

Sujet de thèse n°1 : entre les laboratoires I2M et G2ELAB

Titre court :

Vers une optimisation de la circularité en électronique de puissance

Life cycle value optimization of Power Electronics: toward best scenario for circularity

Titre long :

Redéfinition produit (convertisseur électrique de puissance) / processus (ligne de désassemblage) pour une valorisation optimale du cycle de vie/ré usage orienté composants et sous-systèmes.

Contexte :

La transition énergétique et climatique consacre le vecteur électricité en lieu et place des énergies fossiles. L'Électronique de Puissance (EP) conditionne l'énergie électrique assurant la liaison entre les sources et les charges. L'EP est très présente dans les systèmes qui nous entourent, assurant des fonctions dont il est difficile de se passer aujourd'hui, notamment pour la production des Énergies Renouvelables comme le photovoltaïque ou l'éolien, mais aussi au niveau des usages avec les différentes mobilités électriques, la climatisation des bâtiments, l'alimentation des systèmes numériques ... Cette tendance à l'accélération des usages de l'électronique fera de l'EP un fort consommateur de matières premières et un contributeur majeur en volumes de déchets électroniques produits par nos sociétés. Si le recyclage en fin de vie peut réduire la pression sur l'extraction des matières premières en réintroduisant une partie des matières recyclées dans la chaîne de valeur, la perspective du réemploi de certains sous-systèmes ou composants, même partiel est essentielle (Fig1). Toutefois, pour que le réemploi en EP puisse être envisagé, il doit : garantir un haut niveau de fiabilité et de robustesse et se saisir de l'opportunité d'une continuité d'offre de services d'usages de biens conçus, de prime abord, avec un fort niveau de réparabilité et en anticipant une préservation de la valeur résiduelle des dispositifs.

Pour répondre à cette problématique réelle, 5 partenaires, 3 académiques et 2 industriels se sont associés dans le cadre du projet ANR VIVAE. L'objectif du projet d'une durée de 42 mois est d'étudier et d'apporter des contributions conceptuelles, méthodologiques et technologiques, pour favoriser l'exploitation et l'extraction de la valeur résiduelle des convertisseurs statiques, en amont de la phase de recyclage. Il s'agit de retarder le recyclage qui correspond à un broyage des composants et donc à une perte fonctionnelle totale ainsi qu'une perte matérielle importante par dissipation de la matière, voire d'exportation des flux de matériaux en dehors de l'Union Européenne. Les laboratoires G-SCOP, I2M et G2Elab apporteront leurs expertises respectives pour relever les défis méthodologiques et technologiques du projet. Les sociétés EATON et OSCARO-POWER apporteront leurs expertises techniques de terrain dans le domaine, tout en confrontant les développements menés en laboratoire au réalisme du monde de l'industrie en relation avec tous les acteurs de la chaîne de valeur concernée. Pour relever les défis du projet, l'équipe de recherche sera structurée autour de deux recrutements en thèse (36 mois) et de deux post-doctorants (12 mois) et une dizaine de stagiaires en projet de fin d'étude.

La présente thèse s'inscrit dans ce cadre avec pour ambition de revisiter la conception des convertisseurs statiques pour favoriser des techniques de désassemblages pour une valorisation optimale en fin de vie.

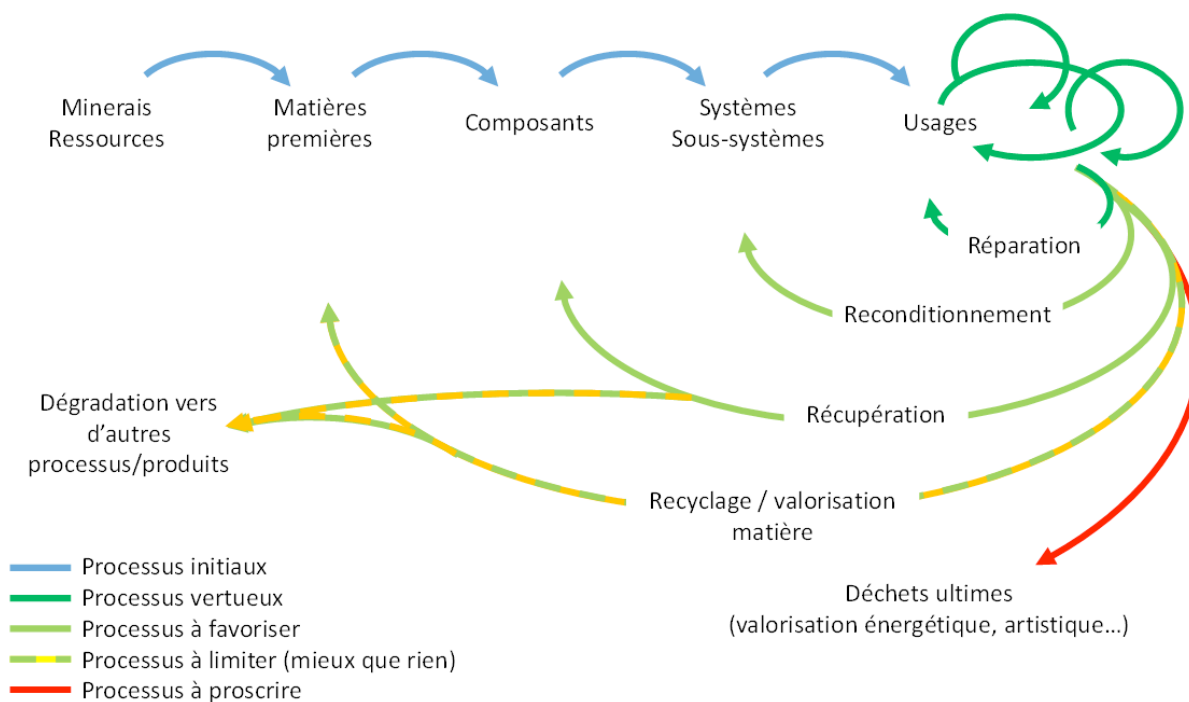


Fig1. Représentation des différents processus de valorisation d'un produit : des processus à proscrire aux processus vertueux.

Sujet de thèse :

Le travail du doctorant s'intéressera au développement couplé de produits et de processus pour la récupération des sous-systèmes et composants d'un convertisseur de puissance dont les valeurs fonctionnelle et matérielle auront été jugées intéressantes selon des facteurs économiques, sociétaux et environnementaux.

Pour atteindre cet objectif, une première analyse de refonte de l'architecture de ce type de système sera menée, en étudiant, d'une part, les opportunités de modularité et de standardisation et, d'autre part, la manière d'exploiter physiquement cette segmentation du produit pour permettre une réparation simple et efficace des éléments à forte valeur résiduelle (économique, matérielle, contenu énergétique) en fin de vie. De nouvelles voies de réparation seront à considérer pour prolonger la durée de vie de ces produits, tout en cherchant à minimiser les impacts environnementaux générés à chaque étape.

Ce travail va lier des choix et solutions de conception par la modularité à l'efficacité de récupération / réparation de ce type de produits. Or cette modularité implique des contraintes : i) de conception (alliant les performances électriques du systèmes et les performances des architectures et connexions entre sous-systèmes et sous-composants) ; ii) de démontage (impacté par les solutions de démontage et leurs effets sur le ou les composants désassemblés) et, iii) de marché (piloté par des besoins en composants ou sous systèmes toujours nécessaires en réparation ou production et l'existence de stocks et fournisseurs / brokers de ces composants).

Les modèles et critères technico-économiques-environnementaux détermineront les valeurs associables aux différents éléments du convertisseur de puissance, alimentant ainsi la décision de valorisation ou de recyclage de ces éléments, contraints par les facilités de récupération.

Les valeurs économiques et environnementales dépendront de la qualité et des performances du(es) composant(s) ou de la (des) sous-pièce récupérée(s) et de la complexité du processus mis en œuvre pour la (les) récupérer. On cherchera alors à proposer des solutions (physiques et numériques) en conception facilitant à la fois un processus d'assemblage et un processus de désassemblage **ne dégradant pas les éléments à forte valeur fonctionnelle ou matérielle**. Ces

solutions de désassemblage / récupération de composants devront être **agiles** pour s'adapter aux différents types de convertisseurs de puissances.

Pour pouvoir proposer les éléments récupérés comme solutions pour réaliser de nouveaux produits ou comme éléments de réparation, il faudra connaître et maîtriser les performances et caractéristiques des composants « d'occasion », récupérés. Ce travail tentera également d'établir des exigences de qualification pour guider les étapes de diagnostic et de test physique ou du modèle numérique avant, pendant ou après le désassemblage.

La valeur des composants de seconde vie dépend également des parties prenantes et de l'ensemble de la chaîne de valeur (brokers, logistique, ...), du marché (demande, prix, ...) et de la capacité à mettre en relation et faire identifier des composants pour des usages (Market places). Ce travail définira la structure de données (liée aux données du produit, aux informations sur la durée de vie et au processus de fin de vie ...) en se projetant sur les nécessaires liens pour aller vers les solutions réelles de valorisation / ré-usage de composants (n'excluant pas les options de recyclage) et leurs business model associés.

3 lignes directrices vont servir à guider ce travail de thèse, et pourront être menées en parallèle :

1. Un travail sur le produit et une revisite des solutions d'architecture de produits en poussant les approches modulaires et de standardisation, considérant les contraintes d'assemblage/désassemblage – réparation – récupération des éléments à forte valeur ajoutée (voir illustration ci-dessous). Il s'agira ici d'élaborer un cahier des charges fonctionnel type du produit et des contraintes associées.

En effet l'un des verrous résidera dans l'identification des limites technico-économico-environnementales d'une telle approche cherchant le point d'équilibre entre une vision tout modulaire (approche LEGO®) et une solution tout intégré (comme actuellement) (Fig.2).

Il s'agira ensuite de proposer des solutions pratiques pour générer des inventaires du cycle de vie, et pour tester les effets de ces scénarios de process industriels « en pratique ».



Fig.2 Comparaison de deux convertisseurs aux fonctionnalités proches, l'un traditionnel, l'autre, fortement modulaire et standardisé.

2. Un travail sur les solutions de désassemblage et le processus de diagnostic / désassemblage automatisé / qualification, complété par une approche d'acquisition d'informations durant le processus pour optimiser les opérations sur les composants aux valeurs résiduelles les plus fortes. Il s'agira d'élaborer un cahier des charges fonctionnel type de la ligne de désassemblage, et des contraintes associées. Puis de proposer des solutions pratiques pour générer des inventaires du cycle de vie et pour tester les effets de ces scénarios de process industriels « en pratique ».

L'un des verrous consiste à formaliser les contraintes associées aux processus de fin de vie pour alimenter la conception optimisée des familles de produits convertisseurs de puissance. Un second

verrou est lié au besoin de s'adapter à des réalités de produits différents (dans leur morphologie ou leur historique) et une recherche de processus robustes, performants mais aussi à faibles coûts relatifs (économiques et environnementaux – via le second travail de doctorat). Cette adaptation aux contraintes du réel, potentiellement non anticipée à priori, nécessite un travail itératif « modélisation-développement-mesure-réajustement ».

3. Un travail sur l'analyse de la chaîne de valeur et des parties prenantes couplée à la définition de structures d'informations et de capacités d'échanges entre ces acteurs pour construire des filières de valorisation des éléments récupérés ou des convertisseurs réparés. Ce système d'information doit aussi s'alimenter dès le début de la définition du produit pour interagir avec les évaluations diverses (entre-autres environnementales issues du travail du second travail de thèse) pour avoir une approche produit / procédé / processus / organisation dans lequel les évaluations de performances techniques / économiques et environnementales sont construites et partagées.

Organisation de la thèse :

Lieu de thèse partagé entre les laboratoires de Grenoble et Bordeaux, dans l'idéal de manière équilibrée (à discuter selon les contraintes personnelles du candidat).

Des échanges avec les industriels situés dans la région Grenobloise sont à prévoir dans le calendrier prévisionnel de thèse, selon les périodes de présence à Grenoble ou à Bordeaux.

Profil recherché idéal :

Compétences en : conception en mécatronique et ingénierie, génie industriel, génie électrique & électronique de puissance, co-botique/robotique,

Le candidat attendu devra démontrer des compétences dans deux ou plus de ces compétences.

Le contexte de thèse s'inscrit dans le cadre de l'économie circulaire. Le candidat devrait montrer un intérêt aux enjeux environnementaux, à la problématique de la soutenabilité, avec une sensibilité en éco-conception et aux outils d'analyse d'impact environnemental.

Date de début de la thèse souhaitée : dès octobre 2021

Dépôt des candidatures : via envoi, a minima, d'un CV et d'une synthèse des motivations, aux contacts suivants :

- Nicolas Perry, laboratoire I2M : nicolas.perry@ensam.eu
- Jean Christophe Crébier, laboratoire G2ELab : jean-christophe.crebier@g2elab.grenoble-inp.fr
- Maud Rio, laboratoire G-SCOP : maud.rio@g-scop.eu

Le recrutement comportera deux étapes : la première sera l'évaluation des candidatures sur la base des CV reçues par mail, puis une audition des candidatures retenues pour la seconde étape, où le candidat aura l'occasion d'échanger avec l'équipe encadrante en présentant son projet.

Sujet de thèse n°2 : entre les laboratoires G-SCOP et G2ELAB.

Titre court :

Vers une conservation de la valeur fonctionnelle pour une électronique de puissance soutenable
Toward Functional Value Preservation for Sustainability in Power Electronics

Titre long :

Développement d'une méthode de conception intégrée favorisant la circularité de systèmes en électronique de puissance : couplage d'indicateurs d'analyse d'impact environnemental et de valeur résiduelle pour envisager, définir et piloter des cycles d'usages soutenables.

Contexte :

La transition énergétique et climatique consacre le vecteur électricité en lieu et place des énergies fossiles. L'Électronique de Puissance (EP) conditionne l'énergie électrique assurant la liaison entre les sources et les charges. L'EP est très présente dans les systèmes qui nous entourent, assurant des fonctions dont il est difficile de se passer aujourd'hui, notamment pour la production des énergies renouvelables comme le photovoltaïque ou l'éolien, mais aussi au niveau des usages avec les différentes mobilités électriques, la climatisation des bâtiments, l'alimentation des systèmes numériques, etc. Cette tendance à l'accélération des usages de l'électronique fait déjà de l'EP un fort consommateur de matières premières et un contributeur majeur en volumes de déchets électroniques produits par nos sociétés. Si le recyclage en fin de vie peut réduire la pression sur l'extraction des matières premières en réintroduisant une partie des matières recyclées dans la chaîne de valeur, la perspective du réemploi de certains sous-systèmes ou composants, même partiel est essentielle. La Fig 1 présente de manière schématique des cycles de vie de systèmes d'EP des plus vertueux—à favoriser pour limiter les impacts environnementaux des systèmes—au moins soutenables même à long terme, à proscrire. Toutefois, pour que le réemploi en EP puisse être envisagé, il doit : garantir un haut niveau de fiabilité et de robustesse et se saisir de l'opportunité d'une continuité d'offre de services d'usages de biens conçus, de prime abord, avec un fort niveau de réparabilité et en anticipant une préservation de la valeur résiduelle des dispositifs.

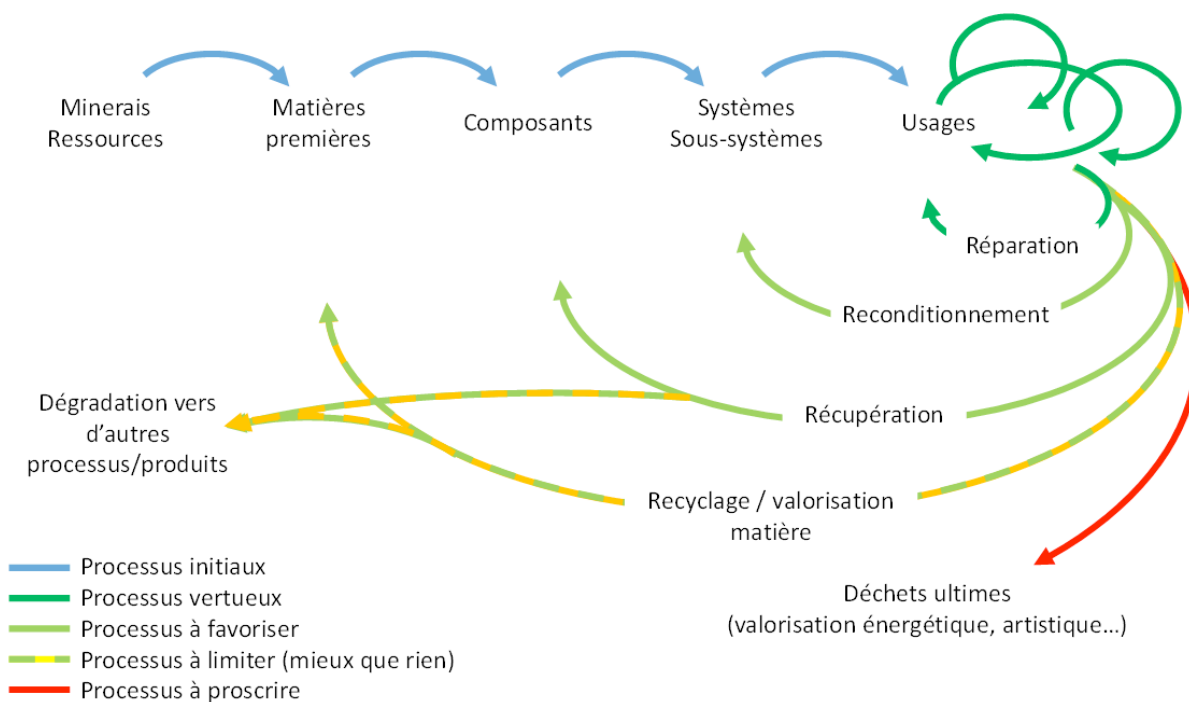


Fig1. Représentation des différents processus de valorisation d'un produit : des processus à proscrire aux processus plus vertueux en terme d'impacts environnementaux. *Note : le taux de renouvellement des systèmes impliqués dans les boucles « à favoriser » conditionne de manière non négligeable leur soutenabilité.*

Pour répondre à cette problématique réelle, 5 partenaires, 3 académiques et 2 industriels se sont associés dans le cadre du projet ANR VIVAE. L'objectif du projet d'une durée de 42 mois est d'étudier et d'apporter des contributions conceptuelles, méthodologiques et technologiques, pour favoriser l'exploitation et l'extraction de la valeur résiduelle des convertisseurs statiques, en amont de la phase de recyclage. Il s'agit de retarder le recyclage qui correspond à un broyage des composants et donc à une perte fonctionnelle totale ainsi qu'une perte matérielle importante par dissipation de la matière, voire d'exportation des flux de matériaux en dehors de l'Union Européenne. Les laboratoires G-SCOP, I2M et G2Elab apporteront leurs expertises respectives pour relever les défis méthodologiques et technologiques du projet. Les sociétés EATON et OSCARO-POWER apporteront leurs expertises techniques de terrain dans le domaine, tout en confrontant les développements menés en laboratoire au réalisme du monde de l'industrie en relation avec tous les acteurs de la chaîne de valeur concernée. Pour relever les défis du projet, l'équipe de recherche sera structurée autour de deux recrutements en thèse (36 mois) et de deux post-doctorants (12 mois) et une dizaine de stagiaires en projet de fin d'étude.

La présente thèse s'inscrit dans ce cadre avec pour ambition de développer une méthode appropriée à l'intégration dans le processus de développement des systèmes d'EP des paramètres clés permettant aux acteurs de la chaîne de valeur de définir les indicateurs pertinents et utiles pour évaluer et piloter des cycles de vie vertueux. Les indicateurs pertinents peuvent être définis comme permettant aux acteurs de faire des liens de cause à effet entre les paramètres qu'ils utilisent dans leurs activités professionnelles (ex : en conception mécatronique, cahiers des charges fonctionnels des systèmes) et les conséquences environnementales (ex : flux de matière et d'énergie intrant/sortant, impacts générés dans l'eau, le sol, l'air). Les acteurs de la chaîne de valeur seront à définir en début de thèse pour que la méthode soit opérationnelle pour un concepteur de systèmes électroniques. Ainsi l'exploration de 4 scénarios complémentaires de

cycles de vie (voir Fig. 2), permettra de définir les contraintes et les variables permettant au concepteur de dimensionner les valeurs potentielles, perdue, évitée, gaspillée et résiduelle dans les systèmes et sous-systèmes en EP tout au long des cycles de vie. La notion d'argus de la valeur fonctionnelle servira comme indicateur dans l'élaboration de scénarios d'usage (prospectifs) en systèmes d'EP afin d'analyser les conséquences en termes d'impacts environnementaux potentiels des solutions de conception proposées. Les analyses multicritères et multi-impact des cycles de vies seront assurées par des méthodes d'ACV de type ISO 14040. La gestion des compromis techniques tout au long du processus de développement des systèmes à concevoir sera fondamental pour piloter les cycles de vie envisagés avec les acteurs des différents domaines concernés.

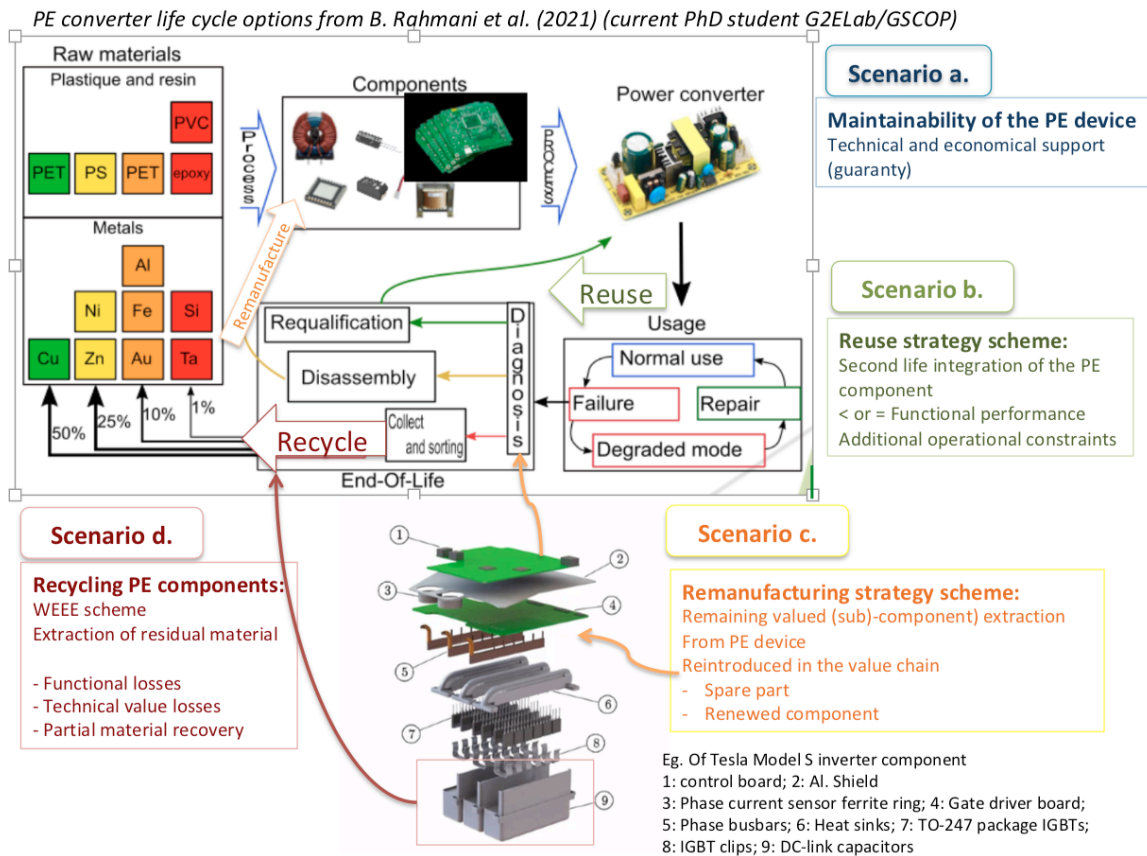


Fig2. Scénarios d'études des systèmes d'EP du projet VIVAE.

En résumé, le travail de doctorat participera au développement de processus de conception intégré permettant une mise en œuvre effective des systèmes circulaires en EP. A moyen terme la méthode aura pour objectif de piloter les entreprises des secteurs concernés par l'EP, dans la conception de cycles de vie maintenant la valeur intrinsèque des dispositifs élevée aussi longtemps que possible au sein du système économique et des acteurs concernés dans ces chaînes de valeur (illustrés sur la Fig. 2). Les cas d'études pratiques avec les partenaires industriels du projet supporteront les tests de validation de la méthode intégrée, du choix des indicateurs pertinents par domaines d'activités et des moyens de pilotage envisagés. Ces étapes de tests « terrain » seront fondamentales pour que la méthode soit opérationnelle et pas uniquement théorique.

Ces travaux visent :

1-Le développement d'une méthode d'intégration des paramètres clés permettant la conception de système d'EP en lien avec les conséquences environnementales qui seront générées

potentiellement dans les cycles de vie envisagés (méthodes d'ACV intégrée, limites des approches ACV attributionnelles, conséquentielles).

2 –**Le choix des indicateurs pertinents et utiles pour les parties prenantes**, notamment pour les **choix de conception** des concepteurs des systèmes d'EP. Ces indicateurs garantissent la possibilité d'une analyse systémique et multicritères permettant d'analyser les effets rebonds potentiels (ou impacts non souhaités) et d'éviter que des dommages environnementaux indésirables et irréversibles ne soient générés à l'avenir, tout en maintenant la valeur intrinsèque de ces systèmes à un niveau élevé, lors du **pilotage** des cycles de vie.

3- **Une validation par des tests « terrain »**, des modèles de cycles de vie théoriques renseignant les hypothèses prises en conception dans l'élaboration des cahiers des charges fonctionnels et dans les équations d'optimisation des performances d'usage des systèmes d'EP modélisés. Les questions techniques soulevées pourront ainsi être évaluées du point de vue environnemental le plus tôt possible au cours du développement de la conception des systèmes en **testant cette méthode intégrée de manière agile** avec les experts des domaines concernés. La pertinence des indicateurs proposés dans la méthode sera ainsi éprouvée. Les cas d'études réels industriels seront déployés au plus tôt pour valider ou invalider les étapes de la méthode et les indicateurs à disposition, ainsi que le périmètre d'acteurs en jeu dans la chaîne de valeur, permettant son usage en industrie.

Organisation de la thèse :

Lieu de thèse partagé entre les laboratoires G2ELab et G-SCOP situés à Grenoble. Des échanges avec les industriels situés dans la région grenobloise sont à prévoir, tout comme des échanges avec l'équipe de Bordeaux.

Profil recherché :

Compétences en : économie circulaire, évaluation environnementale et éco-conception, conception en mécatronique et ingénierie, génie industriel, génie électrique & électronique de puissance.

Le candidat attendu devra démontrer des compétences dans deux ou plus de ces compétences.

Le contexte de thèse s'inscrit dans le cadre de l'économie circulaire. Le candidat devrait montrer un intérêt certain aux enjeux environnementaux, à la problématique de la soutenabilité, avec une pratique d'outils d'analyse d'impact environnementale de type Analyse de Cycle de Vie.

Date de début de la thèse souhaitée : dès octobre 2021

Dépôt des candidatures : via envoi, a minima, d'un CV et d'une synthèse des motivations, aux contacts suivants :

- Nicolas Perry, laboratoire I2M : nicolas.perry@ensam.eu
- Jean Christophe Crébier, laboratoire G2ELab : jean-christophe.crebier@g2elab.grenoble-inp.fr
- Maud Rio, laboratoire G-SCOP : maud.rio@g-scop.eu

Le recrutement comportera deux étapes : la première sera l'évaluation des candidatures sur la base des CV reçues par mail, puis une audition des candidatures retenues pour la seconde étape, où le candidat aura l'occasion d'échanger avec l'équipe encadrante en présentant son projet.