

ProGreSS 4.0 : Une plateforme mêlant recherche et enseignement

Pascale Marangé¹, Alexis Aubry¹, William Derigent¹, Eric Levrat¹, Loïc Duverger¹, Rémi Pannequin¹
Eric Collot², Muriel Lombard², Olivier Masschelein², Jennifer Mayo, Jean-Luc Metzger, Olivier Nartz²

^{1,2}{prenom.nom}@univ-lorraine.fr

Adresses :

¹ Université de Lorraine, CNRS, CRAN, F-54000 Nancy, France

² AIP-Primeca Lorraine, Université de Lorraine, 745 Rue du Jardin Botanique - 54600 Villers-lès-Nancy

RESUME : L'industrie 4.0 pose de nouvelles problématiques de recherche qui doivent être abordées également en enseignement. Dans ce contexte, il est nécessaire de sensibiliser les étudiants à ces problématiques via des plateformes intégrant les derniers concepts abordés en recherche et aux dernières technologies aussi proches que possible de la réalité industrielle voire en avance de phase. Les problématiques traitées via cette plateforme portent sur le développement durable, plus particulièrement de régénération et l'utilisation des technologies de l'industrie 4.0. L'objectif de ce papier est de présenter d'une part une plateforme nommée ProGreSS 4.0 en cours de réalisation et d'autre part de montrer le transfert des travaux de recherche en enseignement. Cette plateforme est basée à l'AIP de Lorraine et elle est réalisée conjointement entre les ingénieurs du CRAN et de l'AIPL.

Mots clés : Technologie de l'Industrie 4.0, robotique, automatisation, intégration

1 INTRODUCTION

L'industrie manufacturière doit faire face, ces dernières années, pour fabriquer ses produits à plusieurs problèmes liés à l'approvisionnement en matières premières, relevant d'une part de causes environnementales et d'autre part de causes géopolitiques. Pour les problématiques environnementales, des études socio-économiques montrent que les ressources naturelles s'épuisent et que nos modes de consommation produisent de grandes quantités de déchets [3][8][9]. D'un point de vue sociétal, les changements de comportement sur les modes de consommation devraient être drastiques pour avoir des effets rapides et positifs sur l'environnement. Pour les aspects géopolitiques, la crise sanitaire liée au Covid, et les conflits en cours montrent que l'Europe a mondialisé une trop grande partie de ses approvisionnements en matières premières, ce qui la rend vulnérable en période de crise. Une réponse possible peut venir de l'industrie 4.0 pour mettre en œuvre une économie circulaire qui se focalise sur notre manière de produire, d'utiliser et de mieux revaloriser les produits à la fin de leur phase d'utilisation, afin de consommer moins d'énergie et moins de matières premières [4].

Dans ce contexte, le CRAN de Nancy mène des recherches pour développer des méthodes, modèles et outils adaptés à l'industrialisation de la régénération des produits en fin d'utilisation. Toutes les possibilités (reuse, remanufacturing, recycling, ...) permettant de revaloriser un produit après son utilisation et ainsi repousser sa fin de vie, sont regroupées sous le terme de régénération [6][7]. Les enseignants-chercheurs impliqués dans ces travaux de recherche ont souhaité développer une plateforme leur permettant d'illustrer leurs travaux de recherche mais également permettant de transférer

rapidement ces travaux vers l'enseignement pour sensibiliser les étudiants à ces sujets de développement durable. Pour cela, les enseignants-chercheurs du CRAN se sont rapprochés du pôle AIP-PRIMECA Lorrain (AIPL)¹ membre du GIS S-mart² qui accompagne les enseignants-chercheurs de l'Université de Lorraine afin de mutualiser des moyens dédiés à l'enseignement et à la recherche. Par cette collaboration entre les enseignants-chercheurs et les ingénieurs de l'AIPL, la plateforme ProGreSS 4.0 (PROduction and REGeneration SyStem) [2] a été conçue et est en cours de réalisation.

L'objectif de ce papier est de présenter la plateforme ProGreSS 4.0 ainsi que le transfert des thématiques de recherche en enseignement. Pour cela, le papier est constitué comme suit : La partie 2 présente le produit utilisé, l'architecture de la plateforme ProGreSS 4.0, et les financements obtenus. La troisième partie présente trois thématiques de recherche illustrées sur ProGreSS 4.0 et les enseignements qui en découlent. Enfin une dernière partie conclut le papier et donne des perspectives.

2 PLATEFORME PROGRESS4.0

2.1 Présentation

La plateforme ProGreSS 4.0 a pour finalité de fluidifier la fabrication de produits neufs et/ou régénérés. En effet, un même atelier peut fabriquer des produits neufs, c'est-à-dire composés que d'éléments neufs ou fabriquer des produits régénérés, c'est-à-dire composés de sous-ensembles ou de composants ayant déjà été utilisés.

L'équipe d'enseignants-chercheurs a spécifié les caractéristiques du produit à fabriquer :

- Le produit doit être désassemblable sans détériorer les interfaces
- Le produit doit être personnalisable.

¹ <https://aip-primeca.univ-lorraine.fr/>

² <http://www.s-mart.fr>

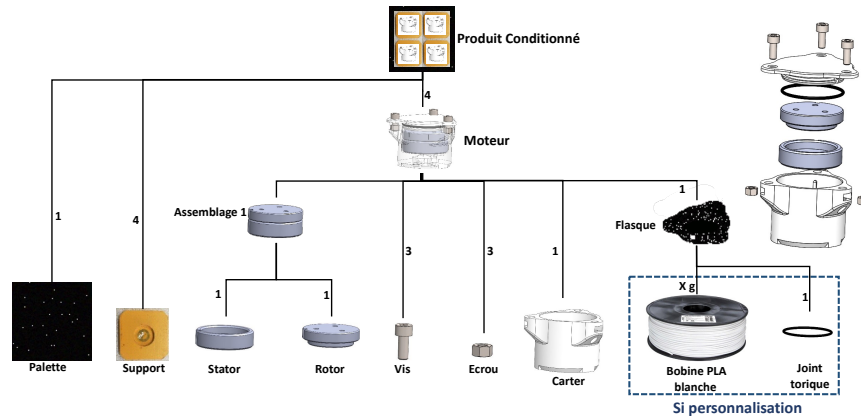


fig 1 : Nomenclature du produit ProGreSS 4.0

- Le produit doit être composé de sous-ensembles ayant des fonctionnalités associées.
- Le nomenclature du produit doit être simple.

La figure 1 représente la nomenclature du produit qui sera fabriqué et régénéré sur ProGreSS 4.0. Il s'agit d'un moteur conditionné par lot de 4. Le moteur est composé d'un rotor et d'un stator. Ce produit est inséré dans un carter réalisé et personnalisable par impression 3D et fermé par un flasque muni d'un joint pour son étanchéité. Ce produit a été pensé pour illustrer 3 concepts : Le produit porteur de son information tout au long de son cycle de vie, la personnalisation de masse des produits et la régénération des produits déchets. Le produit peut être dans quatre états de santé possibles :

- Neuf : tous les composants sont neufs, jamais sortis de l'entreprise
- A : répond aux mêmes exigences fonctionnelles et physiques que le produit neuf
- B : répond aux mêmes exigences fonctionnelles mais l'aspect physique est légèrement dégradé
- C : fonctionnel dégradé (ne peut être revendu tel quel par l'entreprise) OU Physique/Esthétique trop dégradé (rayures trop importantes / oreilles cassées / déformé...)

2.2 Conception et réalisation

L'équipe d'enseignants-chercheurs du CRAN a souhaité pour réaliser cette plateforme, respecter la philosophie défendue dans leurs travaux de recherche. En effet, il a été décidé de régénérer nos anciennes plateformes et d'investir seulement dans des éléments nécessaires à l'intégration du flux, à l'illustration des technologies 4.0 et à la capacité à porter de l'information directement dans le produit. De plus, le système de production se doit d'être agile et écoresponsable pour s'adapter au type de fabrication de produits neufs ou régénérés.

La figure 2 propose un schéma de principe de ProGreSS 4.0 et illustre les flux entre les îlots de fabrication/régénération. La plateforme ProGreSS 4.0 intègre l'ensemble des moyens de production de l'AIP de Lorraine pour la fabrication de produits neufs ou la régénération de produits usagés. Les équipements sont les suivants :

- Robotique mobile (intégrer les flux de produits) : trois robots mobiles OMRON Lynx
- Cellules mobiles de robotique (faciliter la reconfigurabilité) : deux cellules pédagogiques FANUC
- Cobotique (réaliser des tâches en collaboration avec l'Homme) : un cobot YUMI, un cobot UR avec intégration sur un robot mobile Lynx, un cobot UR pour Magasin Automatisé
- Produit intelligent (porter les informations produit) : système RFID, GPS indoor
- Réalité augmentée/virtuelle (Accompagner l'opérateur pour connaître l'état de santé des produits) : un casque de réalité augmentée HoloLens, un casque de réalité virtuelle
- Système flexible de production (assembler le rotor/stator) : déjà présent à l'AIPL

Cette intégration passe par l'utilisation de robots mobiles. Au lieu d'avoir des îlots de fabrication/régénération intégrés dans une ligne d'assemblage reliés par des convoyeurs fixes, l'idée est d'avoir des îlots de fabrication/régénération déplaçables à souhait, selon les produits à fabriquer ou à régénérer, et pour lesquels les robots mobiles assurent la circulation des produits et sous-produits (neufs ou régénérés).

Pour réaliser la plateforme, les systèmes suivants ont du être régénérés :

- Système Flexible de Production : partie opérative non modifiée, seuls les automates ont été rétrofités car la technologie ne répondait plus aux attentes de l'industrie 4.0,
- Système RFID : antennes, lecteurs et micro-puces de dernières générations.

Les autres équipements ProGreSS4.0 ont été financés sur plusieurs années, soit directement par le CRAN, soit par le Master Ingénierie de Systèmes Complexes (soutenu par le CRAN pour sa partie recherche) de la Faculté des Sciences et Technologies de Nancy soit par l'AIP Lorrain. Ce mode de financement multiple montre la collaboration forte entre la recherche et l'enseignement. Le financement est donné par le tableau 1 en indiquant le type de financement et le montant.



fig 2 : Schéma de principe de la plateforme ProGreSS 4.0

Type de Financement	Éléments financés	Montant Financement
Projet CFA Université de Lorraine	Cobot UR avec intégration sur OMRON	75k€
Master ISC	Cobot UR Magasin Automatisé	36k€
Master ISC	GPS indoor	1,5k€
Faculté des Sciences et Technologie	Casque de réalité augmentée HoloLens	4k€
Master ISC	Casque de réalité virtuelle	0,7k€
CPER 2021-2026 (projet HDREAM_FOF)	Magasin robotisé, retrofit SFP	200k€
Master ISC et AIPL	Robotique mobile	54k€

Tableau 1 : Différents financements

2.3 Intégration de la plateforme ProGreSS 4.0

Ayant fait le choix d'utiliser différents équipements, l'intégration a été réalisée par les ingénieurs du CRAN et de l'AIPL. Avec les chercheurs du CRAN, il a été choisi de faire une programmation agent en utilisant l'architecture de la figure 3 (niveau système) et figure 4

(niveau sous-système : exemple assemblage moteur). Chaque élément de l'architecture est constitué d'une ou plusieurs ressource(s) physique(s) avec un comportement de base et d'un agent logiciel avec la capacité de prendre des décisions en fonction des demandes. Ce choix d'intégration a permis à chaque ingénieur de développer une partie de ProGreSS en fonction de ces compétences métier : robotique, automatisme, système d'information et de faire le lien à un niveau plus globale avec trois ingénieurs informaticiens.

3 DE LA RECHERCHE A L'ENSEIGNEMENT

Dans ce contexte d'économie circulaire et de développement durable, des chercheurs du CRAN du département ISET mènent des travaux en lien avec l'industrie 4.0 autour de : la Régénération, le Produit intelligent, le Pilotage hybride de la production. Piloter un système de production et de régénération est a priori plus difficile

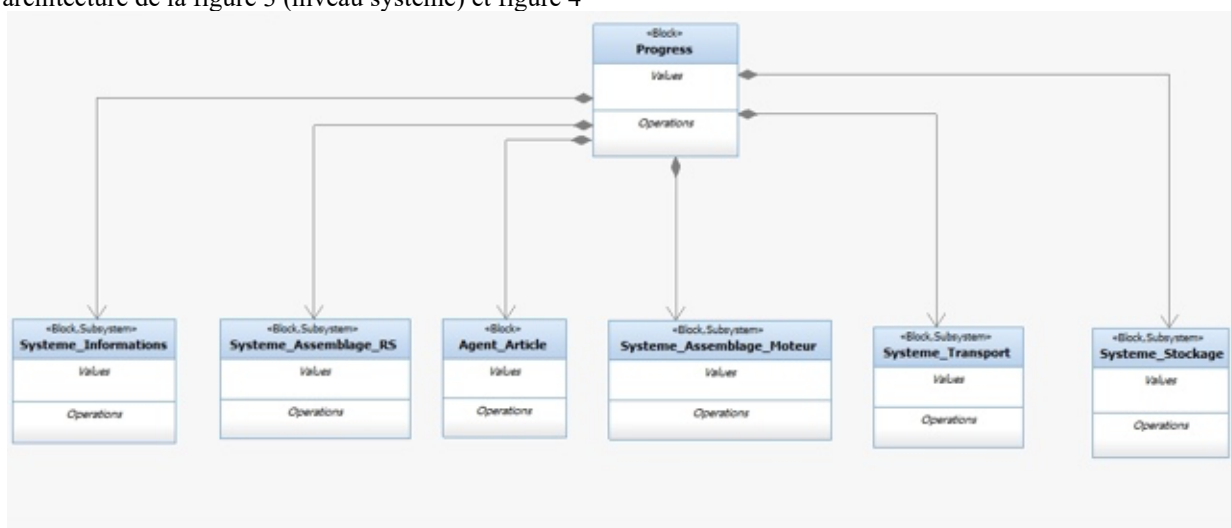


fig 3 : Architecture niveau système Progress

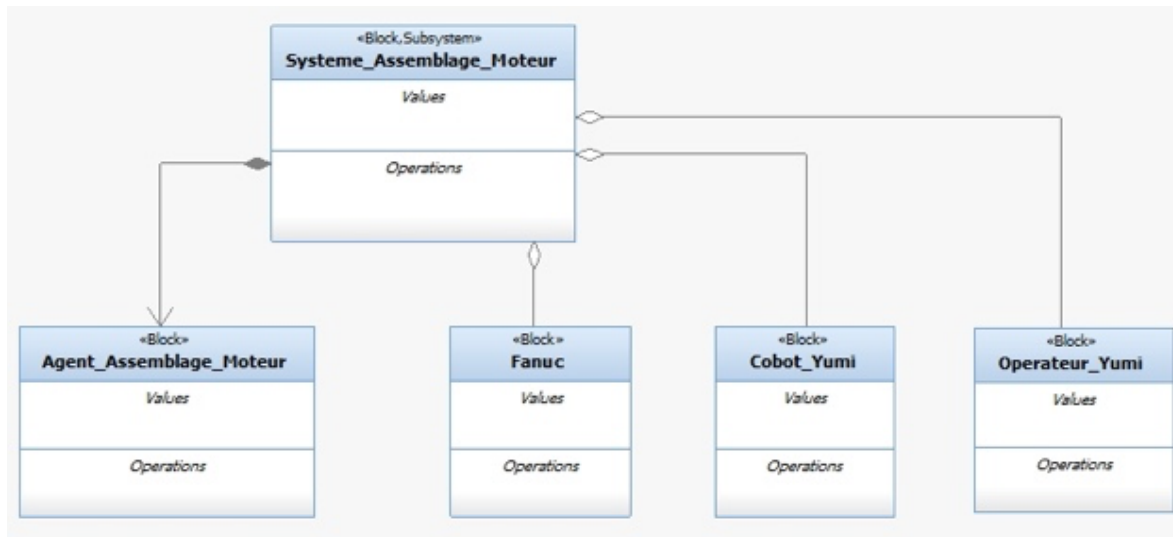


fig 3 : Architecture niveau système Progress et niveau sous-système d'assemblage

que pour un système de production classique. En effet, le système de régénération doit garantir les exigences de qualité des demandes client malgré une variabilité importante de la qualité et des usages passés des produits usagés entrants. Cette haute variabilité implique que 1) la gamme de régénération est non déterminée (nombre d'étapes et opérations nécessaires), 2) le nombre de variantes de nomenclatures possibles d'un produit à n composants élémentaires augmente du fait des différents états de santé de ces composants, 3) le pilotage du système de production est compliqué par le double flux (fabrication/régénération) avec un flux de régénération.

4 DE LA RECHERCHE A L'ENSEIGNEMENT

Dans ce contexte d'économie circulaire et de développement durable, des chercheurs du CRAN du département ISET mènent des travaux en lien avec l'industrie 4.0 autour de : la Régénération, le Produit intelligent, le Pilotage hybride de la production. Piloter un système de production et de régénération est a priori plus difficile que pour un système de production classique. En effet, le système de régénération doit garantir les exigences de qualité des demandes client malgré une variabilité importante de la qualité et des usages passés des produits usagés entrants. Cette haute variabilité implique que 1) la gamme de régénération est non déterminée (nombre d'étapes et opérations nécessaires), 2) le nombre de variantes de nomenclatures possibles d'un produit à n composants élémentaires augmente du fait des différents états de santé de ces composants, 3) le pilotage du système de production est compliqué par le double flux (fabrication/régénération) avec un flux de régénération difficile à anticiper. Afin d'appuyer leurs recherches, ces chercheurs sont investis dans la réalisation de plateforme « Industrie 4.0 » : ProGreSS4.0 pour illustrer des problématiques autour de (i) l'ingénierie du processus de régénération, (ii) le produit intelligent et son système d'information et (iii) le pilotage hybride de la production. Étant enseignants chercheurs, ils ont souhaité

que ces concepts soient abordés rapidement en enseignement.

Les 3 sections suivantes montrent comment ces travaux de recherche ont été intégrés en enseignement.

4.1 Ingénierie du process de régénération

4.1.1 Thématique de recherche

Les travaux autour de l'ingénierie du process de régénération permettent de définir des méthodes et des outils pour régénérer des composants d'un produit usagé afin de pouvoir les réinjecter dans un flux de fabrication [6][7]. Ces travaux proposent :

- des approches d'ingénierie du process de régénération en cohérence avec l'ingénierie du produit à régénérer, avec une vue globale du processus [11]. (Modélisation SYSML)
- des approches de génération de stratégies de production en proposant des méthodes d'évaluation du choix des ressources et des gammes de régénération, en tenant compte des incertitudes sur l'état de santé et sur le résultat de la régénération. (Modélisation automates stochastiques)
- des évaluation l'état de santé d'un produit, en proposant des méthodes d'agrégation d'informations hétérogènes, et inversement en proposant des méthodes de projection d'un état de santé d'un niveau n vers un niveau $n-1$

4.1.2 Projection en enseignement

La sensibilisation des étudiants à la problématique de l'économie circulaire et sur l'importance de tenir compte de l'environnement se fait dans le cadre des cours du Master ISC (Ingénierie des Systèmes Complexes) de l'Université de Lorraine. Dans la maquette actuelle, cette thématique est utilisée dans les études de cas abordés dans deux UE d'intégration. L'objectif de ces UE est, autour d'un objet technique, remobiliser les compétences abordées dans les autres UE du semestre

précédent : Ingénierie Système, programmation objet, système d'informations, robotique, réseaux industriels. En plus de retravailler les cours dans un contexte différents, cette activité permet aux étudiants travaillent la partie intégration de différentes technologies et de différents points de vue. Ce choix pédagogique permet aux étudiants d'acquérir des compétences et peuvent les valoriser dans leur CV.

La prochaine maquette du Master ISC est en cours de conception et débutera en septembre 2024. Dans cette maquette, une UE « Ingénierie système conjointe produit-process » est définie pour enseigner les problématiques autour de la conception conjointe entre deux systèmes et d'y intégrer la prise en compte d'exigences de régénération qui auront des conséquences sur l'architecture du produit.

En Licence Sciences Pour l'Ingénieur (SPI), ce sont les connaissances techniques qui sont abordées :

- Accompagner la décomposition des produits en collaboration avec la cobotique de type UR5e (Universal Robot) et YUMI (ABB)
- Tracer l'information lié au produit, des actions de régénération via la technologie RFID

4.2 Système d'informations autour de la régénération

4.2.1 Thématique de recherche

Le produit intelligent propose de développer des produits augmentés par le biais de technologies IoT pour associer le produit physique à son double numérique [5]. Ainsi augmenté, le produit est dit intelligent et décide de son devenir. Pour ce faire, il est nécessaire de résoudre les problématiques suivantes :

- Structurer les informations produit en proposant une nouvelle ontologie des connaissances nécessaires pour la régénération,
- Proposer une architecture du système d'information global intégrant les systèmes d'entreprise (tels que les ERP et MES) liés au système de régénération,
- Étudier le couplage du système d'information/produits intelligents et son effet sur la qualité des prises de décision des produits au cours de la régénération.

4.2.2 Transfert vers l'enseignement

Le transfert de ces travaux de recherche se fait principalement en master ISC en 2^{ème} année en prenant la plateforme ProGreSS 4.0 pour exemple, afin de :

- Développer l'ERP via des outils de modélisation de flux/données
- Réaliser la gestion de la production des produits régénérés via cet ERP dédié
- Simuler le couplage ERP/produit intelligents via un jumeau numérique

Dans la prochaine maquette, nous nous focaliserons plus la conception et l'utilisation d'un jumeau numérique du

système et du produit dans le cadre du développement durable.

4.3 Pilotage hybride centralisé/distribué de la production et de la régénération

4.3.1 Thématique de recherche

Le pilotage de la production hybride centralisé/distribué [1] permet de définir les capacités de décision distribuées sur les produits intelligents définis précédemment et les ressources nécessitent de migrer vers un pilotage hybride centralisé/distribué. L'enjeu est de trouver le bon niveau de décision entre ces deux modes avec des problématiques telles que : (i) modéliser le problème de pilotage lié à la régénération (proximité avec problèmes classiques, contraintes propres, fonction objectif pertinente), (ii) définir les décisions prises localement en tenant compte des effets de myopie qui peuvent en résulter, (iii) distribuer les capacités de décision en appliquant, évaluant et faisant évoluer des architectures connues (comme PROSA), (iii) piloter le changement de mode centralisé/distribué, (iv) identifier les bons outils pour la mise en œuvre du système hybride (Recherche Opérationnelle, Systèmes Multi Agents, Simulation, Hybridation).

4.3.2 Transfert vers l'enseignement

L'enseignement de ces problématiques de pilotage se fait également en master ISC en 2^{ème} année en prenant la plateforme ProGreSS 4.0 pour exemple, afin de :

- Programmer l'intégration des ressources et du produit en utilisant la programmation agent
- Programmer un système de blockchain pour décider des alternatives de régénération à mettre en place en fonction de l'état de santé du produit.
- Utiliser des technologies de localisation GPS Indoor, pour localiser le produit et les ressources dans un atelier flexible [11].

La mise en œuvre de ces enseignements a permis des collaborations avec des industriels voulant tester leur matériel dans des contextes de régénération pour la partie blockchain et dans un atelier de production soumis à des perturbations électromagnétiques pour la partie GPS Indoor.

5 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cet article avait pour vocation de présenter la plateforme ProGreSS4.0 qui a été pensée pour transférer des travaux de recherche rapidement en enseignement de niveau Master ou licence 3^{ème} année et pour les préparer à l'industrie 4.0 et aux enjeux sociétaux du développement durable. Cette plateforme est installée au pôle AIP-PRIMECA de Lorraine afin de tendre vers l'AIP 4.0 et d'illustrer plusieurs problématiques qui en découlent. L'originalité de cette plateforme réside justement dans le fait qu'elle intègre des principes de régénération des produits dans sa conception.

D'un point de vue de nos enseignements, la plateforme ProGreSS 4.0 va prendre de l'importance pour illustrer de nouvelles UEs d'ingénierie système.

Une fois que cette plateforme sera finalisée, des communications seront faites auprès des industriels pour les sensibiliser aux thématiques de régénération et pour la mise en place des technologies de l'industrie 4.0 sur des équipements plus anciens.

Remerciements

La mise en place de telle plateforme demande un investissement important de la part des ingénieurs du CRAN et de l'AIPL qui doivent adapter les approches de recherches à la réalité du terrain. Les auteurs remercient les ingénieurs et techniciens de l'AIPL et du CRAN pour leur investissements dans la plateforme ProGreSS 4.0.

Les enseignants-chercheurs remercient également les étudiants qui « subissent » nos nouvelles pédagogies et l'utilisation d'une plateforme en cours de conception et de réalisation.

Bibliographie

- [1] Alexis Aubry, *Systèmes industriels soumis à de la variabilité : vers un pilotage sous perturbations pour les systèmes de production holoniques*, Habilitation à diriger des recherches, Université de Lorraine, 2018.
- [2] Alexis Aubry, William Derigent, David Gouyon, Eric Levrat, Pascale Marangé, et al.. *ProGreSS 4.0 : une plateforme pour l'enseignement de l'industrie du futur et pour la recherche associée*. 16ème colloque national Smart/AIP-PRIMECA, Apr 2019, Les Karellis, France.
- [3] Babbitt, C.W., Gaustad, G., Fisher, A., Chen, W.Q., Liu, G., 2018. *Closing the loop on circular economy research: from theory to practice and back again*. Resour. Conserv. Recycl. Vol. 135, n°1–2.
- [4] Mohand Lounes Bentaha, Alexandre Voisin, Pascale Marangé. *A decision tool for disassembly process planning under end-of-life product quality*, International Journal of Production Economics, Elsevier, 2020, 219, pp.386–401.
- [5] William Derigent, *Modèles de données et mécanismes de gestion de l'information distribuée dans des systèmes holoniques : Application à la matière communicante*, Habilitation à diriger des recherches, Université de Lorraine, 2018.
- [6] Laëtitia Diez, Pascale Marangé, Éric Levrat. *Regeneration management tool for industrial ecosystem* 20th IFAC World Congress, IFAC 2017, Jul 2017, Toulouse, France
- [7] Laëtitia Diez, Pascale Marangé, Éric Levrat. *Maintenance best way for meeting the challenge of regeneration*, 3rd IFAC Workshop on Advanced Maintenance Engineering, Service and Technology, AMEST'16, Oct 2016, Biarritz, France
- [8] Kayikci, Y., Kazancoglu, Y., Lafcu, C., 2021. *Exploring barriers to smart and sustainable circular economy: The case of an automotive eco-cluster*. Journal of Cleaner Production, Vol. 314, 127920.
- [9] Gustavo Cattelan Nobre, Elaine Tavares, , 2021. *The quest for a circular economy final definition: A scientific perspective*. Journal of Cleaner Production, p. 127973
- [10] Quentin Wu, David Gouyon, Eric Levrat, Sophie Boudau. *A review of know-how reuse with patterns in model-based systems engineering*, In 9th Complex Systems Design & Management Conference, CSD&M 2018, Paris, France, 2018.
- [11] Ahmed Zouinkhi, Eddy Bajic, Eric Rondeau, Mohamed Ben Gayed, Mohamed Naceur Abdelkrim. *Ambient intelligence: awareness context application in industrial storage*. Wireless Sensor Network, 2011(3), pp. 134-145.