

# Thèse CIFRE Manitou / CentraleSupélec, Université Paris-Saclay

—

## Modélisation et optimisation de la collecte, du démantèlement, du reconditionnement et du modèle d'affaire de véhicules lourds pour une économie circulaire soutenable

---

### Informations générales

#### Résumé

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre de la transition écologique pour passer d'une économie linéaire à une économie circulaire des véhicules lourds de manutention, levage et terrassement. Les filières de reconditionnement et de recyclage n'existant pas à l'heure actuelle pour ces types d'engins, il est nécessaire d'identifier et d'accéder aux gisements de véhicules lourds en fin de vie, accidentés, usés ou même devenus obsolètes, de manière à développer plus systématiquement la filière de démantèlement, pour le reconditionnement de composants et d'engins et la revalorisation de la matière. En effet, aucune filière dédiée n'est encore effective et ce malgré l'ampleur du gisement de matières potentiellement recyclables. En ce sens, MANITOU GROUP envisage donc de systématiser le démantèlement de ses engins en fin de vie de manière à (i) systématiser le reconditionnement des composants/pièces qui ont encore de la valeur et revaloriser le reste de la matière, ceci afin d'alimenter un marché de la pièce de rechange remanufacturée, et (ii) s'attaquer au reconditionnement d'engins et de revente d'engins reconditionnés. Cette thèse en génie industriel et économie circulaire, à l'intersection des équipes en ingénierie de la conception et du management des opérations du laboratoire de Genie Industriel de CentraleSupélec, aidera MANITOU GROUP à développer les méthodes et outils apportant des réponses et solutions concrètes aux quatre questions suivantes (qui sont détaillés dans la suite de ce sujet en termes de livrables scientifiques et industriels) : (i) Quel est le volume et la localisation du gisement accessible pour l'activité de démantèlement ? (ii) Comment prédire la valeur, la disponibilité des composants, le potentiel commercial de valorisation post démantèlement, pour dimensionner la partie opérationnelle de l'activité ? (iii) Combien de centres de démantèlement et de reconditionnement d'engins faut-il créer et où, à différents horizons de temps ? (iv) Comment proposer un/des modèle(s) d'affaire circulaire(s) à travers d'offres commerciales adaptées qui prennent en compte ces possibilités de reconditionnement de pièces et d'engins, et ces remontées d'information IoT des engins pour une maintenance plus prédictive ?

## Correspondants académiques CentraleSupélec et industriels Manitou

Nom des responsables du sujet (Université) :

- Prof. Bernard Yannou ([bernard.yannou@centralesupelec.fr](mailto:bernard.yannou@centralesupelec.fr)), Directeur du Laboratoire Génie Industriel de CentraleSupélec
- Dr. Michael Saidani ([michael.saidani@centralesupelec.fr](mailto:michael.saidani@centralesupelec.fr)), Chercheur
- Dr. Ghada Bouillass ([ghada.bouillass@centralesupelec.fr](mailto:ghada.bouillass@centralesupelec.fr)), Chercheuse

Nom des responsables du sujet (Entreprise) :

- Pascal Graff ([p.graff@manitou-group.com](mailto:p.graff@manitou-group.com)), Service Development Director
- Hervé Ouisse ([h.ouisse@manitou-group.com](mailto:h.ouisse@manitou-group.com)), Service Range Manager, Second Hand & Remanufacturing

**Mots-clés :** Economie circulaire, collecte, démantèlement, reconditionnement, modèle d'affaire, véhicules lourds, génie industriel, supply chain management, recherche opérationnelle, revalorisation, analyse coûts-bénéfices

### Organisation du travail et discipline de la thèse :

Le diplôme préparé est une thèse de Doctorat dans la discipline « *Génie Industriel* » ou bien « *Ingénierie des Systèmes Complexes* » et sera une thèse de l'Université Paris-Saclay. Le/la doctorant.e sera inscrit.e à l'Ecole Doctorale Interfaces de l'Université Paris-Saclay et membre du Laboratoire Génie Industriel (LGI) de CentraleSupélec. Le/la doctorant.e passera environ 80% de son temps chez MANITOU GROUP à Ancenis (44) et 20% sur le campus de CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, à Gif-sur-Yvette (91). Le/la doctorant.e sera amené.e à se déplacer, soit au sein des sites de production de MANITOU GROUP, soit pour participer à des conférences scientifiques.

**Démarrage :** 1er novembre ou 1er décembre 2022

## Contexte et description du sujet

### Le contexte des véhicules lourds

Les politiques publiques et la pression réglementaire, notamment à échelle européenne, poussent les acteurs à s'engager sur des stratégies de gestion de fin de vie des produits favorisant le recyclage et la valorisation énergétique. Ces pratiques sont largement déployées pour des flux de déchets spécifiques tels que les Véhicules Hors d'Usages (VHU), les Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques (DEEE), les emballages ou autres pneumatiques et piles et s'appuient sur des filières de valorisation aujourd'hui établies et performantes.

La gestion de certains flux ne fait pas l'objet de cette structuration. C'est le cas notamment des véhicules lourds hors d'usage tels que les poids-lourds, les bus, les engins agricoles, les engins de manutention ou les engins de travaux publics. Ceci s'explique en partie par le fait qu'ils échappent à la directive Européenne VHU 2000/53/CE, dont le périmètre se limite aux véhicules particuliers dont le poids est inférieur à 3,5 tonnes. Aucune filière dédiée n'est encore effective et ce malgré l'ampleur du gisement de matières potentiellement recyclables (ADEME, 2006 ; Saidani et al., 2018). Le Laboratoire Génie Industriel de CentraleSupélec étudie les conditions de démantèlement, reconditionnement et revente de composants et véhicules lourds usagers depuis 2015 (e.g., Saidani et al., 2019).

A l'heure actuelle, les processus de démantèlement visant les véhicules lourds hors d'usage ou inadaptés à la revente sont encore peu industrialisés. Les gammes de démantèlement et les processus associés sont peu

cadrés pour chaque catégorie d'engins. Le démantèlement des véhicules peut être opéré en fonction de la demande de pièces détachées (notamment dans la filière transport), pour autant aucun modèle économique n'a été véritablement validé par les acteurs de la filière. Une fois les véhicules « cannibalisés » (démontés partiellement) ceux-ci sont soit ferrailés (broyage de la carcasse puis tri et enfouissement) soit stockés en l'état, puisque les coûts de traitement et de valorisation, en respectant la réglementation en vigueur, restent trop onéreux pour les acteurs en place. Dans cette approche une grande partie des composants et de la matière ne trouve pas de voie de valorisation ce qui limite l'exploitation du cycle de vie du matériel (soutien, maintenance, reconstruction).

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre de la transition écologique pour passer d'une économie linéaire à une économie circulaire (ADEME, 2015) des véhicules lourds de manutention, levage et terrassement. Les filières de recyclage n'existant pas, il sera nécessaire d'identifier et d'accéder aux gisements de véhicules lourds en fin de vie, accidentés, usés ou même devenus obsolètes, de manière à développer plus systématiquement la filière de démantèlement, pour le reconditionnement de composants et d'engins et la revalorisation de la matière.

## L'entreprise

MANITOU GROUP est une entreprise française basée à Ancenis (44), spécialisée dans la conception, l'assemblage et la distribution de matériel de manutention. Manitou conçoit, assemble et distribue des matériels de manutention, levage et terrassement professionnels dans le monde entier. MANITOU GROUP est une grosse ETI qui emploie 4400 salariés sur 9 sites de production à un réseau de 1050 concessionnaires. MANITOU produit entre 15 000 et 25 000 engins par an, ce qui représente approximativement 90 kilotonnes par an.

Dans un contexte de transition vers des écosystèmes industriels circulaires, en absence de réglementations sur la gestion de fin de vie des véhicules lourds ou des engins de manutention et dans le cadre de sa politique RSE, MANITOU a défini comme une de ses priorités le développement de l'économie circulaire. Cela se fait par l'augmentation de la durée de vie, l'augmentation de la fiabilité des matériels, l'optimisation du Coût Global de Possession (Total Cost of Ownership, TCO) pour le client, et enfin la volonté de revalorisation les engins en fin d'usage.

Sur ce dernier point, MANITOU a donc créé en 2017 la filiale MANITOU GLOBAL SERVICES qui commercialise également une offre alternative de matériels d'occasion.

Le département de pièces de rechanges Manitou commercialise une gamme « ReMAN By Manitou ». Ces pièces de rechange remanufacturées réduisent le coût d'entretien et donnent une deuxième vie à la pièce usagée. Remises en état avec des composants d'origine, elles sont aussi fiables que des pièces neuves, avec une garantie identique.

De plus, le groupe MANITOU a réalisé des études d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) qui ont permis de mettre en évidence les taux de recyclabilité et de valorisation des chariots télescopiques qui sont tous deux de 96%. Tandis que le Bilan carbone a permis de déterminer que 88.9% de l'impact carbone est lié à la phase d'usage. Pour aller plus loin, une première étude pilote sur les temps et coûts de démantèlement de ses engins en fin de vie a été réalisée en 2018, en collaboration avec CentraleSupélec (Saidani et al., 2018). Ce projet a permis d'améliorer la technicité de l'entreprise à démonter une machine : amélioration du coût global et du temps de démontage, définition de sous-ensembles à valeur ajoutée (pièces), et ébauche d'un outil d'aide à la décision.

L'ambition 2022–2025 (vision stratégique) du groupe prévoit d'aller encore plus loin avec l'augmentation du chiffre d'affaires de pièces de rechanges occasions et remanufacturées (PR) de 0.5% à 8% du volume de PR

d'ici 2022–2025, ce qui correspondrait à une augmentation de 1 M€ à 16 M€ sur cette famille de pièces. En ce sens, Manitou souhaite proposer à terme à ses clients et partenaires :

- Élargir l'offre de pièces de rechange d'occasion et/ou remanufacturées ;
- Une offre de reprise de matériels en fin d'usage et de garantir un démantèlement dans les règles de l'art environnemental ;
- Une offre de matériels de manutention d'occasion reconditionnés labellisés (avec des pièces d'occasion reconditionnées) ;
- De réduire le coût total de possession (TCO) des matériels, en valorisant la fin d'usage des matériels.

## Les objectifs industriels de la thèse

MANITOU GROUP envisage donc de systématiser le démantèlement de ses engins en fin de vie de manière à (i) systématiser le reconditionnement des composants/pièces qui ont encore de la valeur et revaloriser le reste de la matière, ceci afin d'alimenter un marché de la pièce de rechange remanufacturée, et (ii) s'attaquer au reconditionnement d'engins et de revente d'engins reconditionnés.

MANITOU GROUP dispose d'un parc de véhicules en usage probablement gigantesque. Avec 430k machines vendues depuis 30 ans (soit 2 Mt en masse), on peut penser que les 180k machines de plus de 15 ans (soit 600 kt en masse, qui est de l'ordre de grandeur du gisement de VHU traités) sont un marché important pour la collecte, le démantèlement et le reconditionnement.

Ce marché, particulièrement attractif en termes de volume de valorisation potentiel, fait cependant face à une situation très particulière : en effet, il est fortement caractérisé par une relation tripartite, impliquant le constructeur, le réseau de vente et l'utilisateur final. Cette spécificité implique une barrière forte, précédemment identifiée, dans le cadre de réflexions sur la valorisation des véhicules lourds hors d'usage, la capacité à identifier, localiser et récupérer ce type de véhicules en proposant un contrat de récupération au client. MANITOU souhaite maintenant étudier d'un point de vue macroéconomique la récupération des matériels en fin de vie, dans le but d'alimenter un circuit de pièces détachées d'occasion et/ou reconditionnées. L'enjeu est d'évaluer l'intérêt environnemental et économique de cette nouvelle activité pour les constructeurs de matériels lourds.

Ces travaux ont pour but / permettront d'accompagner Manitou à :

- Géolocaliser les matériels/engins de manutention en usage et en fin de vie sur le territoire ;
- Caractériser l'état du stock et prédire la valeur et disponibilité/demande des composants/engins ;
- Estimer le potentiel de valorisation post-démantèlement et le « willingness to pay » des clients pour un engin de seconde main ;
- Concevoir et chiffrer des modèles d'affaires circulaires
- Trouver des mécanismes d'approvisionnement des composants à faible délai et distance ;
- Simuler la rentabilité de nouveaux centres de démantèlement et reconditionnement

Manitou est pour l'heure dépourvu de méthodes de modélisation, d'outils d'analyse et de simulation méthodes ou indicateurs pour caractériser et quantifier la faisabilité et les performances économique, environnementale et industrielle de ses activités et projets de reconditionnement. Il fait alors sens pour MANITOU GROUP de se doter de telles ressources et expertises en génie industriel, recherche opérationnelle et économie circulaire, afin de piloter le développement de ses activités de reconditionnement de manière durable.

## Objectifs des travaux de recherche

Pour répondre à ces objectifs industriels, il sera nécessaire de savoir répondre aux quatre questions de recherche suivantes :

1. *Quel est le volume et la localisation du gisement accessible pour l'activité de démantèlement ?*
  - Comment tirer parti d'informations partielles sur l'existence d'engins MANITOU en fin d'usage, sur leur localisation, leur état, leur propriétaire, alors que les engins usagers (avant 2019) ne sont pas dotés de fonctionnalités IoT (Internet of Things) de remontée d'informations ?
  - Tenir compte des contextes géopolitique et commercial de chaque pays pour caractériser l'aptitude à pouvoir collecter ces matériels.
  - **Objectif** : Développer un **modèle de gisement d'engins en fin de vie**
2. *Comment prédire la valeur, la disponibilité des composants, le potentiel commercial de valorisation post démantèlement, pour dimensionner la partie opérationnelle de l'activité ?*
  - Quel serait le niveau de cannibalisation des composants post démantèlement sur la vente des pièces neuves ?
  - Se faire un modèle d'état du stock et de valorisation des composants (dépendant des coûts de démantèlement et remise en état, ainsi que de l'offre/rareté sur le marché et du prix du neuf)
  - Quel est le périmètre des sous-ensembles à remettre en état ?
  - Se faire un modèle de la demande d'engins de seconde main (par pays) et de la tarification ad hoc.
  - **Objectif** : Développer **des modèles de coûts et de prix sur le marché de l'occasion**
3. *Combien de centres de démantèlement et de reconditionnement d'engins faut-il créer et où, à différents horizons de temps ?*
  - Prendre en compte les centres déjà existants de partenaires industriels
  - Etudier leurs modèles économiques et l'éventualité de collaborer avec eux en fonction de qui capte la valeur.
  - Déterminer le schéma logistique optimal des points de démantèlement (localisation / point unique ou multiples, adossement idéal d'un centre de démantèlement avec un centre de production existant)
  - Prendre en compte les pénalités et taxations aux frontières lors du franchissement d'un composant ou d'un engin même usagé (exemple de la Russie).
  - Prendre en compte le recyclage de matière premières : coûts (et carbone, prix revente matière)
  - **Objectifs** : Développer un **modèle de simulation de supply chain de démantèlement et de reconditionnement** intégrant tous les modèles de coûts et de demande. Et proposer un **plan d'investissement industriel** pour le développement d'un certain nombre de centres de démantèlement et de centres de reconditionnement d'engins.
4. *Comment proposer un/des **modèle(s) d'affaire circulaire(s)** à travers d'offres commerciales adaptées qui prennent en compte ces possibilités de reconditionnement de pièces et d'engins, et ces remontées d'information IoT des engins pour une maintenance plus prédictive ?*

- La location et l'occasion pourraient être fortement liées. MANITOU GROUP récupère des parcs et a des matériels à réparer, il serait opportun d'étudier les synergies possibles, et de distinguer clients concessionnaires et clients grands comptes (e.g., Kiloutou et Loxam).
- Comment certains modèles d'affaire pourraient être considérés comme plus circulaires car incitant globalement à rapporter les engins usagés au constructeur MANITOU GROUP, à faire durer plus longtemps les matériels ou à racheter des engins remanufacturés ?
- Quel est le circuit optimal de reconditionnement des composants et de recyclage de matière premières : coûts, empreinte carbone et prix revente composants/matière ?
- **Objectifs** : Proposer un ensemble de **modèles d'affaire circulaires pour la filière des véhicules lourds**. Simuler leur **efficacité en termes économique et en termes de la performance de circularité**. Réaliser **l'étude macroéconomique de la récupération des matériels en fin de vie**, dans le but d'alimenter un circuit de pièces détachées d'occasion et/ou reconditionnées. Construire un **jeu d'indicateurs de circularité adaptés**. Mesurer **l'évolution de la performance de circularité par rapport au gisement**.

Il s'agira de développer un/des modèle(s) lié(s) à des simulations permettant d'aider à déterminer le(s) meilleur(s) scénario(s) économiques (scénario accessible/démarrage, scénario intermédiaire, scénario optimum) à partir de données terrains et d'hypothèses réalistes (modèle de commercialisation (clients, concessionnaires), cartographie des acteurs, coût du démantèlement, coût du transport, pourcentage de machines récupérées adressable en fin de vie, grille de valeurs résiduelles (prix de rachat des machines en fin de première vie), paniers de pièces valorisables sur la machine rachetée en fin de vie, prix de ventes des pièces : occasion et reconditionnement). L'enjeu est l'identification des machines ainsi que la caractérisation du type de revalorisation possible. Par exemple, si MANITOU GROUP souhaite récupérer 10% du parc machine, quels sont les investissements et moyens à mobiliser, quel est le retour sur investissement (ROI), etc. ?

## Résultats et livrables attendus

La thèse de Doctorat aboutira à 7 livrables selon le calendrier suivant :

1. Semestre 1 :
  - Etude terrain et diagnostic industriel
  - Etat de l'art scientifique
2. Semestre 2 :
  - Modèle de gisement d'engins en fin de vie
3. Semestre 3 :
  - Modèles de coûts et de prix sur le marché de l'occasion
4. Semestre 4 :
  - Modèle de simulation de supply chain de démantèlement et de reconditionnement et plan d'investissement industriel
5. Semestre 5 :
  - Modèles d'affaire circulaires pour la filière des véhicules lourds et preuve de leur efficacité en termes économique et en termes de la performance de circularité
6. Semestre 6 :
  - Rédaction de la thèse et révisions des articles de revue soumis

## Valorisation scientifique et technique

La valorisation et la dissémination scientifique et technique des résultats pourront prendre une ou plusieurs des formes suivantes :

- Publications des revues internationales à impact facteur (type Journal of Cleaner Production, ou Journal of Industrial Ecology) ;
- Présentation, si pertinent, lors d'un séminaire de recherche du réseau EcoSD ;
- Possible rédaction et diffusion d'un guide de bonnes/meilleures pratiques facilitant la collecte et la revalorisation d'engins de manutention ;
- Possible note technique sur la réflexion d'une extension de la Directive VHU 2000/53/EC (aspects économiques, techniques pour collecter et reconditionner/recycler/revaloriser certains type de véhicules lourds).

## Profil recherché

Le sujet de cette thèse est à la croisée du Génie Industriel, de la recherche opérationnelle et de l'économie circulaire.

Il est souhaitable que le/la candidat.e soit formé.e au Supply Chain Management (recherche opérationnelle) et à l'économie circulaire. De bonnes connaissances en analyse statistique et construction de modèles de coûts seraient appréciées.

De plus, il est attendu de la part du candidat.e :

- Un goût et une capacité à faire de la recherche.
- Une aptitude à dialoguer avec les acteurs du monde industriel
- Un très bon niveau d'anglais.
- Une facilité à l'écriture.
- Une grande autonomie tout en ayant une aptitude au travail d'équipe,
- un esprit d'initiative, une excellente maîtrise du temps, une aptitude à paralléliser les tâches.

## Pour tout contact

Ecrire à Bernard Yannou ([bernard.yannou@centralesupelec.fr](mailto:bernard.yannou@centralesupelec.fr)), Michael Saidani ([michael.saidani@centralesupelec.fr](mailto:michael.saidani@centralesupelec.fr)), Ghada Bouillass ([ghada.bouillass@centralesupelec.fr](mailto:ghada.bouillass@centralesupelec.fr)), Hervé Ouisse ([h.ouisse@manitou-group.com](mailto:h.ouisse@manitou-group.com)) et Hélène Bourdin ([h.bourdin@manitou-group.com](mailto:h.bourdin@manitou-group.com)) en joignant :

1. Un CV étendu (2 à 10 pages)
2. Une lettre de motivation
3. Un relevé de notes et de diplômes
4. Une copie de papiers d'identité
5. Si possible 2 lettres de recommandations
6. Si possible un document prouvant votre niveau d'anglais
7. Si possible un document démontrant votre aptitude à la recherche scientifique (article, rapport de stage)

Merci de postuler avant le 15 juillet où le comité de sélection effectuera une première analyse et pourra sélectionner un.e candidat.e à l'issue d'un oral. En cas d'insatisfaction, le jury acceptera des dossiers jusqu'au 15 septembre 2022 au soir.

## Références

1. ADEME, **2006**. Etude sur la fin de vie de tous les moyens de transport en France, à l'exception des véhicules couverts par la directive Véhicules Hors d'Usage. Etude réalisée par BioIS pour l'ADEME, Novembre 2006.
2. ADEME, **2015**. Nos expertises, Économie circulaire - ADEME.
3. Bouillass G., 2021. Analyse de durabilité de scénarios de mobilité électrique avec une perspective de cycle de vie. Thèse de Doctorat. Université PSL, thèse préparée à l'école des Mines ParisTech.

4. Chemineau, L., **2011**. Développement d'une méthode d'éco-conception basée sur la modélisation et l'évaluation des filières de valorisation. Application au secteur automobile. ENSAM.
5. Farel, R., Yannou, B., Bertoluci, G., **2013a**. Finding best practices for automotive glazing recycling: A network optimization model. *J. Clean. Prod.* 52, 446–461. doi:10.1016/j.jclepro.2013.02.022
6. Farel, R., Yannou, B., Ghaffari, A., Leroy, Y., **2013b**. A cost and benefit analysis of future end-of-life vehicle glazing recycling in France: A systematic approach. *Resour. Conserv. Recycl.* 74, 54–65. doi:10.1016/j.resconrec.2013.02.013
7. Froelich, D., Haoues, N., Leroy, Y., Renard, H., **2007**. Development of a new methodology to integrate ELV treatment limits into requirements for metal automotive part design. *Miner. Eng.* 20, 891–901. doi:10.1016/j.mineng.2007.04.019
8. Kim H.M., Cluzel F., Leroy Y., Yannou B., Bertoluci G., **2020**. Research perspectives in ecodesign. *Design Science Journal*, 6 (e7), doi: 10.1017/dsj.2020.5.
9. Lamé G., Leroy Y., Yannou B., **2017**. Ecodesign tools in the construction sector: analyzing usage inadequacies with designers' needs. *Journal of Cleaner Production*, 148, 60-72, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.01.173.
10. Maudet, C., Bertoluci, G., **2007**. Decision aid tool and design approach for plastic recycling chain integration in the automotive industry, in: *Proceedings of ICED 2007, the 16th International Conference on Engineering Design*. Paris, pp. 1–13.
11. Maudet, C., Bertoluci, G., Froelich, D., Viot, F., **2006**. A method for recycled plastic integration in the automotive industry, in: *13th CIRP Life Cycle Seminar*. Leuven, pp. 311–316.
12. Saidani M., Kendall A., Yannou B., Leroy Y., Cluzel F., **2018a**. What about the circular economy of vehicles in the U.S.? An extension of the analysis done in the EU by Saidani et al. (2017). *Resources Conservation and Recycling*, 136, 287-288, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.05.007.
13. Saidani M., Yannou B., Leroy Y., Cluzel F., **2018b**. Heavy Vehicles on the Road Towards the Circular Economy: Analysis and Comparison with the Automotive Industry. *Resources Conservation and Recycling, Special Issue on "Circular Economy"*, 135, 108-122, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.06.017.
14. Saidani, M. (**2018c**). Monitoring and advancing the circular economy transition: Circularity indicators and tools applied to the heavy vehicle industry (Doctoral dissertation, Université Paris-Saclay).
15. Saidani M., Kendall A., Yannou B., Leroy Y., Cluzel F., **2019a**. Closing the loop on platinum from catalytic converters: contributions from material flow analysis. *Journal of Industrial Ecology*, 23 (5), 1-16, doi: 10.1111/jiec.12852.
16. Saidani M., Yannou B., Leroy Y., Cluzel F., **2019b**. Management of the end-of-life of light and heavy vehicles in the U.S.: comparison with the European union in a circular economy perspective. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 21, 1449-1461, doi: 10.1007/s10163-019-00897-3.
17. Saidani M., Yannou B., Leroy Y., Cluzel F., Kendall A., **2019c**. A taxonomy of circular economy indicators. *Journal of Cleaner Production*, 207, 542-559, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.10.014.
18. Saidani M., Kim H.M., Yannou B., Leroy Y., Cluzel F., **2019d**. Framing Product Circularity Performance For Optimized Green Profit, In *IDETC/CIE 2019: International Design Engineering Technical Conferences / CIE: Computers and Information in Engineering*, August 18-21, Anaheim, CA, USA.
19. 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, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104684.
20. Saidani M., Pan Z., Kim H., Wattonville J., Greenlee A., Shannon T., Yannou B., Leroy Y., Cluzel F., **2021a**. Comparative life cycle assessment and costing of an autonomous lawn mowing system with human-operated alternatives: implication for sustainable design improvements. *International Journal of Sustainable Engineering*, 14 (4), doi: 10.1080/19397038.2021.1919785.
21. Saidani M., Yannou B., Leroy Y., Cluzel F., Kim H., **2021b**. Multi-tool methodology to evaluate action levers to close-the-loop on critical materials – Application to precious metals used in catalytic converters. *Sustainable Production and Consumption*, 26, 999-1010, doi: 10.1016/j.spc.2021.01.010.
22. Saidani M., Yannou B., Lepochat S., Monteil A., **2021c**. Benchmark des indicateurs de circularité et liens avec l'ACV, étude pour ScoreLCA.
23. UE, **2000**. DIRECTIVE 2000/53/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 18 septembre 2000 relative aux véhicules hors d'usage.

## Le Laboratoire Génie Industriel de CentraleSupélec

Le Génie Industriel est la science du diagnostic, de la modélisation, de la simulation, de la conception, de l'exploitation et de la conduite du changement des systèmes d'activités des organisations (notamment des entreprises). Le Laboratoire Génie Industriel (LGI, <http://www.lgi.centralesupelec.fr/>) de CentraleSupélec a donc pour objets d'étude (1) les systèmes de produits-services mis sur le marché par les entreprises et (b) les systèmes de production ou d'activité des entreprises. 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 (voir son [rapport d'activités](#)) est organisé en 4 équipes de recherche, 5 thèmes transversaux et 10 chaires industrielles. Les 4 équipes sont (IC) Ingénierie de la Conception, (MO) Management des Opérations, (SR) Sureté et Risques, (ED) Economie Durable. Les 5 thèmes transverses industriels et sociétaux sont : systèmes de mobilité, systèmes énergétiques, systèmes de santé, industrie du futur et économie circulaire.

La présente thèse s'inscrit au sein des 2 équipes de recherche (IC) Ingénierie de la Conception, et (MO) Management des Opérations, ainsi que sur le thème Economie Circulaire (EC) :

- En économie Circulaire (EC), le LGI a développé une expertise reconnue en Analyse de Cycle de Vie, Analyse de Flux Matière, écoconception, indicateurs d'économie circulaire, solutions en économie circulaire
- En Ingénierie de la Conception (IC), le LGI a acquis une expertise en optimisation de famille de produits, modèles de Coût Global de Possession (Total Cost of Ownership), plateformisation, MBSE (model-based system engineering), automatisation de la conception, optimisation multicritère et muldi-disciplinaire, ingénierie concourante.
- En Management des Opérations (MO), le LGI a développé une expertise reconnue en Supply Chain Management, en dimensionnement de système industriel, et en analyse coûts-bénéfices.

