minérales et métaux (MRD). Durant le cycle d'usage, deux casses du composant ont lieu. La plupart des IE sont peu affectés par le remplacement d'un composant au cours de son utilisation. Cela est dû au fait que les IE liés aux pertes (usage) sont prépondérants par rapport à ceux liés à la fabrication. La part de l'utilisation sur le total au bout de 30 ans est au-dessus de 80% (GWP 98%, OD 85%, HT 91%, etc). Pour MRD, figure 10, la part de la fabrication représente 50% de l'impact total au bout de 30 ans. Même si MRD est le seul

touché par le remplacement du composant, il est important de rappeler que ces résultats sont liés à un composant spécifique, pour un cycle de fonctionnement spécifique. Également, MRD est un IE prépondérant pour l'électronique de puissance. La référence [16] présente hiérarchie des différents IE en fonction des limites planétaires, l'impact MRD, est dominant et donc à prendre en compte.

Pour le reste de l'étude, l'impact MRD sera principalement présenté seul.

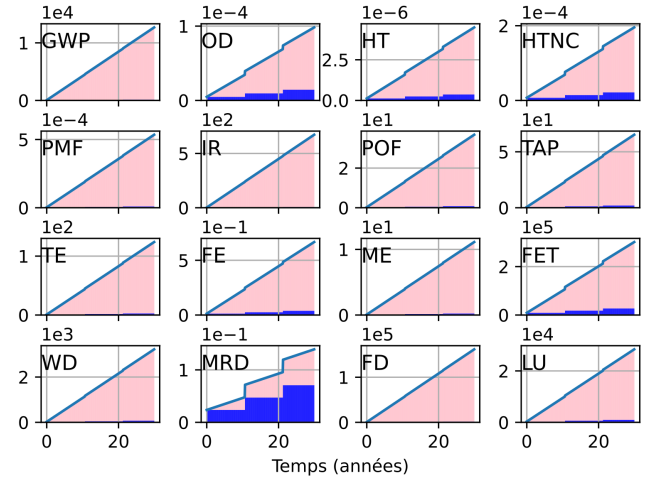


FIG. 9. IE sur un cycle d'usage du cas d'étude. Les acronymes des différents impacts (GWP, OD, ...) sont définis dans [8] et sont rappelés en annexe dans le tableau 4.

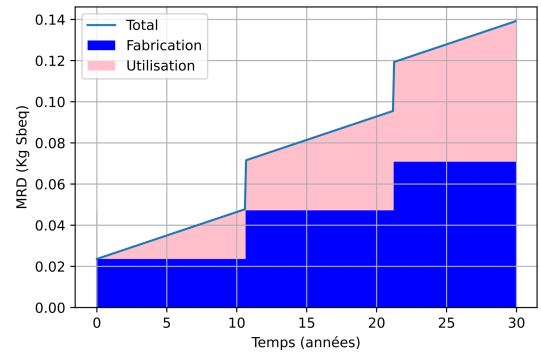


FIG. 10. Zoom sur l'utilisation de ressources minérales et métaux (MRD).

5. SENSIBILITÉ DE LA MÉTHODE

5.1. Sensibilité de la loi de vieillissement

Cette sous-partie présente une étude de sensibilité de la loi de vieillissement. La loi a une influence sur la durée de vie des composants qui ont une influence sur les IE. L'analyse de sensibilité permet de connaître l'impact d'une variation de la loi sur les résultats finaux, mais également de connaître la sensibilité du paramètre. Une variation du N_f de $\pm 50\%$ est proposé.

La figure 11 présente l'évolution de MRD pour différentes variations de N_f . L'augmentation du N_f de $+50\%$ fait passer le nombre de défauts à 1, ce qui fait diminuer MRD de 22%. Pour la diminution de N_f de -50% , le nombre de défauts passe à 5, MRD augmente alors de 50%. Pour MRD une précision suffisante de l'estimation du vieillissement est nécessaire.

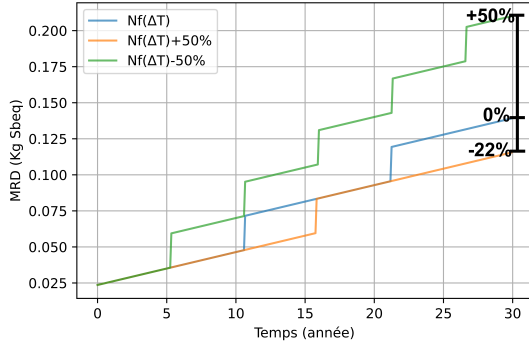


FIG. 11. Utilisation de ressources minérales et métaux (MRD) avec variation de la loi de vieillissement.

5.2. Impact du refroidisseur

Le refroidisseur, figure 11, est un élément du modèle thermique, il joue un rôle majeur dans l'estimation de la durée de vie du composant et donc du calcul des IE. Cependant, faire varier la valeur du R_{th} du refroidisseur revient à modifier ses dimensions et donc modifier ses IE à la fabrication. Cette partie présente l'impact d'une variation du R_{th} du refroidisseur et de l'interface thermique (TIM) sur les IE en prenant en compte l'évolution des IE du refroidisseur à la fabrication. Il est nécessaire de relier la valeur du R_{th} du refroidisseur et du TIM aux IE, l'équation 7 est développée grâce à [15] et au R_{th} présent dans la documentation technique [23]. Le R_{th} est inversement proportionnel à la masse [24], et les IE sont proportionnels à la masse [15]. Les coefficients sont présentés tableau 2. L'équation ne prend pas en compte la variation des IE liés au TIM lors de la variation du R_{th} du refroidisseur et du TIM, car considérée comme mineures.

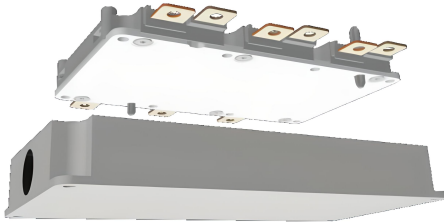


FIG. 12. Vue du refroidisseur avec son module de puissance IGBT.

$$IE_{ref} = \frac{k_{ie}}{R_{th_{ref}}} \quad (7)$$

$$\Delta IE_{ref} = IE_{ref}(R_{th_{+/-X\%}}) - IE_{ref}(R_{th_0}) \quad (8)$$

Avec IE_{ref} , les IE du refroidisseur, $R_{th_{ref}}$ la résistance thermique du refroidisseur, k_{ie} le coefficient qui lie les IE au R_{th} du refroidisseur et ΔIE_{ref} la variation des IE du refroidisseur pour un $R_{th_{+/-X\%}}$ qui représente une évolution de $+/-X\%$.

La figure 13 présente l'évolution des IE du module de puissance avec la différence des IE du refroidisseur en fonction de la variation de son R_{th} pour une durée d'usage égale à 30 ans. Pour les IE du module de puissance, augmenter le R_{th} amène à augmenter les températures, le nombre de défaillances, et donc les IE. Diminuer le R_{th} (meilleur refroidissement) va permettre de diminuer les défaillances, jusqu'au point où il n'y en a plus sur le cycle d'usage. Pour le refroidisseur, le R_{th} est inversement proportionnel aux IE, c'est-à-dire que le diminuer revient à augmenter la masse et donc les IE, jusqu'à un point où ils deviennent prépondérants. Cela veut dire qu'il existe un optimum

TABLEAU 2. Paramètres k_{ie} .

GWP	OD	HT	HTNC
4.0E+01	1.8E-13	3.8E-08	8.4E-07
TE	FE	ME	FET
4.3E-01	1.2E-03	3.9E-02	1.1E+03
PMF	IR	POF	TAP
3.0E-06	2.7E-01	1.6E-01	2.4E-01
WD	MRD	FD	LU
5.9E+00	2.9E-05	3.8E+02	6.8E+01

correspondant au meilleur compromis entre l'IE du refroidisseur et l'IE lié au remplacement du module.

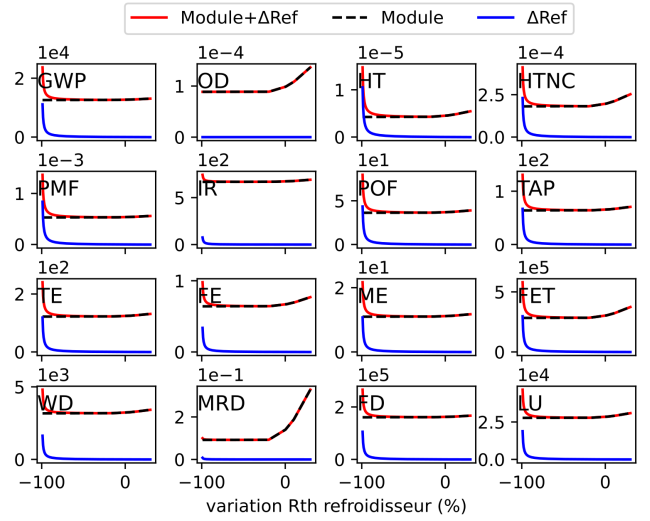


FIG. 13. Impact de la variation du R_{th} du refroidisseur sur les IE du module de puissance couplé à la variation des IE du refroidisseur. La courbe Module représente les IE à 30 ans du module de puissance (usage + fabrication/remplacement), la courbe ΔRef représente la variation des IE liés à la fabrication du refroidisseur et la courbe Module + ΔRef représente la somme des deux.

5.3. Impact du cycle de fonctionnement

Cette sous-partie a pour but de montrer l'influence du cycle de fonctionnement. Pour ce faire, un deuxième cycle est proposé, beaucoup plus contraignant en termes de dynamique. Il est issu du cas d'application de houlogénération [25]. Pour que les deux cycles soient comparables, celui houlogénération est créé en respectant les mêmes puissances mécaniques minimales et maximales que le cycle WLTP précédemment utilisé (vitesse positive), figure 14.

Les résultats donnent des pertes sur cycle égales à 0.85kWh, soit 2 fois plus que les pertes calculées à partir du cycle wltp (0.42 kWh). Cela est dû à la dynamique de la houlogénération qui n'a pas de temps d'arrêt. Cette augmentation des pertes, sous l'hypothèse de garder le même nombre de cycles par an, à savoir 666 heures par an, amène à une durée de vie de 2 ans pour les IGBT et de 1.5 an pour les diodes (pour rappel avec cycle WLTP, 17 ans IGBT et 10 ans diode). Cette différence est due à la non-linéarité du modèle de durée de vie, le système à une température moyenne de fonctionnement plus élevée et subit plus de cyclage en température.

Il est rappelé que le dimensionnement identique pour les deux cycles considérés, en réalité le système serait redimensionné. Une comparaison à 30 ans est présentée figure 15, elle montre les IE des deux cycles. Les IE liés à l'utilisation sont 2 fois plus

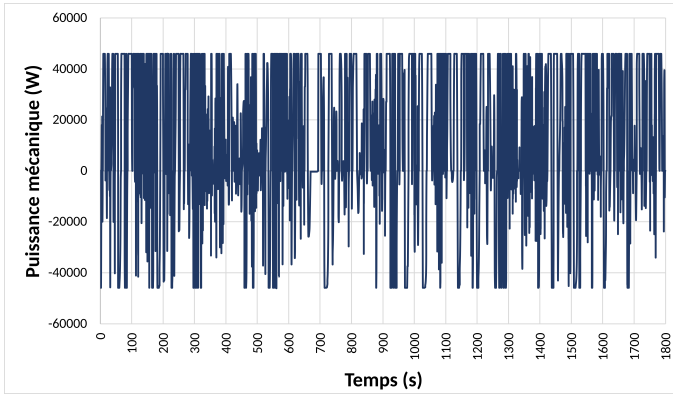


FIG. 14. Puissance mécanique (W) du cycle houlogénération.

élevés, car il y a 2 fois plus de pertes. Les IE liés à la fabrication prennent une place plus importante, 6.3 fois plus grande, car la durée de vie est très faible et cause un nombre élevé de remplacements. C'est pourquoi certains IE tels que OD, HT, HTNC et FET voient leur part liée à la fabrication représenter autour de 30% de l'IE total. Au niveau des IE totaux, ils sont plus ou moins doublés sauf pour MRD où ils sont multipliés par 4.

On notera donc l'influence du cycle de fonctionnement dans

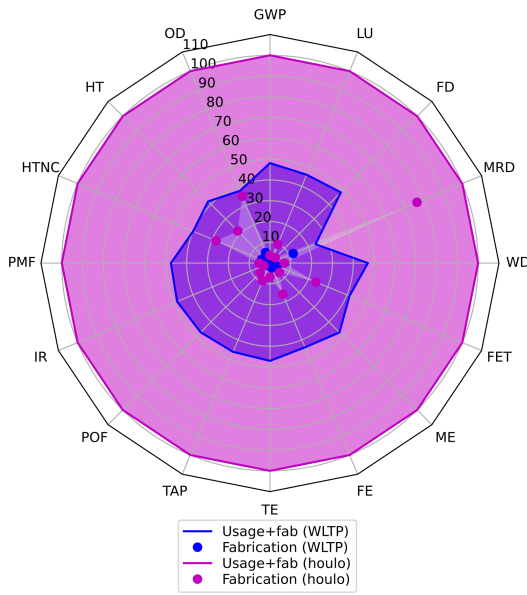


FIG. 15. Comparaison des IE du cycle WLTP et houlogénération (normalisé par rapport aux IE totaux de la houlogénération).

l'estimation des IE d'un composant de puissance.

6. 3^e ÉTUDE : VIEILLISSEMENT PROBABILISTE

6.1. Probabilité de défaillance

Le résultat de durée de vie issu des modèles de vieillissement précédemment considérés est déterministe. Pourtant, dans la réalité, deux composants identiques qui subiront les mêmes cycles de fonctionnement n'auront pas exactement la même durée de vie. Cela est dû au fait que les modèles empiriques basés sur des données de cyclages accélérés proviennent d'un moyennage, les écarts-types probables ne sont pas connus. L'ajout d'une fonction probabiliste, comme surcouche de la méthode, pour la durée de vie, permet de prendre en compte la dispersion des défaillances. C'est pourquoi la fonction de Weibull paramétrée avec la durée de vie et un facteur de forme

est proposée [26]. La probabilité de défaillance $F(t)$ peut maintenant être calculée avec l'équation 9.

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\sigma}\right)^\beta\right) \quad (9)$$

La durée de vie déterministe anciennement calculée est directement liée au paramètre σ , à partir de la formule du taux de défaillance de Weibull. Cette durée de vie déterministe provient d'un diagramme de défaillance qui est lié à un taux de défaillance de l'échantillon, exemple avec celui utilisé dans la section 4.3, il correspond à un taux de 5%. Cela signifie que le nombre de cycles Nf représente la mise en défaut de 5% des composants testés. Le paramètre β est normalement calculé à partir du diagramme de cyclage accéléré pour différents taux de défaillance, cependant par manque de donnée, il est ici posé à 7.59 [27]. Il existe alors une loi de fiabilité pour chaque sous-système, IGBT et diode. La fiabilité d'un système composé de sous-systèmes dépend de sa structure [28], ici représentée par une structure série qui correspond au fait que tous les sous-systèmes doivent fonctionner pour que le système complet fonctionne. Alors sa fiabilité est le produit des fiabilités des sous-systèmes. La probabilité de défaillance est calculée avec l'équation 10.

$$F_{sys}(t) = 1 - \prod (1 - F_{subsys}(t)) \quad (10)$$

Avec $F_{sys}(t)$ la probabilité de défaillance du système global et $F_{subsys}(t)$ celle de ses sous-systèmes.

6.2. Résultat IE avec vieillissement probabiliste

La prise en compte de probabilité de défaillance croisée avec des tirages Monte-Carlo permet de connaître la dispersion des IE probables sur un échantillon. La figure 16 montre l'évolution probable de MRD à l'image de la figure 10 qui elle était déterministe. Le nombre de défaillances minimales à 30 ans est de 2 et il est au maximum de 3, ce qui fait augmenter de 14% MRD dans ce dernier cas par rapport à la médiane. La distribution des deux premiers défauts est aussi affichée, cette distribution tend à s'aplanir en fonction du nombre de remplacements et est directement impactée par le β de la fonction de Weibull.

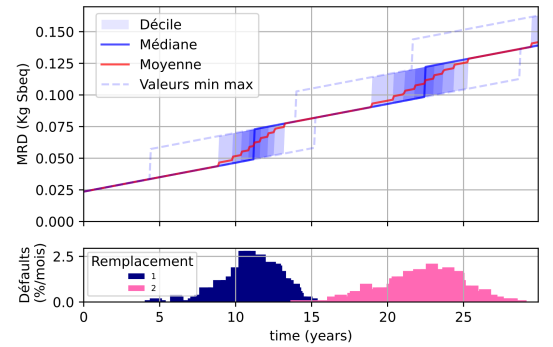


FIG. 16. Utilisation de ressources minérales et métaux (MRD) avec la loi de vieillissement probabiliste en cyclage accéléré, Monte-Carlo, 1000 itérations.

6.3. Prise en compte de la fin de vie et de la vie utile

En réalité, la fiabilité comme modélisée précédemment n'est pas complète, car elle ne prend en compte que le vieillissement du produit. Cependant, il a été observé que le taux de défaillance en électronique suit une courbe que l'on appelle « courbe en baignoire » [28], avec la jeunesse (conception, fabrication mal maîtrisée), la vie utile (panne aléatoire) et le vieillissement (usure). Des études récentes sur des convertisseurs éoliens ont démontré que le taux de défaillance n'était pas seulement celui de la

fin de vie [29]. La fiabilité précédemment intégrée correspond à l'usure du système, définie grâce à la fonction de Weibull, avec le paramètre de forme $\beta=7.59$. Deux autres fonctions de Weibull peuvent alors être implémentées afin de rajouter les défaillances liées à la jeunesse ($\beta<1$) et les défaillances aléatoires ($\beta=1$), figure 17. Pour la partie jeunesse, $\beta=0.6$ et $\sigma = 3424ans$ d'après [30]. Pour la partie vie utile, $\beta=1$ ce qui correspond à une loi exponentielle. σ est alors égal au MTTF (Mean Time To Failure), et le MTTF peut être calculé grâce au FIT (1 FIT vaut 1 défaillance par 10^9 heures)[31]. D'après [32] $\sigma = 5436ans$. Les différentes valeurs sont rappelées dans le tableau 3

TABLEAU 3. Paramètres des fonctions de fiabilité.

Jeunesse		Vie utile	
$\sigma(ans)$	β	$\sigma(ans)$	β
3424.65	0.6	5436	1

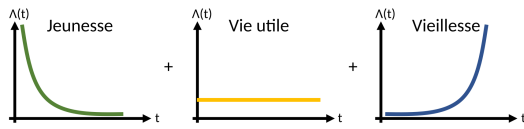


FIG. 17. Taux de défaillance pour la jeunesse, la vie utile et la fin de vie d'un système.

Le résultat du test Monte-Carlo, représenté par un échantillon de 1000 composants, montre un nombre de défaillances totales de 2222 au bout de 30 ans (14% jeunesse, 0.4% défaillance aléatoire et 85% fin de vie). Les échantillons ont un nombre de remplacements maximal de 4, soit un de plus par rapport au cas où seule la fin de vie est prise en compte et 2 de plus pour le cas déterministe. L'augmentation de MDR maximal par rapport au cas médian est de 30%. Pour rappel, elle était de 14% avec seulement la prise en compte de la fin de vie.

7. CONCLUSION

L'article présente une méthode complète de calcul des IE d'un composant d'électronique de puissance avec la prise en compte du vieillissement/remplacement des composants. Premièrement, le système étudié doit être défini avec son champ d'études, mais aussi ses données techniques (calibre, thermique, etc.) et son cycle de fonctionnement. Ensuite, deux parties sont modélisées en parallèle : la fabrication et l'utilisation. Pour la fabrication, un inventaire est développé représentant tous les flux nécessaires à la création du produit. Pour l'utilisation, les pertes sont calculées à partir d'un modèle physique, et le nombre de remplacements à partir d'une loi de vieillissement, liée aux pertes et à un modèle thermique. Pour terminer, les IE en fonction du temps sont calculés avec la méthode ACV grâce aux flux à la fabrication (première fabrication + le nombre de remplacements) et aux flux à l'utilisation (l'énergie perdue).

Le cas d'étude est un module de puissance FS820R08A6P2B HybridPACK Drive 750 V. La mise en place de la méthode montre que l'évolution des IE en fonction du temps est principalement due aux pertes à l'utilisation (15 IE sur 16), sauf pour l'utilisation de ressources minérales et métaux où la fabrication représente 50% de l'impact au bout de 30 ans pour le cas d'étude.

Les différents paramètres d'entrées de la méthode ont une influence directe sur les pertes à l'utilisation et le nombre de remplacements, donc les IE. L'étude de la sensibilité de la loi de vieillissement montre qu'une variation de + ou - 50% de la loi fait varier de +50% ou -22% MRD. La variation en sortie est dépendante de la durée de vie initiale et de la part de la fabrication dans l'IE. Aussi, le dimensionnement du refroidisseur est

un paramètre déterminant, car augmenter R_{th} entraîne une augmentation du nombre de défaillances, et diminuer R_{th} amène à ne plus avoir de défaillance sur une durée d'usage. Réduire la résistance thermique du refroidisseur semble être une solution pertinente, tout en faisant attention au point où il y a une augmentation des IE du refroidisseur. Le cycle de fonctionnement modifie aussi les IE, car un cycle de fonctionnement contraignant amènera à plus de défaillance.

Il semble pertinent de prendre en compte une fonction de Weibull pour déterminer les défaillances probables, mais aussi modéliser les défauts de jeunesse et la vie utile. Pour le cas étudié, 14% des défauts sont liés à la jeunesse et 0.4% à la vie utile, ce qui augmente le cas maximal probable MRD de 30%.

La méthode présentée est dépendante des paramètres d'entrée, c'est pourquoi, pour obtenir les IE d'un composant d'électronique de puissance, une grande précision doit être apportée au système étudié et à son cycle de fonctionnement.

L'approche proposée dans l'article pourra dans l'avenir être étendue à tout le convertisseur (capacité du bus DC, driver, connectiques, boîtier, etc.). Cela permettra une vision plus globale des impacts environnementaux en intégrant les liens entre les composants.

Par ailleurs, il serait intéressant d'intégrer des fonctionnalités de diagnostics des composants qui permettent la surveillance de paramètres critiques (température de jonction, etc.). Cela couplé à une architecture modulaire dans le but d'un allongement de la durée de vie et/ou une possibilité de réparation. Enfin, une approche d'éco-conception/éco-optimisation prenant en compte la méthode d'estimation des IE décrite dans cet article permettra un dimensionnement optimisé selon des critères de performance et de soutenabilité.

8. ANNEXE

TABLEAU 4. Acronymes des différents impacts environnementaux [8].

Changement climatique	GWP ($kg\ CO_{2eq}$)	Écotoxicité, eaux douces	FET (CTU_e)
Appauvrissement de la couche d'ozone	OD ($kg\ CFC - 11_{eq}$)	Consommation d'eau	WD ($m^3\ world_{eq}$)
Épuisement des ressources fossiles	FD (MJ)	Eutrophisation, eau douce	FE ($kg\ P_{eq}$)
Toxicité humaine	HT (CTU_h)	Eutrophisation marine	ME ($kg\ N_{eq}$)
Toxicité humaine, non cancers	HTNC (CTU_h)	Acidification	TAP ($Mole\ H_{eq}^+$)
Particules	PM ($Incidence - des\ maladies$)	Eutrophisation terrestre	TE ($Mole\ N_{eq}$)
Rayonnement ionisant	IR ($kg\ Bq\ U9235_{eq}$)	Épuisement, minéraux et métaux	MRD ($kg\ Sb_{eq}$)
Formation d'ozone photochimique	POF ($kg\ COV\ NM_{eq}$)	Land use	LU

9. RÉFÉRENCES

- [1] Forti, V.; Baldé, C.; Kuehr, R.; Bel, G. The Global E-Waste Monitor 2020. Quantities, Flows, and the Circular Economy Potential; International Solid Waste Association : Rotterdam, the Netherlands, 2020; ISBN 978-92-808-9114-0.
- [2] SPECS. Smart Grid + Power Electronics Consortium Singapore, Advanced Power Electronics : Enabler for Energy Transition & Efficiency
- [3] Blaabjerg F (2021) Villum Investigator, Power Electronics for Renewable Energy Systems – WINGRID, Aalborg University
- [4] Adlkofer H (2017). Vice President, Bernstein Conference on EVs and Energy Storage. Automotive System Group

- [5] Saber C (2017) Analysis and optimization of the conducted emissions of an on-board charger for electric vehicles. Electric power. Université Paris Saclay (COMUE), 2017. English. (NNT : 2017SACLN034). (tel-01646796)
- [6] European Commission, Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study, 2020
- [7] Volke, A. (2012). IGBT modules : technologies, driver and application.
- [8] Zampori, L., et Pant, R., Méthode de l'empreinte environnementale de produit (PEF), EUR 29682 FR, Office des publications de l'Union européenne, Luxembourg, 2019, ISBN 97 8-92-76-00653-4, doi : 10.2760/265244, JRC115959.
- [9] Boubakr Rahmani, Maud Rio, Yves Lembeye, André Andreta, Jean-Christophe Crebier. Opportunités de la modularité pour l'écoconception de convertisseurs de puissance. 4ème SYMPOSIUM DE GENIE ELECTRIQUE (SGE 2021), Jul 2021, Nantes, France. (hal-03304646)
- [10] Ikonen, Mika. "Power cycling lifetime estimation of IGBT power modules based on chip temperature modeling." (2012).
- [11] Nausicaa Dornic. Élaboration et comparaison de deux modèles de durée de vie des fils d'interconnexion des modules de puissance, l'un basé sur les déformations et l'autre sur les dégradations. Autre. Université Paris Saclay (COMUE), 2019. Français. ffNNT : 2019SACLN043ff. fftel-02438403f
- [12] Infineon, Application Note, "PC and TC Diagrams", 2021, Revision 2.1.
- [13] Infineon (2020) HybridKit Drive Quickstart Manual Quick Start Guide for HYBRIDKIT DRIVE
- [14] System Plus Consulting (2017) Infineon FS820R08A6P2B HybridPACK Drive 750V IGBT Module Power Semiconductor report 571 by Elena Barbarini November 2017 – version 2
- [15] Nordelöf, A., & Alatalo, M. (2017) A Scalable Life Cycle Inventory of an Automotive Power Electronic Inverter Unit. Chalmers 559 University of Technology
- [16] Baudais, B.; Ben Ahmed, H.; Jodin, G.; Degrenne, N.; Lefebvre, S. Life Cycle Assessment of a 150 kW Electronic Power Inverter. *Energies* 2023, 16, 2192. <https://doi.org/10.3390/en16052192>
- [17] H. Wang et al., "Transitioning to Physics-of-Failure as a Reliability Driver in Power Electronics," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 2, no. 1, pp. 97-114, March 2014, doi : 10.1109/JESTPE.2013.2290282.
- [18] Kersten A et al (2019) Inverter and Battery Drive Cycle Efficiency Comparisons of CHB and MMSP Traction Inverters for Electric Vehicles, 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe), pp. P.1-P.12, doi : 10.23919/EPE.2019.8915147
- [19] A. Di Gioia et al., "Design and Demonstration of a Wound Field Synchronous Machine for Electric Vehicle Traction with Brushless Capacitive Field Excitation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 2, pp. 1390–1403, 2018, doi : 10.1109/TIA.2017.2784799.
- [20] ID3 Volkswagen (2021) ID.3 100% électrique, Tarifs au 20 juillet 2021 - Mise à jour au 5 octobre 2021 Année-modèle 2022
- [21] A. Wintrich, U. Nicolai, W. Tursky, et T. Reimann. Application manual power semiconductors. SEMIKRON International GmbH, ressource en ligne, dernière consultation en février 2019.
- [22] Y. C. Gerstenmaier, W. Kiffe and G. Wachutka, "Combination of thermal subsystems modeled by rapid circuit transformation," 2007 13th International Workshop on Thermal Investigation of ICs and Systems (THERMINIC), Budapest, Hungary, 2007, pp. 115-120, doi : 10.1109/THERMINIC.2007.4451758.
- [23] Infineon HybridPACK™ Drive Module FS660R08A6P2FB
- [24] Brandelero, Julio Cezar. Conception et réalisation d'un convertisseur multicellulaire DC/DC isolé pour application aéronautique. PhD, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2015
- [25] T. Kovaltchouk, J. Aubry, B. Multon and H. Ben Ahmed, "Influence of IGBT current rating on the thermal cycling lifetime of a power electronic active rectifier in a direct wave energy converter," 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Lille, France, 2013, pp. 1-10, doi : 10.1109/EPE.2013.6631903.
- [26] E. Özkol, S. Hartmann et H. Duran, "Load-cycling capability of Hi-Pak (TM) IGBT modules 5SYA2043-03", ABB Application note, p. 1–12, 2012.
- [27] Strass, A. Power semiconductor and packaging trends in vehicle electrification. *World Electr. Veh. J.* 2015, 7, 250-260. <https://doi.org/10.3390/wevj7020250>
- [28] Thi Thuy Linh Pham. Contribution à l'étude de nouveaux convertisseurs sécurisés à tolérance de panne pour systèmes critiques à haute performance. Application à un PFC Double- Boost 5 Niveaux. Energie électrique. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2011. Français. fftel-00656620
- [29] K. Fischer et al., "Reliability of Power Converters in Wind Turbines : Exploratory Analysis of Failure and Operating Data From a Worldwide Turbine Fleet," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 7, pp. 6332-6344, July 2019, doi : 10.1109/TPEL.2018.2875005.
- [30] Uwe Scheuermann. How to Define the Adequate Reliability Requirement for a Power Electronic System ? Issue 1 2012 Power Electronics Europe, SEMIKRON Elektronik, Nuremberg, Germany.
- [31] FIDES guide 2009
- [32] Infineon. FIT-Rate Report, FS820R08A6P2x.