

Style and Design

Sujet de Thèse

Titre :

Intégration des concepts de l'Economie Circulaire au processus de conception amont de prototypes automobiles

Mots clés :

Economie circulaire, Analyse du Cycle de Vie (ACV), éco-conception, recyclage, réemploi, procédés sobres, fabrication additive, hybridation 3D-usinage

Laboratoire d'accueil : Laboratoire Génie Industriel, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay (<http://lgi.centralesupelec.fr>)

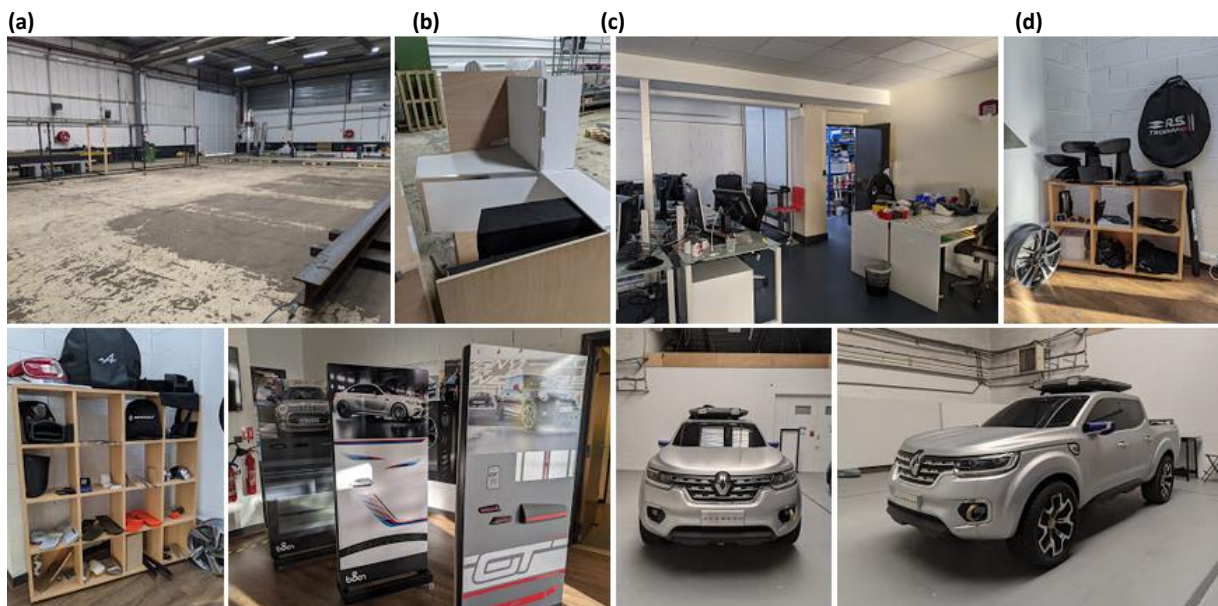
Laboratoire associé : Laboratoire Interdisciplinaire des Sciences du Numérique (LISN), Université Paris-Saclay (<https://www.lisn.upsaclay.fr/>)

Le contexte

Style & Design (<https://www.styleanddesign.fr/>) est une entreprise de 160 personnes, située à Maurepas, ayant agrégé des compétences de design, d'ingénierie mécanique et d'électronique. Ils répondent à trois grands types de marchés, ils sont à la fois :

1. **Fabricant de maquettes**, souvent gigantesques, à la demande d'industriels. Ils conçoivent les prototypes à partir de plans fonctionnels donnés par les clients (Renault, Bombardier, Dassault Aviation...). Ces maquettes servent ensuite de « *concept vehicles* » pour les clients. S&D possède ainsi plusieurs fraiseuses sur portiques pour usiner des mousses polystyrènes ou polyuréthanes, ainsi que des ateliers pour assembler des maquettes telles qu'une rame de train ou un avion de type Falcon. S&D peut aussi proposer à ses clients une amélioration du design du produit, en sus de la réalisation de maquette.
2. **Conception d'aménagements intérieurs**. Il s'agit ici d'une expertise importante de S&D. S&D a par exemple conçu et prototypé un aménagement assez disruptif d'une cabine/siège d'avion de classe premium à l'échelle 1.
3. **Conception de mini-séries de :**
 - **Stickers et autres éléments de décoration** pour les séries limitées automobiles (actuellement environ 160 à 180 000 véhicules en Europe en sont équipés),
 - **Accessoires** véhicules ou aéronautiques.

Le sujet de thèse concerne essentiellement les contextes 1 et 2.



(a) Entrepôt pour assemblage de grande maquette (avion, train...)

(b) Pré-prototype d'un siège avion premium

(c) Le B.E. électronique

(d & e) exemples d'accessoires automobiles

(f) exemples de stickers pour séries limitées automobiles

(g & h) maquette échelle 1 du modèle Alaskan de Renault commercialisé en 2017 en Scandinavie. Il s'agit d'un prototype semi-fonctionnel (tout le corps du véhicule est principalement en mousse PU) construit sur un châssis automobile (la maquette roule mais il n'y a pas de moteur sous le capot), avec des effets de surface similaires à un véhicule réel, et quelques éléments d'électronique à l'intérieur de l'habitacle (vitres transparentes mais les portières ne s'ouvrent pas).

Le constat

La force de S&D tient actuellement dans la qualité des maquettes et le temps de réponse très court (*time to market*) pour produire une maquette en 3 à 6 mois, relativement aux grosses entreprises qui peuvent mettre un an ou plus s'ils la produisent par eux-mêmes. Cependant, si cette *agilité* est la seule valeur ajoutée pour les clients, ceux-ci risquent de considérer les contrats avec S&D comme une variable d'ajustement capacitaire en cas de crise. Par ailleurs, des concurrents à moindre coût, chinois en particulier, sont présents sur le marché.

Après un cycle d'utilisation, les maquettes sont dans le meilleur des cas conservées par le client, mais bien souvent détruites. La confidentialité associée à la plupart des réalisations rend la réutilisation d'éléments délicate (il ne doit subsister aucun « indice » sur les formes du véhicule), ce qui en pratique n'est pas fait actuellement. Les matériaux, en particulier les mousses PU, sont pris en charge par un prestataire local.

Il faut donc rechercher d'autres possibilités de générer de la valeur, valeur pour le client ou valeur interne (augmentation des compétences, capitalisation et réutilisation, amélioration des processus par apprentissage...), proposition de lignes de produits innovantes. Ceci a amené S&D à lancer une thèse de Doctorat sur le sujet.

Objectifs

L'objectif de la thèse est de développer une méthode basée sur les concepts de l'économie circulaire, d'en faire un atout concurrentiel voire un procédé commercialisable en tant que tel.

Selon l'ADEME¹, « ***l'économie circulaire peut se définir comme un système économique d'échange et de production qui, à tous les stades du cycle de vie des produits (biens et services), vise à augmenter l'efficacité de l'utilisation des ressources et à diminuer l'impact sur l'environnement tout en développant le bien être des individus*** ».

Les principaux domaines d'action de l'économie circulaire sont schématisés sur la figure suivante :

¹ <https://www.ademe.fr/expertises/economie-circulaire>



Les 7 piliers de l'Économie Circulaire au sens de l'ADEME²

Le concept d'économie circulaire dans le monde de l'automobile n'est pas nouveau. En effet, pour ne citer qu'elle, l'entreprise Renault applique l'économie circulaire tout au long des différentes étapes du cycle de vie de ses produits³. Néanmoins, l'approche de Renault se situe principalement en aval des étapes de conception d'un véhicule (fabrication/utilisation/fin de vie). Notamment, le groupe s'intéresse à la transformation des pièces et des véhicules en fin de vie en une ressource pour la production et la maintenance des véhicules, en vue de réduire la consommation de matières premières. Plus précisément, Renault privilégie le remplacement des matières premières issues des ressources naturelles par des matières issues du recyclage, à la « réparation facilitée » des véhicules et au réemploi de pièces de voitures en fin de vie.

En amont de la conception d'un véhicule, à savoir l'étape de design, de stylisation et de fabrication des maquettes, la philosophie de l'économie circulaire est encore peu développée. Les savoirs-faires sont autant artistiques que techniques, les réalisations sont des petites séries, voire des modèles uniques, et pour ces raisons les impacts environnementaux sont très peu considérés à ce stade. Ces impacts sont liés à différents facteurs comme la multiplicité des matériaux et procédés utilisés (mousse PU, ossature bois ou métal, peintures, cuirs, traitement de surfaces et procédés de finition...) et le caractère peu recyclable des maquettes.

L'idée générale de la thèse sera d'accompagner S&D dans **l'intégration des concepts de l'économie circulaire au processus de conception de prototypes automobiles.**

Tout au long du processus de conception du prototype automobile nous pouvons identifier les piliers de l'économie circulaire suivants :

² <https://www.ademe.fr/expertises/economie-circulaire>

³ <https://www.renaultgroup.com/nos-engagements/respect-de-lenvironnement/economie-circulaire/>

- **L'approvisionnement durable** : cet axe concerne les matériaux utilisés pour concevoir les prototypes ;
- **L'éco-conception** : cet axe implique que dès la conception du prototype ou de son protocole de fabrication soit pris en compte l'ensemble du cycle de vie du prototype (incluant donc la phase de fabrication, de transport, d'utilisation par le client, de fin de vie) en minimisant les impacts environnementaux. C'est un atout pour la stratégie produit d'une entreprise.
- **L'écologie Industrielle et Territoriale** : cet axe peut amener S&D à réfléchir au bouclage des flux de matières dans un périmètre géographique proche, par exemple en identifiant des possibilités de recyclage ou réutilisation (nouvelle utilisation d'un déchet produit) des mousses PU issues de maquettes en fin de vie.
- **L'allongement de la durée d'usage** : cet axe conduit à identifier des étapes de fabrication du prototype où il est possible d'avoir recours à la réparation ou au réemploi (nouvelle utilisation pour un usage identique, c'est-à-dire un nouveau prototype).
- **Le recyclage** : cet axe vise à transformer les déchets produits pour générer de nouvelles matières premières secondaires.

La démarche scientifique proposée et les livrables attendus

Les livrables attendus sont :

1. Diagnostic « terrain » sur les processus de conception d'un prototype, de la matière première aux différentes maquettes.

Le prototype préfigure la future série ; il est le trait d'union entre les différentes maquettes et le véhicule fonctionnel.

Le/la candidat(e) s'intéressera au Cycle de Vie et au processus de fabrication chez S&D des différentes maquettes successives qui entrent dans la définition d'un prototype (suite d'étapes, entrées, sorties, nature et quantité des matériaux en tant que matières premières et déchets, conditions de mise en œuvre, état de surface, usinabilité, outillage, etc...). L'objectif sera d'identifier et de décrire finement d'une part les différentes briques technologiques du processus de conception mis en œuvre et, d'autre part, les activités de travail, les savoir-faire et les coordinations humaines nécessaires à la mise en œuvre de ces briques technologiques. En particulier, il/elle pourra être amené(e) à réaliser un Material Flow Analysis (MFA) de l'atelier, c'est-à-dire une cartographie des flux de matière, et une Analyse de Cycle de Vie (ACV) d'un ou plusieurs prototypes afin d'identifier les *hostposts*, c'est-à-dire les matériaux, procédés, phases de cycle de vie... qui conditionnent fortement l'impact environnemental et sur lesquels il sera donc pertinent de centrer l'étude. Il/elle pourra également identifier un ensemble

d'indicateurs de circularité qui permettront de diagnostiquer la circularité de l'atelier et de la piloter lors du déploiement des propositions ultérieurement dans la thèse. Une analyse de type SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) permettra de déterminer les options de développement et les axes de recherche qui aboutiront à mieux intégrer les concepts de l'économie circulaire à la fabrication de maquettes de véhicules. Une analyse ergonomique des situations de travail mobilisant des techniques d'observation, d'entretien et de focus groupe viendront compléter ces analyses.

Pour ce faire, le/la candidat(e) s'immergera pendant plusieurs semaines ou mois dans des projets de l'entreprise, afin de comprendre les situations réelles de conception de prototypage (selon les phases) en vue de produire un diagnostic de l'état du système socio-technique⁴ S&D au regard des concept de l'économie-circulaire.

2. Etats de l'art.

La recherche bibliographie devra s'intéresser aux méthodologies, outils et activités de conception et de fabrication de maquettes/prototypes de tout ou partie d'un véhicule ou plus généralement d'un produit, quel que soit son domaine d'utilisation⁵, avec un focus sur l'éco-conception et l'économie circulaire et dans une perspective de circulariser au maximum les flux de matière au sein de l'atelier, de l'entreprise et du territoire (notion de « conception circulaire »). Un focus particulier concernera également les matériaux mis en œuvre en faisant ressortir les propriétés les plus importantes pour l'activité de maquettage dans une optique de recyclage, le recyclage des matériaux utilisés, les procédés d'usinage, qu'ils soient conventionnels ou faisant appel à la Fabrication Additive appliquée aux pièces de grandes dimensions, et ce dans une perspective de minimisation de l'intensité matière (entrée du processus, pertes d'usinage, déchets). Une attention particulière sera portée aux matériaux biosourcés. Pour ce faire, le/la candidat(e) mènera une revue systématique de la littérature scientifique sur ces sujets, sans oublier de considérer les normes et réglementations en lien avec l'économie circulaire. Il/elle devra également procéder à une revue de la littérature sur les théories et méthodes pour outiller son analyse des activités réelles de travail en relation avec la conception et la fabrication de maquettes/prototypes.

3. Identification des questions de recherche

Sur la base des livrables précédents, le/la candidat(e) mettra à jour les manques et besoins de l'entreprise, avérés lors du diagnostic terrain et qui ne trouvent pas de réponses dans la littérature. Ce travail permettra de formuler une ou plusieurs questions de recherche.

⁴ une organisation avec des processus et outils de conception et de fabrication, au sein de laquelle interagissent de nombreux métiers et savoir-faire

⁵ Automobile, ferroviaire, aéronautique, luxe ; même si la thèse sera principalement focalisée sur le secteur automobile, qui représente la majeure partie de l'activité de S&D sur ces prototypes, explorer d'autres secteurs permettra d'ouvrir le champ des possibles.

4. Proposition d'une méthodologie et d'un processus outillés de déploiement de l'économie circulaire chez S&D

A l'issue des phases précédentes, le/la candidat(e) émettra des propositions qui pourront prendre la forme d'un processus ou d'une méthodologie outillée de conception et fabrication d'une maquette, impliquant des bouclages (réemploi, réutilisation, recyclage) à différentes étapes de la chaîne de valeur. Il/elle pourra émettre des recommandations sur des couplages d'un ou plusieurs matériaux en regard de procédés de fabrication (on entend par procédé l'ensemble des étapes de la mise en œuvre des différents éléments d'une maquette à leur assemblage en vue d'une maquette finalisée). D'autres pistes pourront aussi concerner par exemple un modèle de prédiction et de configuration des flux et volumes de matière, en vue d'un réemploi ultérieur sur des volumes plus petits ou encore des modules de formation des collaborateurs (ateliers réflexifs, formation croisée, etc.). En fonction du diagnostic initial, ces propositions pourront concerner l'atelier et les équipes de S&D elles-mêmes, mais également impliquer les fournisseurs et clients de l'entreprise.

Une attention particulière sera portée à la conduite du changement et au management et à l'accompagnement des compétences auprès des équipes de conception et de fabrication. Il est attendu du/de la candidat(e) de contribuer à mettre en place une conduite participative des transformations au sein de S&D, afin que les propositions d'évolutions s'insèrent de manière harmonieuse et concertée au sein de l'entreprise. Ces propositions seront qualifiées et quantifiées (gain de performance environnementale, coûts des éventuels investissements, etc.) .

5. Application et validation des propositions à la conception d'un prototype automobile

Les propositions seront appliquées dans un premier temps sur un périmètre restreint, par exemple un ou plusieurs projets pilotes de l'entreprise, qui pourront aller de l'approvisionnement des matériaux à leur recyclage en passant par la fabrication/réutilisation/réemploi/recyclage d'une maquette réelle. Une Analyse de Cycle de Vie comparative (donc sur une ou plusieurs maquettes relativement similaires) mettra idéalement en évidence les gains environnementaux obtenus. Plus généralement un protocole d'expérimentation sera conçu et déployé par le/la candidat(e) pour avérer les bénéfices obtenus. A l'issue d'une première expérimentation, les propositions pourront être enrichies et améliorées avant d'éventuelles autres expérimentations.

6. Valorisation des travaux

Au-delà de la rédaction du manuscrit de thèse lui-même, le/la candidat(e) sera amené(e) pendant les trois ans de thèse à communiquer et valoriser ses travaux lors de 2 à 4 conférences nationales ou internationales, et à publier 2 à 4 articles dans des revues scientifiques de rang A. Enfin, le/la candidat(e) sera également amené(e) à communiquer et diffuser ses travaux au sein de l'entreprise et éventuellement de ses partenaires.

Le calendrier proposé

- Semestres 1 et 2 : diagnostic terrain, états de l'art et identification des questions de recherche
- Semestre 3 : Formulation des premières propositions
- Semestre 4 : Maturation des propositions, proposition de protocoles expérimentaux et mise en œuvre des premières expérimentations
- Semestre 5 : Amélioration des propositions, poursuite des expérimentations, capitalisation de la démarche et sensibilisation élargie au sein de l'entreprise
- Semestre 6 : Finalisation des expérimentations, rédaction du manuscrit de thèse
- Les publications scientifiques (conférences et revues) s'échelonneront sur l'ensemble de la durée de la thèse.

Profil et compétences du ou de la candidat(e)

Le sujet de cette thèse est à la croisée de 3 disciplines : l'ingénierie de la conception et de fabrication, les matériaux et le développement durable. Bien que le sujet traite de l'économie circulaire, il n'est pas nécessaire que le/la candidat(e) ait des aptitudes particulières en économie ou en sociologie. Le/la candidat(e) pourra avoir un diplôme d'ingénieur ou de master dans un de ces domaines mais il/elle devra démontrer des connaissances, aptitudes et motivations dans plusieurs des autres (voir aussi les compétences ci-après). Le/la candidat(e) devra être capable de « décoder » lors de la phase de diagnostic les flux de matière et modèles de coût de l'entreprise. Il/elle sera idéalement formé(e) aux méthodes et outils de l'économie circulaire, l'éco-conception et l'Analyse de Cycle de Vie, même si des compléments de formation pourront être apportés en début de thèse. Une sensibilité à la prise en compte de l'humain et la compréhension des situations de travail réel dans l'élaboration de nouvelles méthodes et outils de conception est attendue du/de la candidat(e). Des compétences en matériaux et procédés seraient un vrai « plus », dans le sens où le/la candidat(e) devra être capable de caractériser les performances techniques des matériaux et leurs procédés de mise en œuvre, ainsi que leur possible substituabilité et valorisation en fin de vie. En ce sens, un(e) ingénieur(e) en éco-conception formé(e) aux matériaux ou un(e) ingénieur(e) matériaux formé(e) à l'économie circulaire sont des profils que nous recherchons particulièrement, même si nous restons ouverts à d'autres types de profil pertinent au regard des éléments fournis dans ce document.

Les compétences recherchées sont :

- Bon état d'esprit et capacité avérée à faire de la recherche.
- Connaissance des modèles d'ingénierie de la conception et des processus industriels, notamment des approches de conception, de fabrication et d'usinage.
- Connaissance du domaine de l'économie circulaire
- Connaissance du design industriel.
- Connaissance des matériaux (caractérisation, performances, substituabilité) et procédés associés
- Savoir mener des analyses de terrain et mettre en œuvre des expériences.

- La maîtrise de logiciels CAO et CFAO est fortement souhaitable.
- Avoir une expérience de la conception automobile serait un plus appréciable.
- Niveau d'anglais excellent.
- Facilité à l'écriture.
- Grande autonomie mais aptitude au travail d'équipe, esprit d'initiative, excellente maîtrise du temps, aptitude à paralléliser les tâches.

Contexte de la thèse

Le/la doctorant(e) sera encadré(e) côté Style & Design par :

- Julien GONZALO – directeur Concept & Prototype S&D
- Il/elle interagira étroitement avec d'autres acteurs de l'entreprise comme les responsables de projets, de l'atelier de production, ou d'assemblage/modelage

Le/la candidat(e) sera inscrit(e) au sein du Laboratoire Génie Industriel de CentraleSupélec et au sein de l'Ecole Doctorale Interfaces de l'Université Paris-Saclay. Le/la candidat(e) sera encadré(e) par :

- François CLUZEL, maître de conférences en ingénierie de la conception et économie circulaire au Laboratoire Génie Industriel de CentraleSupélec
- Vincent BOCCARA, maître de conférences en ergonomie au Laboratoire Interdisciplinaire des Sciences du Numérique, Université Paris-Saclay, CNRS

Contacts et candidatures : francois.cluzel@centralesupelec.fr

Documents à fournir (susceptible d'évoluer en fonction des souhaits du labo sélectionné)

- Un CV étendu
- Une lettre de motivation
- Un relevé de notes et de diplômes
- Si possible 2 lettres de recommandations
- Si possible un document prouvant votre niveau d'anglais
- Si possible un document démontrant votre aptitude à la recherche scientifique (article, rapport de stage)

Bibliographie indicative

1. **Saidani M.** (2018), Monitoring and advancing the circular economy transition : Circularity indicators and tools applied to the heavy vehicle industry, these de Doctorat, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01954809v2>.
2. **Saidani M., Yannou B., Leroy Y., Cluzel F.** (2020), Dismantling, remanufacturing and recovering heavy vehicles in a circular economy - Technico-economic and organisational lessons learnt from an industrial pilot study. *Resources, Conservation and Recycling*, 156, 104684, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104684>.
3. **Beulque R.** (2019), Business models circulaires : vers des création et captation de valeur pérennes ? Processus et instrumentation : Les enseignements du recyclage et de la réutilisation automobiles, thèse de Doctorat, Mines ParisTech, <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-02367627>.
4. **Aggeri F., Beulque R., Micheaux H.** (2018) Mettre en place une démarche d'économie circulaire, Guide à l'attention des adhérents d'ESR, <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-02094669>.
5. **Kreiger M.A., Mulder M.L., Glover A.G., Pearce J.M.** (2014), Life cycle analysis of distributed recycling of post-consumer high density polyethylene for 3-D printing filament, *Journal of Cleaner Production*, Vol 70 (2014) pp 90-96, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.009>.
6. **Cruz Sanchez F. A.** (2016), Methodological proposition to evaluate polymer recycling in open-source additive manufacturing contexts, these de Doctorat, Université de Lorraine, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01668459>.
7. **Laverne F., Segonds F., Anwer N., & Le Coq M.** (2015), Assembly based methods to support product innovation in Design for Additive Manufacturing: An exploratory case study', *Journal of Mechanical Design*, 137(12), <https://doi.org/10.1115/1.4031589>.
8. <https://www.3dnatives.com/impression-3d-ecologie-21012016/>
9. https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/ademe_le-mag_n124_dossier.pdf



Le laboratoire d'accueil

CentraleSupélec est une Grande Ecole, née en janvier 2015 du rapprochement de l'École Centrale Paris et de Supélec. CentraleSupélec constitue un pôle de référence dans le domaine des sciences de l'ingénierie et des systèmes, classée parmi les meilleures institutions mondiales. Elle est membre-fondateur de l'Université Paris-Saclay. Le Laboratoire Génie Industriel (LGI) de CentraleSupélec est l'un des 16 laboratoires de recherche de CentraleSupélec. Ses objets d'étude sont (1) les systèmes de produits-services mis sur le marché par les entreprises et (2) les systèmes de production ou d'activité actuels et futurs. Ces systèmes, et les processus qui en découlent, sont déclinés tout au long de leur cycle de vie. Il s'agit de savoir les observer, diagnostiquer, concevoir ou améliorer, opérer (exploiter, réguler, maintenir) et recycler. Le LGI est composé de 90 personnes, dont 30 enseignants-chercheurs et 45 doctorants, couvrant les disciplines des sciences de la conception, du génie industriel, de l'automatique, des sciences informatiques, des sciences économiques et de gestion. Le LGI est organisé en quatre équipes de recherche : ingénierie de conception, management des opérations, sécurité et risques, économie durable. Cinq thèmes transverses industriels et sociétaux sont abordés : systèmes de mobilité, systèmes énergétiques, systèmes de santé, industrie du futur, économie circulaire. Enfin, le LGI est fort de onze chaires de recherche.

L'équipe Ingénierie de la conception adresse **la modélisation, l'analyse, la simulation et l'optimisation de systèmes complexes** (produits, processus et organisations). L'objectif est de **promouvoir l'innovation facilitant les transformations économiques, environnementales et sociales**. Les projets de recherche de l'équipe s'inscrivent dans une perspective de **recherche-action** basée sur des collaborations industrielles, partant d'un diagnostic de la situation existante pour proposer des modèles originaux d'un point de vue académique et porteurs de valeurs d'un point de vue industriel. La validation et la vérification de la recherche est toujours réalisée par un déploiement industriel permettant de mesurer son efficacité et son efficacité. Les axes de recherche de l'équipe sont : (1) la conception de systèmes complexes ; (2) la conception de systèmes durables, incluant l'économie circulaire ; (3) l'ingénierie de l'innovation.

Site web sur LGI : <http://lgi.centralesupelec.fr/>

Rapport d'activité 2020 du LGI : <http://lgi.centralesupelec.fr/en/node/218>