

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

Description du contexte et des résultats attendus

Contexte scientifique et/ou technologique et objectifs de la thèse

L'électronique de puissance est en charge du conditionnement de l'énergie électrique. Cela consiste à convertir les formes d'ondes électriques pour les adapter entre les diverses sources et les diverses charges existantes, le tout en limitant au maximum les pertes et les perturbations générées. Le Plan Climat Français présenté en juillet 2017 visant à accélérer la transition énergétique et climatique dans le monde, place l'économie circulaire au cœur de la transition énergétique et compte atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050. La mobilité, les applications modernes telles que la robotique, les data centers etc. ne sont que des illustrations montrant l'emprise de l'énergie électrique au sein de la société moderne. La gestion et le conditionnement performant de l'énergie électrique sont donc en pleines expansions et mobilisent une forte activité de Recherche & Développement. La conception de systèmes soutenant une activité viable à l'horizon 2050 de l'activité humaine (usage, production, etc.) passe donc par repenser la circularité des flux de matière et d'énergie pour éco-concevoir les produits en optimisant leurs usages.

Depuis plus de 10 ans le G2Elab travaille sur un mode de conception et de réalisation en rupture avec les pratiques courantes de l'électronique de puissance. Ce nouveau mode de réalisation propose de concevoir et de réaliser les fonctions de conversion en mettant en œuvre des briques standards de conversion connectées en série et/ou en parallèle en entrée comme en sortie afin de



Figure 1 : Vues d'un convertisseur
modulaire 3,6kW

couvrir l'ensemble des cahiers des charges de la conversion en électronique de puissance des applications modernes. Cette approche, par l'association de briques fonctionnelles, offre un potentiel de conception et de production modulaire de produits mécatroniques s'inscrivant dans une démarche globale radicalement plus soutenable que ce qui est produit, utilisé et jeté aujourd'hui. Les recherches menées au laboratoire du G-SCOP sont en pointe sur la conception intégrée pour l'économie circulaire, déclinant les conséquences nécessaires sur les systèmes de production des produits multi-physiques associés (mécanique, électronique, robotique, etc.).

La complémentarité de ces deux laboratoires offre un cadre de recherche permettant au doctorant d'explorer les opportunités de la conception modulaire de produits mécatroniques fondés sur des systèmes innovants de convertisseurs statiques, pour tendre vers une circularité des ressources en matière et en énergie au niveau planétaire. Mettre en œuvre une économie circulaire inclue la contrainte des limites planétaires en terme de ressources et d'énergie dépensées et d'impacts générés sur les écosystèmes naturels, que ce soit sur les aspects technologiques en lien avec les composants et les matériaux qu'ils renferment, ou que ce soit sur les aspects économiques en lien avec la structuration de la récupération et l'évaluation de son intérêt financier.

Le projet de recherche s'inscrit dans le cadre d'un projet de valorisation technologique en cours, visant à faire émerger de nouvelles pratiques dans le milieu industriel en électronique de puissance. En ce sens, le projet sera couplé à des travaux en cours dans une start up et en lien avec des industriels, spécialisés dans

la fabrication en série de convertisseurs statiques. Ce lien permettra de se nourrir, tout au long du travail de thèse, du réalisme économique et industriel mais aussi d'avoir accès à davantage de données concrètes.

Programme scientifique

Le défi scientifique consiste à *faire émerger des manières de concevoir et de produire des équipements d'électronique de puissance à partir d'objets mécatroniques, fondés sur des briques standardisées, à fort potentiel de « re-circularité »*

Les verrous à lever sont ambitieux car la plupart des industries "lourdes" en place, le monde de l'électronique de puissance présente un niveau de conservatisme élevé, et l'organisation de la société (ex : modes d'usage, infrastructures) est complexe et longue à faire évoluer. Pour autant, rechercher des approches innovantes comme vecteurs d'évolution des méthodes de production en y intégrant la conception des cycles de vie de ces systèmes et des impacts environnementaux à éviter, est un enjeu majeur en vue de la soutenabilité des modèles actuels. Pour cela 3 axes seront explorés qui correspondent aux premiers verrous identifiés :

Axe 1 : *Quelles opportunités les convertisseurs multicellulaires créent-ils pour rendre circulaire et soutenable l'électronique de puissance intégrée dans les produits mécatroniques ? Comment les rendre opérationnelles?*

L'activité de recherche visera à consolider la convergence entre les innovations conceptuelles dans domaine de l'électronique de puissance menées au G2Elab et les activités de recherche impulsant la circularité de systèmes de production et d'usage menées au G-SCOP. Engager une économie circulaire dans le contexte de l'électronique de puissance aux applications variées peut-être stimulée par une pratique intégrée de l'écoconception des produits mécatroniques visés.

L'axe 1 sera dédié à l'identification des opportunités de tels systèmes éco-conçus, en menant la réflexion de la soutenabilité la plus en amont possible, afin d'inclure dans le périmètre d'étude toutes les activités de production, d'usage, de maintenance, de traitement de fin de vie nécessaires. L'existence de ces opportunités ne fait aujourd'hui aucun doute, mais les lister, les scénariser, et en imaginer les contours représente le contenu du premier volet de la thèse. Ce premier travail sera alimenté par des analyses des cycles de vie (ACV) des convertisseurs d'électronique de puissance mais aussi sur l'analyse des modes de défaillance et de leur criticité (AMDEC) pour ces mêmes convertisseurs. Ces travaux permettront d'élaborer des scénarios stratégiques à intégrer lors de la conception et de la production de convertisseurs statiques par assemblage de briques pour anticiper ses cycles de vie dans une optique de soutenabilité forte.

Axe 2 : *Ce que la circularité impose sur la conception d'une brique standard de conversion, devenant un objet mécatronique d'un dispositif de conversion d'énergie ?*

Le second axe consistera à reprendre la conception de la brique standard en vue d'y intégrer les exigences de l'éco-conception établies sur la base des scénarios de l'axe 1. Ici plusieurs pistes seront à explorer en vue d'atteindre cet objectif. Les premières porteront sur la sélection des composants et sur leurs techniques de mise en œuvre en vue d'éviter ou de minimiser les impacts environnementaux générés pendant leur(s) cycles de vie et d'offrir ces opportunités de circularité. Ces analyses multi-impacts (type ACV) seront à construire, nécessitant une comparaison détaillée des flux de matière et d'énergie inclus dans les différents scénarios. Ces premiers bilans permettront au doctorant d'identifier les composants clés dans le processus de circularité et de rechercher des optimums d'efficacité en fonction d'objectifs de performance au niveau de la brique à se fixer (approche micro) afin d'éviter globalement les impacts environnementaux générés (approche méso).

Ces scénarios seront opérationnalisés via un cas d'étude sur un produit mécatronique. Cette mise en œuvre pratique permettra de mettre en lumière la réutilisation de composants, sous fonctions voire de la brique standard dans une deuxième vie et dans un nouvel équipement, d'étudier la mise en boîtier de cette brique en vue du montage et du démontage simplifié du convertisseur, la prise en compte d'un ensemble complexe d'exigences allant de la connexion électrique de la brique à son refroidissement en passant par sa tenue mécanique tout en minimisant l'impact des matériaux quelle met en œuvre, etc.

Axe 3 : Quels outils et techniques permettraient de valider scientifiquement de ces travaux de recherche ?

Le dernier axe de ce projet est tourné vers la validation de l'apport et de l'intérêt du cycle circulaire appliqué à la réutilisation de composants sous-fonctions ou encore briques standards de conversion. Maitriser la réutilisation dans un nouvel équipement de briques standard usagées implique de connaître l'impact qu'aura la mise en œuvre de briques aux performances/caractéristiques disparates sur les performances et sur la durée de vie de l'équipement dans son ensemble. Cette évaluation nécessite en premier lieu des données sur l'évolution des caractéristiques de la brique standard lors de son vieillissement. Des expérimentations seront donc à mener, dans un premier temps, sur une brique standard afin de construire cette connaissance et construire les modèles de vieillissement nécessaires par la suite. Dans un deuxième temps une expérimentation grandeur nature sera envisagée sous la forme d'un Hardware In the Loop (HIL) qui permettra de substituer des modèles à des segments du processus trop longs ou trop coûteux pour la validation. Cela permettra d'une part d'introduire davantage de réalisme mais aussi de voir comment, sur des périodes longues et non compatibles avec un travail de recherche, les résultats obtenus aux niveaux théoriques pourront évoluer. Ce travail permettra de chiffrer concrètement l'impact de la réutilisation de briques standards. Le lien avec le milieu industriel sera particulièrement appréciable pour ce dernier axe de recherche.

Organisation du travail durant la thèse

Le projet s'organise en trois grandes étapes correspondant aux trois axes détaillés ci-dessus et se déroulera entre les deux laboratoires : G2Elab et G-SCOP.

1^{ère} année :

Etude bibliographique :

- Conception en électronique de puissance (méthodes, composants et matériaux)
- Méthodes d'analyse de cycles de vie, méthodes de conception intégrée, méthodes AMDEC
- Ecoconception, conception multi-cellulaire par assemblages mécatroniques, économie circulaire.

Analyse des opportunités offertes par la conception multi-cellulaire de produits d'électronique de puissance. Application des études ACV et AMDEC au cas concret de l'électronique de puissance multi-cellulaire

2^{ème} année :

Evaluation et comparaison des différents scénarios d'adaptation des conceptions modulaires des systèmes mécatroniques, soutenables : évaluation systémique et multi-indicateur des intérêts économiques et des besoins en développement de production et d'usage. Evaluation des besoins d'évolution de la conception de la cellule standard de conversion et des techniques de mises en œuvre pour différents scénarios d'usage circulaires soutenables. Prise en main d'un cas d'étude (conception, prototypes, essais, etc.)

3^{ème} année :

Validation expérimentale sur un cas concret : application des approches sur une technologie développée dans le cadre du projet EPICUB. Evaluation de l'impact du vieillissement sur le fonctionnement d'un réseau de convertisseur. Extrapolation à l'hypothèse de réutilisation en 2^{ème} vie de brique standard de conversion. Généralisation d'une méthode d'analyse multicritères soutenable pour éco-concevoir des produits modulaires fondés sur les technologies innovantes en électronique de puissance. Le lien avec le milieu industriel deviendra de plus en plus fort avec davantage de couplages ou d'interactions en fonction des travaux et résultats.

Rédaction d'articles de conférences et de revue à partir de la 2^{ème} année.

Personnels impliqués dans l'encadrement :

Yves LEMBEYE PR UGA – G2Elab

Maud RIO MCF UGA – G-SCOP

Jean-Christophe CREBIER DR CNRS – G2Elab