

PELCA : un outil collaboratif open-source pour l'analyse de cycle de vie en électronique

Thomas GUILLEMET, Augustin EMPEYROU, Briac BAUDAIS, Tarak GHERSI, Nicolas DEGRENNE
Mitsubishi Electric R&D Centre Europe (MERCE), 1, allée de Beaulieu, 35700 Rennes, France

RESUME – PELCA (acronyme de Power Electronics Life Cycle Assessment) est un logiciel collaboratif open-source permettant de quantifier les impacts environnementaux de dispositifs électroniques s'inscrivant dans une logique d'économie circulaire. En complément de l'évaluation des impacts environnementaux au long du cycle de vie de dispositifs sujets à une maintenance curative, PELCA a récemment été enrichi de nouvelles fonctionnalités permettant d'évaluer la maintenance préventive et de quantifier l'impact économique. Cet article présente la structure de l'outil PELCA, les nouvelles possibilités qu'il offre en termes de simulation, et les perspectives d'amélioration collaborative et de promotion d'un modèle d'économie circulaire qu'il ouvre à destination de la communauté du génie électrique.

Mots-clés — *Economie circulaire, démontabilité, diagnosticabilité, réparabilité, impacts environnementaux, impact économique.*

1. INTRODUCTION

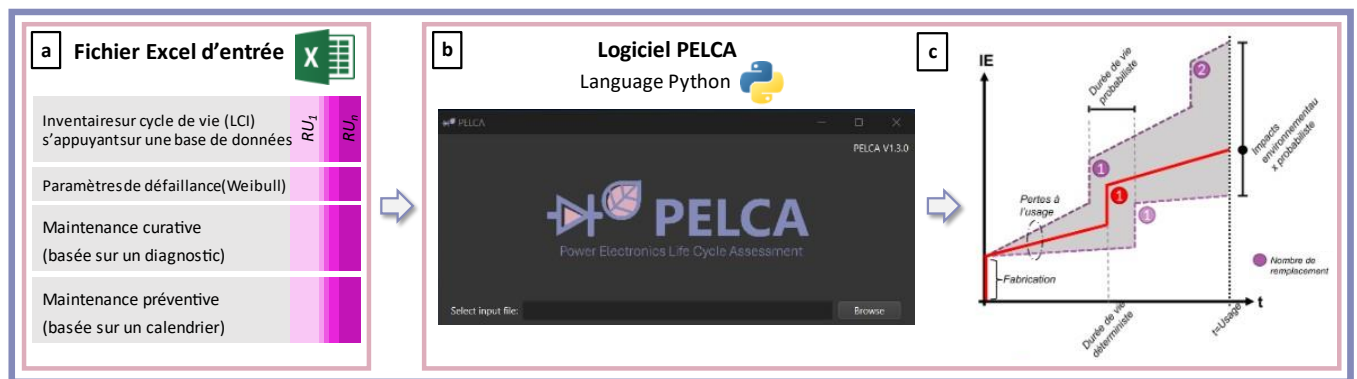
S'ils sont considérés comme des éléments clés de la transition vers une société plus électrifiée et moins dépendante des énergies fossiles, l'utilisation des dispositifs électroniques de puissance pour la conversion d'énergie tend à induire un transfert des impacts environnementaux des émissions directes de gaz à effet de serre vers la dépletion des ressources minérales et les émissions indirectes associées. Ces impacts doivent donc être quantifiés précisément afin de pouvoir identifier les leviers de leur réduction dans l'optique d'une électrification réellement bénéfique sur le plan environnemental. Ces impacts concernent non seulement la fabrication du dispositif, son utilisation, sa fin

de vie, mais également sa maintenance et sa réparation, lorsque celle-ci est possible.

L'introduction, dans les systèmes, de capacités de diagnosticabilité (capacité à identifier l'origine d'un défaut) et de démontabilité améliore la maintenabilité et influe sur les impacts environnementaux au cours du cycle de vie, mais aussi, pour l'utilisateur, sur l'impact économique des dispositifs.

Cette tâche de quantification des impacts, vaste et multidisciplinaire, requiert le concours de nombreux acteurs issus de secteurs variés : recherche académique, équipementiers industriels, centres de réparation et de recyclage. Cette démarche nécessite donc une dynamique de partage de données fiables entre les différents acteurs et la mise en place d'outils open-source collaboratifs à destination de l'ensemble de la chaîne de valeur.

C'est dans ce contexte que des méthodologies ont été développées pour quantifier les impacts environnementaux des dispositifs électroniques lors de leurs phases de fabrication, d'usage et de maintenance [1], en considérant les paramètres de défaillance, le diagnostic et la démontabilité [2, 3]. Ces travaux ont été intégrés dans le logiciel PELCA qui, bien qu'initialement pensé à destination de la communauté de l'électronique de puissance et des équipements associés (onduleurs, convertisseurs), peut être utilisé pour modéliser les impacts environnementaux de tout type de produit ou système sur la base des paramètres permettant de décrire les différentes phases de son cycle de vie. La figure 1 présente l'architecture du logiciel PELCA :



En complément de la maintenance curative [2, 3], basée sur la capacité d'un système à diagnostiquer une défaillance, la version 1.3 du logiciel PELCA intègre désormais la maintenance préventive, basée sur un calendrier préétabli par l'utilisateur. La figure 2 présente l'articulation, au sein de PELCA, des notions de maintenance préventive et de maintenance curative dans une optique de maintenabilité (ou réparabilité) des systèmes.

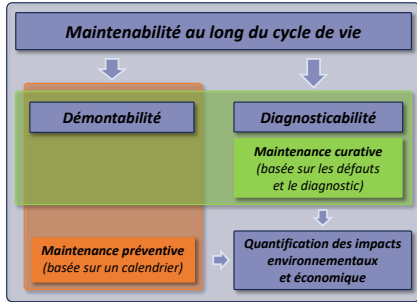


Fig. 2 : Articulation des concepts de maintenance curative et de maintenance préventive dans le cadre du logiciel PELCA.

Le logiciel permet aussi de quantifier, en suivant la même logique de calcul, l'impact économique sur cycle de vie, permettant ainsi de promouvoir la nécessaire transition des équipements d'une logique d'utilisation linéaire vers une logique d'utilisation circulaire. Le développement de ce module complémentaire d'évaluation d'impact économique a été réalisé dans une optique d'amélioration de l'outil existant, et en considérant le caractère fortement impactant, pour les acteurs industriels notamment, du coût / prix des différentes phases du cycle de vie des dispositifs comme un vecteur de changement vers des équipements plus durables.

L'article décrit tout d'abord l'architecture du logiciel PELCA et la structure de son algorithme de calcul. Les modèles de défektivité utilisés, la génération de défauts par tirage aléatoire, ainsi que l'utilisation de la matrice de remplacement dans le cadre de la maintenance curative sont détaillés. Dans un second temps, des résultats de calculs d'impacts environnementaux et d'impact économique sont donnés en exemple. Enfin, le positionnement de PELCA relativement à d'autres logiciels d'ACV ainsi que de potentielles perspectives d'améliorations sont évoquées.

2. ARCHITECTURE LOGICIELLE

PELCA a été développé en utilisant la bibliothèque Brightway2 (codée en langage Python) et s'articule autour de deux éléments principaux : une interface graphique et un fichier de données d'entrée (format Excel) (voir Fig. 1). Un répertoire GitHub en libre accès met à disposition l'ensemble de ces éléments ainsi que les explications associées [4]. Un système est modélisé comme la combinaison d'unités de remplacement (UR), une UR étant représentative du plus haut degré de démontabilité du système. L'algorithme de PELCA intègre de plus une dimension probabiliste par l'intermédiaire d'une capacité de simulation de Monte Carlo.

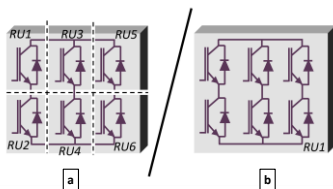


Fig. 3. Exemple de représentation de la notion d'Unité de Remplacement (UR) : (a) Système modulaire comprenant six UR ; (b) Système monolithique ne comprenant qu'une UR unique.

2.1. Architecture logicielle

2.1.1. Algorithme général

L'algorithme général de PELCA est présenté en figure 4 ; il s'applique à chacune des UR constituant le système et à chaque itération de Monte Carlo traitée en parallèle.

A $t = 0$, les impacts environnementaux et économique de la fabrication de l'UR i sont calculés sur la base de l'inventaire de fabrication et des données de coûts/prix (UR neuve, assemblage, désassemblage) compilées par l'utilisateur dans le fichier Excel d'entrée.

A chaque itération de Monte Carlo, des tirages aléatoires sont réalisés à différentes étapes de l'algorithme de façon à déterminer, pour chaque UR :

1. Les types de défauts rencontrés $[d_i^*]$ (défauts de jeunesse, aléatoires, ou d'usure) ainsi que leurs occurrences temporelles $[t_i^*]$; il en résulte la création d'un vecteur de type de défaut $[d^*]$ et d'un vecteur de durée de vie $[t^*]$;
2. Le remplacement ou non de l'UR en question lors de sa défaillance ou lors de la défaillance d'une autre UR sur la base de la matrice de remplacement $[RM]$; il en résulte la création, pour chaque UR, d'un vecteur de taux de remplacement $[r_{i,j}^*]$.

Ces tirages aléatoires sont réalisés à différentes étapes de l'algorithme :

- Au début de chaque itération de Monte Carlo ;
- Suite au remplacement d'une UR dans le cadre d'une maintenance préventive ;
- Suite au remplacement d'une UR dans le cadre d'une maintenance curative.

L'algorithme de PELCA intègre deux types de maintenance, traitées de façon séquentielle dans l'ordre suivant :

Maintenance préventive : basée sur le calendrier de maintenance établi par l'utilisateur dans le fichier Excel d'entrée, la maintenance préventive ne nécessite que la démontabilité du système, sans capacité de diagnostic (voir Fig. 2). Lorsqu'une maintenance préventive intervient, l'UR concernée est remplacée par la même UR neuve. Les impacts environnementaux de la fabrication de l'UR neuve ainsi que l'impact économique de l'opération de maintenance préventive, défini comme la somme des coûts de l'UR neuve, de son désassemblage, et de son réassemblage, s'additionnent alors à leurs totaux respectifs. Suite au remplacement d'une UR dans le cadre d'une maintenance préventive, son âge est remis à 0 ($Age_{RU_i} = 0$). Si la maintenance préventive est désactivée par l'utilisateur, la boucle temporelle passe directement à l'étape de maintenance curative.

Maintenance curative : basée sur les taux de défaillance de chacune des UR et sur la capacité du système à localiser un défaut (ou *diagnosticabilité* du système), la maintenance curative consiste à remplacer une ou plusieurs UR par les mêmes UR neuves lorsqu'une UR fait défaut. La maintenance curative est réalisée sur la base des coefficients de la matrice de remplacement $[RM]$, représentant la probabilité de remplacement de chacune des UR lorsque l'une d'elles fait défaut. La maintenance curative nécessite que le dispositif soit à la fois démontable et diagnosticable (voir Fig. 2).

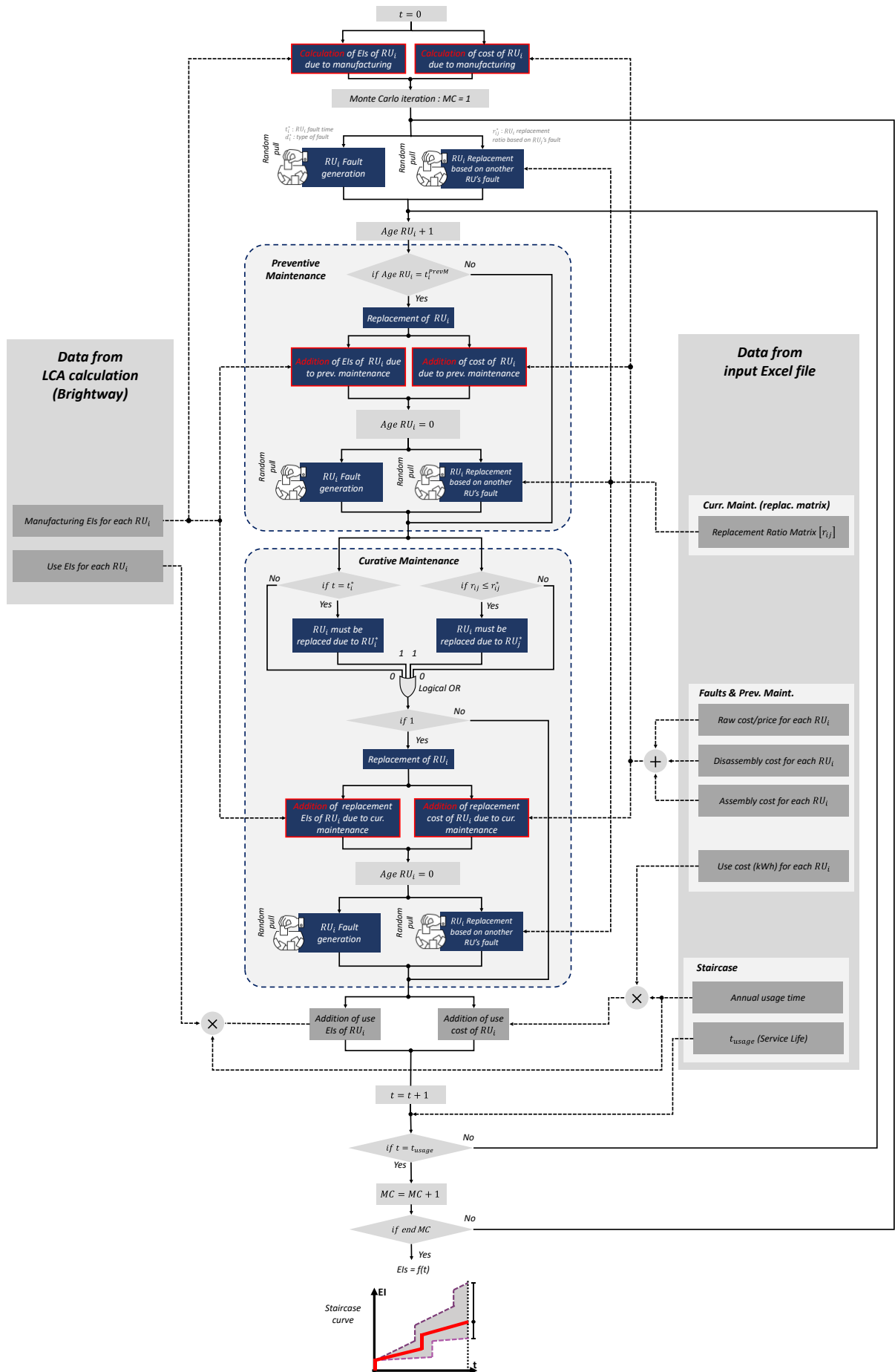


Fig. 4 : Algorithme de quantification des impacts intégré au logiciel PELCA.

Lors d'une étape de maintenance curative, les impacts environnementaux de la fabrication des UR neuves concernées ainsi que l'impact économique de l'opération de maintenance curative, défini comme la somme des coûts des UR neuves, de leur désassemblage, et de leur réassemblage, s'additionnent alors à leurs totaux respectifs. Suite au remplacement d'une UR dans le cadre d'une maintenance curative, son âge est également remis à 0 ($Age\ RU_i = 0$).

Après les éventuelles étapes de maintenances préventive et curative, les impacts environnementaux et économique de l'UR lors de la phase d'usage (induits par les pertes en fonctionnement) sont calculés. En s'accumulant au long du cycle de vie du système, ils forment la pente des courbes en escalier générées par le logiciel (voir Fig. 1).

À la fin de la boucle temporelle, la variable t est incrémentée d'un pas de temps ($t = t + 1$). Cette boucle temporelle se poursuit jusqu'à ce que la durée de vie du système, définie par l'utilisateur, soit atteinte. Lorsque la durée de vie du système a été atteinte, l'indice de l'itération de Monte Carlo est itéré d'une unité ($MC = MC + 1$); le calcul est alors reconduit sur l'ensemble de la durée de vie du système, et ce jusqu'à ce que le nombre d'itérations de Monte Carlo défini par l'utilisateur soit atteint.

2.1.2. Modélisation de la défektivité

Il est établi que l'évolution des taux de défaillance des dispositifs électroniques peut être décrite par l'intermédiaire d'une courbe communément appelée courbe en 'baignoire' [5]. Cette courbe permet de modéliser les différents types de défauts potentiellement rencontrés par un équipement au long de son cycle de vie : défauts de jeunesse (liés à des défauts de conception et/ou de fabrication, en anglais *early* (E)), défauts aléatoires au cours de la phase d'usage (en anglais *random* (R)), défauts d'usure (liés au vieillissement du dispositif, en anglais *wear-out* (W)).

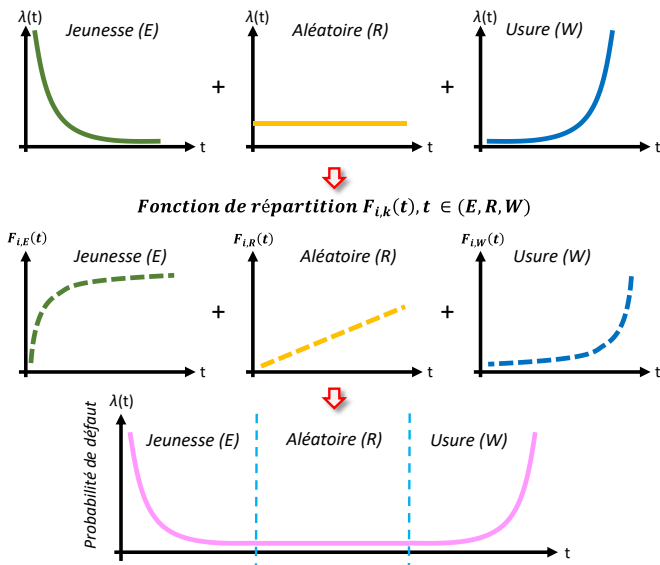


Fig. 5. Modélisation de la courbe de fiabilité 'en baignoire' par l'intermédiaire de trois fonctions de répartition correspondant aux défauts de jeunesse (E), aléatoires (R), et d'usure (W).

Dans le cadre du logiciel PELCA, des fonctions de répartition de Weibull à deux paramètres (σ (paramètre d'échelle, homogène à un temps), β (paramètre de forme)) sont utilisées afin de modéliser les densités de probabilité d'occurrence des différents types de défauts. Ce type de fonction de distribution statistique a été choisi sur la base de sa capacité

à reproduire la forme de la courbe en 'baignoire'. En particulier, la valeur du paramètre β permet de reconstruire les différentes phases du cycle de vie du dispositif : $\beta < 1$ correspond à la phase de jeunesse, $\beta = 1$ à la phase d'usage, et $\beta > 1$ à la phase d'usure. En combinant trois fonctions de répartition de Weibull représentant les défauts de jeunesse (E), aléatoires (R), et d'usure (W), la courbe en 'baignoire' peut être reconstruite, tel qu'illustré sur la figure 5.

Sur cette base, trois fonctions de répartition des taux de défaillance sont calculées pour chacune des UR constitutive du système. Chacun des trois types de défauts intégrés à PELCA peut être activé ou désactivé et les valeurs des paramètres de Weibull correspondants ajustées par l'utilisateur dans le fichier Excel d'entrée.

Initialement, la fonction de répartition totale des taux de défauts ($F_i(t)$), tenant compte des défauts de jeunesse, aléatoires, et d'usure, est calculée pour chaque UR_i sur la base des paramètres de Weibull renseignés par l'utilisateur. Elle s'exprime sous la forme suivante :

$$F_i(t) = 1 - \prod_{k \in (E,R,W)} (1 - F_{i,k}(t)) \quad (1)$$

où chaque fonction de répartition de défaillance ($F_{i,k}(t)$), correspondant aux défauts de jeunesse (E), aléatoires (R), et d'usure (W), suivant une loi de Weibull, s'exprime selon :

$$F_{i,k}(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\sigma_{i,k}}\right)^{\beta_{i,k}}} \quad (2)$$

avec t le paramètre temporel, σ le paramètre d'échelle, et β le paramètre de forme.

2.1.3. Génération de défauts par tirage aléatoire

Une fois la fonction de répartition représentative des taux de défauts $F_i(t)$ établie, un nombre aléatoire X situé entre 0 et 1 est tiré aléatoirement sur la base d'une distribution de probabilité uniforme. Si la condition $F_i(t-1) \leq X \leq F_i(t)$ est satisfaite, l'instant t est considéré comme une occurrence de défaut pour l'UR i , noté t_i^* . Un second nombre aléatoire Y situé entre 0 et 1 est tiré afin de déterminer le type de défaut (de jeunesse, aléatoire, ou d'usure), noté d_i^* , associé à l'instant t_i^* , sur la base des probabilités d'occurrence de chaque type de défaut à l'instant t données par les fonctions de répartition $F_{i,k}(t)$.

La figure 6 illustre le principe de génération des vecteurs de type de défauts $[d_i^*]$ et d'occurrence temporelle de défauts $[t_i^*]$ de l'UR i par tirage aléatoire :

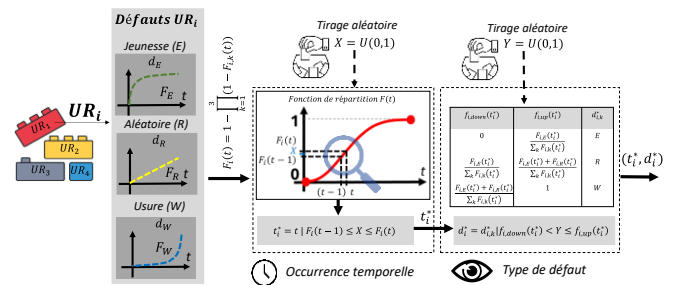


Fig. 6. Illustration du processus de tirage aléatoire permettant de générer les vecteurs d'occurrences temporelles $[t_i^*]$ et de types de défauts $[d_i^*]$.

2.1.4. Maintenance curative et matrice de remplacement

PELCA permet de modéliser la capacité d'un système modulaire, constitué de plusieurs UR, à diagnostiquer un défaut et à être réparé sur la base de ce diagnostic dans le cadre d'une opération de maintenance curative. La diagnosticabilité du système est modélisée par la matrice de remplacement [RM],

dont les coefficients, situés entre 0 et 1, représentent les scénarios de remplacement, à savoir les probabilités de remplacement de chaque UR lorsque l'une d'elles fait défaut.

Pour plus de carté, considérons un système comprenant trois UR ; la matrice de remplacement $[RM]$ qui en résulte est de dimensions 3×3 , comme illustré sur la figure 7.

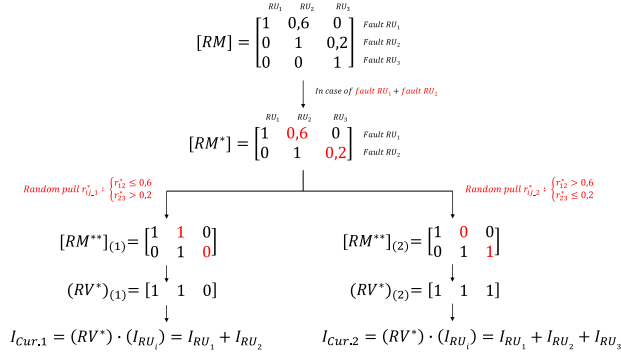


Fig. 7. Illustration de la notion de matrice de remplacement dans le cas d'un système comprenant trois UR.

Les colonnes de la matrice $[RM]$ représentent les différentes UR tandis que les lignes représentent les occurrences de défaut de chaque UR. Dans cet exemple, le coefficient en première ligne, seconde colonne (Fault RU_1 , RU_2) est égal à 0,6 ; le coefficient en seconde ligne, troisième colonne (Fault RU_2 , RU_3) est égal à 0,2. Les coefficients en diagonale de la matrice sont tous égaux à 1 puisque la probabilité de remplacer l'UR i lorsqu'elle fait défaut (Fault RU_i) est fixée à 100 %. Les coefficients restants sont égaux à 0.

Ces coefficients de la matrice $[RM]$ correspondent aux scénarii de remplacements suivants :

- Fault $RU_1 \rightarrow RU_1$ est remplacée avec une probabilité de 100 % et RU_2 est remplacée avec une probabilité de 60 % ;
- Fault $RU_2 \rightarrow RU_2$ est remplacée avec une probabilité de 100 % et RU_1 est remplacée avec une probabilité de 20 % ;
- Fault $RU_3 \rightarrow$ seule RU_3 est remplacée avec une probabilité de 100 %.

Au début de chaque itération temporelle et pour chaque RU i , comme illustré sur la figure 4, un tirage aléatoire de génération de défauts (t_i^* , d_i^*) et un tirage aléatoire de taux de remplacement (r_{ij}^*) sont réalisés en parallèle. Sur la base de ces tirages aléatoires et de la matrice de remplacement $[RM]$, une matrice de remplacement réduite $[RM^*]$ est calculée contenant uniquement les lignes correspondantes aux UR défaillantes. Sur la figure 7, le résultat de ce tirage aléatoire est 'Fault $RU_1 +$ Fault RU_2 ', ce qui conduit à une matrice $[RM^*]$ de dimensions 2×3 . Sur la base de cette matrice de remplacement réduite $[RM^*]$, la figure 7 tente d'illustrer les conséquences de deux tirages aléatoires de taux de remplacement différents :

Tirage aléatoire $r_{ij,1}^*$:

- $r_{12}^* \leq 0,6 \rightarrow RU_2$ est remplacée lorsque 'Fault RU_1 ' se produit $\rightarrow RM^{**}_{12} = 1$
- $r_{23}^* > 0,2 \rightarrow RU_3$ n'est pas remplacée lorsque 'Fault RU_2 ' se produit $\rightarrow RM^{**}_{23} = 0$

Tirage aléatoire $r_{ij,2}^*$:

- $r_{12}^* > 0,6 \rightarrow RU_2$ n'est pas remplacée lorsque 'Fault RU_1 ' se produit $\rightarrow RM^{**}_{12} = 0$

- $r_{23}^* \leq 0,2 \rightarrow RU_3$ est remplacée lorsque 'Fault RU_2 ' se produit $\rightarrow RM^{**}_{23} = 1$

Ces tirages aléatoires conduisent au calcul de deux vecteurs de remplacement (RV^*) dont les valeurs sont déterminées en additionnant les coefficients de chaque colonne des matrices $[RM^{**}]$ correspondantes ; si cette somme est supérieure à 1, la valeur correspondante du vecteur (RV^*) est plafonnée à 1.

Sur la base du vecteur de remplacement (RV^*), les impacts environnementaux et économique de l'étape de maintenance curative (I_{CUR}) sont calculés selon l'approche suivante :

- Les impacts environnementaux de l'étape de maintenance curative sont égaux à la somme des impacts environnementaux à la fabrication des UR remplacées ;
- L'impact économique de l'étape de maintenance curative est égal à la somme des coûts/prix de la fabrication, de l'assemblage et du désassemblage des UR remplacées.

Pour chaque UR i , le calcul des impacts environnementaux et économique de la maintenance curative sur cycle de vie est réalisé autant de fois que le nombre d'itérations de Monte Carlo fixé par l'utilisateur.

3. EXEMPLES DE RESULTATS

3.1. Impacts environnementaux

PELCA permet de quantifier les impacts environnementaux de dispositifs électroniques sur la base d'inventaire de fabrication et d'usage connus, de paramètres de défaillance définis, et intégrant (ou non) des capacités de diagnosticabilité et de démontabilité.

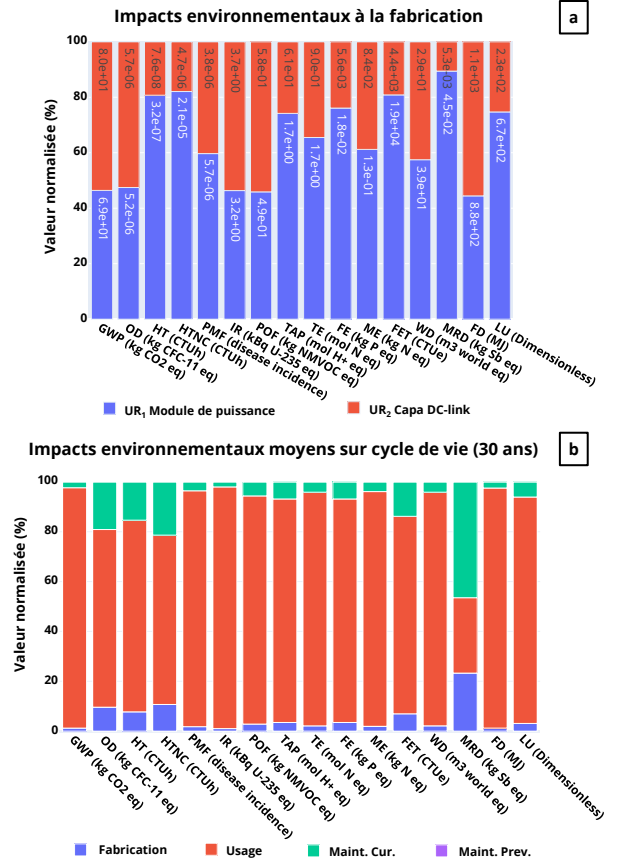


Fig. 8. Exemple de graphiques de résultats présentant : (a) la contribution de chacune des UR aux impacts à la fabrication du système ; (b) la contribution de chacune des phases du cycle de vie du système (toutes UR confondues) aux différents impacts environnementaux moyens.

PELCA est basé sur la méthode *Product Environmental Footprint* (PEF) recommandée par la Commission Européenne et qui permet l'évaluation de seize impacts environnementaux [6]. La figure 8 illustre des exemples de graphiques de résultats fournis par le logiciel pour un système simple composé de deux UR (UR_1 : Module de puissance, UR_2 : Capa DC-link). Les graphiques de la figure 8 permettent d'une part de quantifier les contributions respectives de chaque UR aux impacts environnementaux de la fabrication du système (Fig. 8a), et d'autre part de quantifier les contributions respectives de chaque phase du cycle de vie (fabrication, usage, maintenance préventive, maintenance curative) du système aux impacts environnementaux moyens (Fig. 8b, ici avec la maintenance préventive désactivée).

PELCA donne aussi accès à l'évolution des seize impacts environnementaux au cours du cycle de vie, tel qu'illustré sur la figure 9 par l'impact *Mineral Resource Depletion* (MRD) :

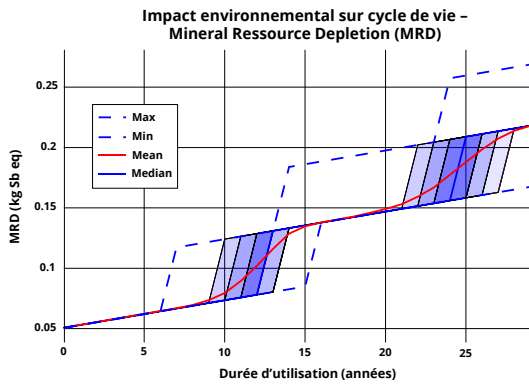


Fig. 9. Evolution de l'impact MRD sur cycle de vie (ici fixé à 30 ans).

On note sur la figure 9 que les courbes moyenne, médiane, minimum et maximum sont tracées par le logiciel ; figurent également sur le graphique les intervalles temporels correspondant à des écarts d'un, deux et trois écarts-types par rapport à la valeur moyenne. Par l'intermédiaire de l'ensemble de ces courbes, PELCA donne accès à une quantification à la fois déterministe et probabiliste de l'impact au cours du temps, ce qui permet d'accroître le degré de confiance dans les résultats obtenus, notamment au regard des degrés d'incertitude que présentent les bases de données classiquement utilisées en ACV.

3.2. Impact économique

PELCA permet désormais, en complément des impacts environnementaux, de quantifier l'impact économique (en termes de coût ou de prix) d'un équipement au long de son cycle de vie en croisant les paramètres de maintenance curative et préventive déjà renseignés dans le cadre du calcul des impacts environnementaux avec les paramètres de coût / prix suivants pour chacune des UR constitutive du système :

- UR neuve ($I_{ECO\ RAW}$, €) ;
- Assemblage ($I_{ECO\ ASS.}$, €) ;
- Désassemblage ($I_{ECO\ DIS.}$, €) ;
- Utilisation (coût d'usage, $I_{ECO\ USE}$, €/kWh).

Sur la base de ces données de coût / prix fournies par l'utilisateur pour chaque UR, l'impact économique des étapes de maintenance curative, de maintenance préventive, et de phase d'usage est calculé selon la logique suivante :

Impact économique du remplacement de l'UR i lors d'une maintenance préventive :

$$I_{ECO\ RU\ i} = \sum_i (I_{ECO\ RAW\ i}, I_{ECO\ ASS.\ i}, I_{ECO\ DIS.\ i}) \quad (3)$$

Impact économique du remplacement des UR impactées lors d'une maintenance curative due à la défaillance de l'UR i :

$$I_{ECO\ RU\ i} = \sum_{i,j} (I_{ECO\ RAW\ i,j}, I_{ECO\ ASS.\ i,j}, I_{ECO\ DIS.\ i,j}) \quad (4)$$

tel que $\begin{cases} t = t_i^* \\ r_{i,j} \leq r_{i,j}^* \end{cases}$

Impact économique de la phase d'usage :

$$I_{ECO\ RU\ i} = \sum_{lifetime} (I_{ECO\ USE\ i} \times E_{CONS.} \times \rho) \quad (5)$$

avec $I_{ECO\ USE}$ le coût d'usage (€/kWh), $E_{CONS.}$ l'énergie électrique consommée par l'UR i (kWh), et ρ le taux d'utilisation annuel de l'équipement (%).

L'impact économique du système dépend des paramètres de coût / prix de chacune des UR, mais également de la durée de vie du système, de son taux d'utilisation, des taux de défaillance des UR qui le constitue, et des scénarii de remplacement qui sont simulés (sans maintenance, avec maintenance préventive, avec maintenance curative). La figure 10 montre l'évolution de l'impact économique ainsi que les impacts totaux sur cycle de vie d'un système à deux UR dans différentes configurations de maintenance curative et préventive :

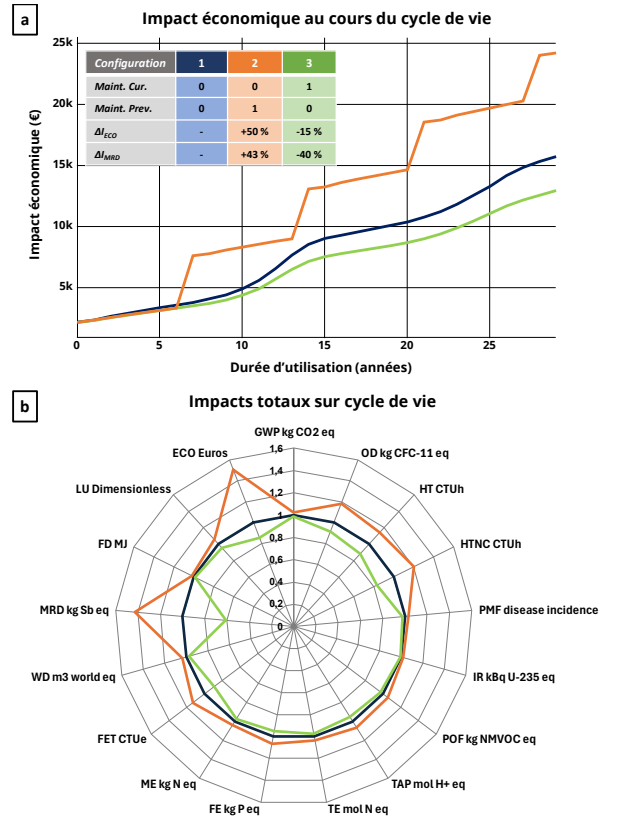


Fig. 10. (a) Evolution de l'impact économique et (b) impacts totaux sur cycle de vie d'un système à deux UR : 1. Sans maintenance (en bleu) ; 2. Avec maintenance préventive (en orange) ; 3. Avec maintenance curative (en vert).

Dans l'exemple choisi, un système démontable et diagnostiquable présente l'impact économique sur cycle de vie le plus faible (courbe verte), alors qu'un système dont la maintenabilité n'est basée que sur des maintenances préventives consistant à remplacer régulièrement les UR est fortement impactant sur le plan économique (courbe orange) ; dans ce cadre, une calibration du calendrier de maintenance préventive au regard des taux de défaut d'usure des différents UR est clé afin d'en limiter l'impact économique.

Il est important de noter que le coût de l'indisponibilité de l'équipement suite à une défaillance n'est pour l'instant pas pris en compte dans le calcul de l'impact économique ; le surcoût de la maintenance préventive doit être mis en regard des bénéfices en termes de 'disponibilité équipement' qu'elle permet. Également, le coût de cette indisponibilité équipement aura tendance à faire augmenter l'impact économique sur cycle de vie d'un système ne comportant aucune capacité de diagnostic et de démontabilité (courbe bleue).

On note par ailleurs que l'introduction d'une capacité de diagnostic (courbe verte) permet, en complément d'un plus faible impact économique, une réduction significative de certains impacts environnementaux (-40 % d'impact sur les ressources minérales (MRD) par exemple) relativement à un système sans capacité de maintenance (courbe bleue).

PELCA permet ainsi, en complément des impacts environnementaux sur cycle de vie, de quantifier l'impact économique d'un équipement ou d'un dispositif sur la base de son profil de mission et de sa maintenabilité. Cette capacité logicielle peut aider à anticiper les bénéfices économiques de la réparabilité des systèmes au regard de leurs conditions d'utilisation, et ainsi encourager la transition vers une logique de circularité de certains équipements électriques et électroniques.

4. POSITIONNEMENT ET PERSPECTIVES D'AMELIORATION

La figure 11 présente un tableau détaillant le positionnement de PELCA vis-à-vis d'autres logiciels d'ACV. Les outils les plus connus sont des logiciels commerciaux (non nommés dans le tableau pour des questions de confidentialité), conçus pour la réalisation d'ACV linéaire de produits et qui ne sont pas pensés pour évaluer les impacts de dispositifs s'inscrivant dans des logiques de circularité. S'ils sont faciles d'utilisation, ils ne permettent pas de dévier des logiques de calcul qui leur sont propres. Le logiciel commercial 2 est notamment utilisé à des fins de standardisation, notamment dans le cadre du programme européen de déclaration environnementale PEP ecopassport.

	MERCE : PELCATM	Brightway 2.0	Logiciel commercial 1	Logiciel commercial 2
				
Objectif	Recherche		Business (déclarations environnementales)	
Accessibilité	Open-source		Propriétaire	
Maturité logicielle	△	△	○	○
Potentiel d'évolution	⊙ Collaboratif	⊙	x	x
Paramètres d'éco-design	○ Taux de défaillance Maintenance curative Maintenance préventive	x	x	x

⊙ : Très mature ○ : Mature △ : En cours de consolidation x : Limité ou inexistant

Fig. 11. Positionnement de PELCA relativement à d'autres logiciels d'ACV.

Brightway est une bibliothèque Python permettant des calculs d'ACV principalement utilisé en recherche car elle donne accès à une forte latitude de programmation, tant en termes de calculs réalisés que de visualisation des résultats. Brightway nécessite néanmoins une certaine maîtrise du langage Python, ce qui peut limiter son potentiel de diffusion. Conscient de cet enjeu, les concepteurs de Brightway ont pensé, en complément, l'interface graphique Activity Browser comme une extension logicielle plus visuelle et facile d'utilisation, même si elle perd en souplesse de programmation.

PELCA, basé sur Brightway, offre une solution de calculs d'impacts environnementaux et économique open-source dédiée au secteur de la recherche. Le logiciel permet d'aller au-delà de l'ACV linéaire, en combinant facilité d'installation et

d'utilisation, fort potentiel d'évolution collaborative, et intégrant des paramètres d'éco-conception tels que les taux de défaillance, la maintenance curative et la maintenance préventive.

En l'état actuel du développement du logiciel PELCA, les perspectives d'amélioration suivantes peuvent être envisagées :

- L'amélioration de la précision des données de fiabilité et de réparabilité des équipements simulés, qui doit passer par un bon niveau de communication et de partage de données entre les différents acteurs de la chaîne de valeur ;
- La prise en compte du coût de l'indisponibilité d'un équipement sur l'impact économique des maintenances préventive et curative, cette durée d'indisponibilité étant typiquement plus importante lors d'une réparation suite à une défaillance que lors d'une maintenance programmée ;
- La prise en compte, dans le cadre de PELCA, de scénarii de fin de vie (recyclage notamment) d'un équipement ;
- L'introduction de nouveaux indicateurs pertinents, tels que l'indice de risque géopolitique d'approvisionnement [7].

MERCE, dans une logique open-source et collaborative, est ouvert à toute proposition de contribution ou d'amélioration de l'outil existant.

5. CONCLUSIONS

PELCA est un logiciel open-source collaboratif permettant la quantification des impacts environnementaux et économique de systèmes modulaires, diagnosticables et réparables. Son objet est de promouvoir une approche d'économie circulaire et de contribuer au développement d'équipements électriques et électroniques plus durables.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier l'ensemble des personnes qui, de par leurs contributions passées ou futures, permettent le développement du logiciel collaboratif PELCA.

7. REFERENCES

[1] B. Baudais, H. Ben Ahmed, G. Jodin, N. Degrenne, et S. Lefebvre, « Life Cycle Assessment of a 150 kW Electronic Power Inverter », *Energies*, 16, 2192, 2023 (doi : <https://doi.org/10.3390/en16052192>).

[2] B. Baudais, H. B. Ahmed, G. Jodin, N. Degrenne et S. Lefebvre, « Environmental Impact of Modular Power Electronics Systems Considering Diagnostic-Driven Unit Replacement », *PCIM Europe 2024; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, Nürnberg, Germany, 3182-3191, 2024 (doi: 10.30420/566262451).

[3] B. Baudais, N. Degrenne, H. B. Ahmed, G. Jodin et S. Lefebvre, « PELCA: An Open-Source Research Power Electronics Life Cycle Assessment Tool », *PCIM Europe 2025; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, Nürnberg, Germany, 2025 (to be published).

[4] Répertoire GitHub MERCE-Fr – PELCA : [merce-fra/PELCA: PELCA - Power Electronics Life Cycle Assessment](https://github.com/MERCE-FR/PELCA)

[5] P. Blanquart et J-C. Roncin, *Fiabilité*. Mar. 1981 (<https://doi.org/10.51257/a-v1-e1420>).

[6] L. Zampori, et R. Pant, « 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, JRC115959 (doi : 10.2760/265244).

[7] J. Santillán-Saldivar, E. Gemechu, S. Muller, J. Villeneuve, S. B. Young, G. Sonnemann, « An improved resource midpoint characterization method for supply risk of resources: integrated assessment of Li-ion batteries », *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 27, 457–468, 2022.