



L'Industrie 4.0, levier de l'économie circulaire ? Le cas du secteur automobile

Article complet

Elizabeth COUZINEAU, GReMOG - PPA Business School, Paris (France)

Résumé

Cet article analyse l'intégration de l'Industrie 4.0 et de l'économie circulaire dans l'industrie automobile, à travers les stratégies de Stellantis et Valeo. L'introduction pose le contexte de convergence face aux enjeux climatiques. La revue de littérature définit les concepts et relève des lacunes dans leur interaction concrète. La méthodologie s'appuie sur des entretiens et une analyse documentaire. Les résultats montrent des approches distinctes mais complémentaires entre constructeur et équipementier pour adopter durablement ces modèles. L'analyse qualitative révèle la complexité de cette transformation nécessitant innovations techniques et organisationnelles. La discussion insiste sur les progrès réalisés mais aussi les défis comme le développement de normes globales et le changement culturel. En conclusion, l'étude démontre le potentiel de l'Industrie 4.0 pour accélérer l'économie circulaire dans l'automobile, tout en soulignant les efforts à poursuivre pour une transition écologique et économique réussie.

Mots-clés: Industrie 4.0; économie circulaire; automobile

Introduction

L'avènement de l'Industrie 4.0 représente une transformation majeure dans la façon dont les entreprises manufacturières opèrent et créent de la valeur. Caractérisée par l'adoption de technologies avancées telles que l'intelligence artificielle, l'internet des

objets (IoT), la robotique, et l'analyse des données en grande quantité, l'Industrie 4.0 augmente significativement l'efficacité, la productivité et la personnalisation des produits (Schwab, 2017). Selon une étude de PwC (2022), 72 % des entreprises industrielles prévoient d'investir 5 % ou plus de leur chiffre d'affaires annuel dans des technologies numériques, ce qui témoigne de l'importance croissante de l'Industrie 4.0 dans le secteur manufacturier.

Parallèlement, l'urgence climatique et les pressions socio-économiques appellent à une révision profonde des modèles économiques vers une durabilité accrue. L'économie circulaire émerge comme une réponse en mettant l'accent sur la réutilisation, la réparation, le remanufacturing et le recyclage des produits et des matériaux dans un cycle économique fermé, visant à réduire au minimum la consommation de ressources et la production de déchets. Un rapport de la Ellen MacArthur Foundation (2021) estime que la transition vers une économie circulaire pourrait générer 4,5 trillions de dollars de bénéfices économiques cumulatifs d'ici 2030 en réduisant les coûts, en stimulant l'innovation et en créant des emplois.

La convergence de ces deux tendances est particulièrement pertinente dans le secteur automobile, qui fait face à des défis notables tels que les émissions de carbone, l'épuisement des ressources et les pressions réglementaires croissantes. Les constructeurs automobiles tels que Stellantis et Valeo, à travers leurs engagements vers la neutralité carbone et l'investissement dans les technologies électriques, illustrent cette convergence. Stellantis, par exemple, a annoncé un investissement de 30 milliards d'euros dans l'électrification et les logiciels jusqu'en 2025, tandis que Valeo a vu ses technologies d'électrification représenter 57 % de son chiffre d'affaires, soulignant une évolution importante de leur portefeuille vers des solutions plus durables (Stellantis, 2023; Valeo, 2023).

La pertinence de cette recherche est donc renforcée par l'alignement des tendances macro-économiques et des impératifs environnementaux qui exigent des modèles d'affaires innovants et durables. Ainsi, analyser l'impact de l'Industrie 4.0 comme levier pour l'économie circulaire devient crucial pour comprendre comment le secteur automobile pourrait non seulement s'adapter à ces changements, mais aussi prospérer en les anticipant.

Dans une première partie, nous définirons les concepts d'Industrie 4.0 et d'économie circulaire afin de poser le cadre théorique de notre réflexion. Puis, nous présenterons notre terrain et notre méthodologie de travail. Enfin, notre troisième partie consistera à déterminer dans quelle mesure l'Industrie 4.0 peut faciliter le déploiement de l'économie circulaire au sein de ces entreprises, en analysant les synergies et défis associés.

Revue de littérature

L'industrie 4.0

L'Industrie 4.0, terme apparu en 2011 lors de la foire de Hanovre, marque la quatrième révolution industrielle caractérisée par une intégration profonde des technologies numériques avancées dans le secteur manufacturier (Kagermann et al., 2013). Cette ère est définie par une interconnexion accrue des composantes de production via l'Internet des objets, permettant la collecte et l'analyse en temps réel de grandes quantités de données issues du processus de fabrication (Hermann et al., 2016). L'intelligence artificielle et la robotique cognitive sont progressivement adoptées dans les usines, facilitant une production personnalisée et augmentant la flexibilité des chaînes de production (Rüßmann et al., 2015). La convergence entre les mondes physique et numérique est accentuée par l'utilisation de capteurs et d'actionneurs connectés,

favorisant des interactions dynamiques entre les systèmes, les produits et les clients (Liao et al., 2017).

Elle se caractérise également par une intégration sophistiquée des technologies numériques de pointe et du cyberspace au sein du secteur manufacturier (Kagermann et al., 2013; Müller et al., 2018), ce qui permet une interconnectivité et une collecte de données accrues tout au long du processus de production (Hermann et al., 2016; Zhong et al., 2017), ainsi que l'adoption de l'intelligence artificielle facilitant la personnalisation et la flexibilité de la fabrication (Rüßmann et al., 2015; Leitão et al., 2019). Il y a donc des interactions fortes entre les sphères physique et numérique via les nouvelles technologies (Wan et al., 2020), ouvrant la voie à des avancées majeures en termes de customisation de masse et d'agilité des chaînes de production (Wang et al., 2016). Les implications socio-économiques de cette révolution industrielle font également l'objet de nombreuses recherches (Kiel et al., 2017; Santos et al., 2017).

L'économie circulaire

L'économie circulaire, modèle développé dans les années 1970 et popularisé depuis 2010, propose l'utilisation durable et efficace des ressources à travers le cycle de vie des produits, en opposition au modèle linéaire traditionnel basé sur « extraire-produire-jeter » (EMF, 2012 ; Kirchherr et al., 2017). Ses principes fondateurs, tels que les 3R, le *cascading use* et la hiérarchie des 5R intégrant réparation et reconditionnement, visent à prolonger la valeur des produits et matériaux et à réduire la production de déchets (Potting et al., 2017).

Dans le secteur manufacturier, notamment automobile, l'économie circulaire soutient la durabilité via des activités comme le recyclage, la modernisation d'infrastructures ou l'écoconception (Ghaithan et al., 2023; Tucki et al., 2022; Daño et al., 2020). Elle y est perçue comme un modèle économique innovant (Hanuláková et al.,

2021). Dans la construction, ce modèle permet de réduire l'utilisation des ressources et d'encourager l'efficacité écologique (Diemer et al., 2022). Les parcs éco-industriels peuvent favoriser son déploiement à plus grande échelle (Стародубова et al., 2022).

Ainsi, l'économie circulaire fournit un cadre prometteur pour la transformation durable des modèles économiques de nombreux secteurs, même si les réalisations sont encore marginales ou limitées.

Synergie des concepts

La transformation digitale, incarnée par l'Industrie 4.0, promet des avancées à la mise en œuvre de l'économie circulaire dans des secteurs clés tels que l'automobile, la construction et le textile (Boldrini, 2018). Ces avancées favorisent une gestion optimisée des ressources par le biais de technologies telles que l'Internet des objets (IoT), le cloud computing et l'intelligence artificielle, qui facilitent la traçabilité et la maintenance prédictive, des éléments centraux de l'économie circulaire (Rüßmann et al., 2015).

Les avantages de cette synergie sont multiples :

- (1) **Ecoconception** : l'analyse des informations relatives à l'utilisation et à la fin de vie des produits oriente la création de solutions compatibles avec la réduction, la réparation et le recyclage. Les stratégies d'écoconception bénéficient de l'analyse des données d'utilisation et de fin de vie pour créer des produits alignés sur les objectifs de durabilité (Potting et al., 2017).
- (2) **Traçabilité améliorée** : les technologies IoT permettent un suivi en temps réel des flux de matières et composants, améliorant ainsi la gestion des stocks et la maintenance prédictive, ce qui favorise la réparation et la réutilisation (Rüßmann et al., 2015).

- (3) Maintenance prédictive : l'exploitation des données des capteurs permet de prévoir l'usure des équipements et d'anticiper les pannes, prolongeant leur durée de vie et réduisant les déchets (Rüßmann et al., 2015).
- (4) Personnalisation de masse : la capacité de l'IA à personnaliser les produits favorise un modèle de consommation basé sur la fonctionnalité plutôt que sur la possession, ce qui encourage la réutilisation (Liao et al., 2017)
- (5) Modularité : la conception modulaire est favorisée par l'interconnexion en réseau, renforcée par la connectivité de l'Industrie 4.0, ce qui facilite la réparation et le remanufacturing (Hermann et al., 2016).

La revue de littérature présentée illustre une tendance croissante à l'intégration de l'Industrie 4.0 dans les stratégies de développement de l'économie circulaire. Les travaux de Ghaiathan et al. (2023) et Çetin et al. (2021) ont mis en lumière le rôle des technologies numériques comme moteurs de l'économie circulaire. Cependant, ces études se concentrent largement sur les avantages potentiels sans une considération approfondie des défis opérationnels et organisationnels que de telles intégrations engendrent.

L'analyse de Saidani et al. (2019) a exploré la gestion de fin de vie des véhicules, mais il semble y avoir un manque de recherche sur la phase amont, en particulier sur la conception et la production, qui sont essentielles pour une économie circulaire efficace. La revue de littérature suggère que bien que les principes de l'économie circulaire soient bien établis, leur application pratique dans l'Industrie 4.0 reste sous-explorée, en particulier en ce qui concerne les processus productifs et la chaîne d'approvisionnement.

Les études examinées tendent également à traiter les initiatives d'économie circulaire et d'Industrie 4.0 de manière isolée plutôt que de considérer leur interaction dynamique. Par exemple, les recherches dans le secteur du bâtiment et de la construction (Diemer et al., 2022) et dans celui du textile (Daño et al., 2020) mettent en évidence des

modèles d'économie circulaire spécifiques à l'industrie, mais les nuances transsectorielles et les leçons potentielles pour l'industrie automobile sont souvent négligées.

De plus, il y a peu de preuves concrètes et de retours d'expérience sur l'application des principes d'économie circulaire grâce aux technologies de l'Industrie 4.0.

Cette recherche vise à combler ces lacunes en évaluant les synergies entre l'économie circulaire et l'Industrie 4.0 à travers des données empiriques issues d'entretiens et d'analyses documentaires de deux principaux acteurs de l'industrie automobile, Stellantis et Valeo. Puis en examinant les défis pratiques de l'intégration de l'Industrie 4.0 dans l'économie circulaire, notamment les barrières organisationnelles et les problèmes de mise en œuvre. Enfin, en tentant d'apporter une perspective empirique robuste pour étayer les théories existantes et offrir une compréhension approfondie des interactions entre l'Industrie 4.0 et l'économie circulaire.

Il s'agit de mettre en lumière les obstacles, les opportunités, et les conditions nécessaires pour une transition réussie vers des modèles de production et de consommation plus durables.

Terrain et méthodologie

Le terrain

Le groupe Stellantis, issu de la fusion en 2021 entre PSA Peugeot Citroën et Fiat Chrysler Automobiles est le quatrième constructeur automobile mondial. Fort d'un portefeuille de marques telles que Peugeot, Citroën, Opel ou encore Jeep et Dodge, Stellantis a placé la responsabilité sociétale des entreprises (RSE) au cœur de sa stratégie à long terme. Celle-ci, nommée "Dare Forward 2030", ambitionne une mobilité durable portée par l'électrification et la décarbonation. Ainsi, le groupe vise 100% de véhicules électriques vendus en Europe et 50% aux États-Unis à horizon 2030, ainsi qu'une réduction de 50%

de ses émissions de CO2 et la neutralité carbone en 2038. Par ailleurs, Stellantis souhaite doubler son chiffre d'affaires tout en maintenant une marge à deux chiffres. Pour ce faire, des partenariats d'approvisionnement en batteries, des projets d'économie circulaire ou encore des actions en faveur de la diversité et des communautés locales sont intégrés dans sa démarche RSE intégrée. Le groupe Stellantis a fait de l'économie circulaire un pilier de son approche environnementale. Avec des partenaires spécialisés, Stellantis met en place le recyclage de métaux composant les batteries en fin de vie, avec un objectif de taux de recyclabilité de 95% à l'horizon 2030. Par ailleurs, la valorisation des pièces automobiles est envisagée via des filières de seconde vie, à l'instar de la reconversion d'airbags en sacs. L'éco-conception constitue un autre axe majeur, avec l'intégration accrue de matériaux recyclés et biodégradables dans la fabrication des véhicules. L'optimisation de la logistique inverse ainsi que des partenariats dédiés à la gestion des déchets complètent ce dispositif.

Valéo est un équipementier automobile français, actif dans la conception, la fabrication et la commercialisation de composants et systèmes pour l'automobile. Le groupe opère dans les domaines de la propulsion thermique, électrique et hydraulique, ainsi que dans les solutions d'aide à la conduite et de confort. Implanté dans plus de 30 pays, Valéo emploie près de 110 000 personnes dans le monde. Le groupe dispose d'un large portefeuille clients comprenant les plus grands constructeurs automobiles tels que Volkswagen, Ford, Renault-Nissan, Stellantis ou encore General Motors.

Parmi ses domaines d'expertise figurent les aides à la conduite, les systèmes thermiques, les moteurs et transmissions, ou encore les solutions d'éclairage et d'essuyage. Le groupe dispose d'un important réseau de R&D employant plus de 14 000 ingénieurs dans le monde.

En terme de RSE, engagé de longue date dans le développement durable, le groupe a fait de l'innovation technologique au service de la réduction de l'empreinte environnementale des véhicules l'un des fers de lance de sa stratégie. Le groupe est notamment pionnier et leader mondial dans les systèmes d'électrification. Cette approche se reflète notamment à travers l'éco-conception systématique des produits, ou encore le développement de systèmes permettant d'alléger les véhicules et d'en réduire les émissions polluantes. Pour l'économie circulaire, l'entreprise a noué des partenariats avec des acteurs spécialisés dans le recyclage des métaux, lui permettant d'intégrer des matières premières recyclées dans ses produits. Par ailleurs, Valéo optimise en interne les processus de réutilisation de ses déchets de production, et notamment des métaux et matières plastiques. L'éco-conception constitue également un levier important de la démarche : les produits sont pensés dès l'origine pour faciliter le démantèlement et le recyclage en fin de vie. De plus, Valéo a développé des filières innovantes de seconde vie pour certains composants, à l'image du reconditionnement de démarreurs et alternateurs issus de véhicules hors d'usage.

Méthodologie mise en oeuvre

La méthodologie proposée pour analyser les synergies et les défis inhérents à l'application de ces deux concepts au sein des groupes Stellantis et Valeo a pour objectif de produire une évaluation holistique, enracinée dans une perspective praxéologique et stratégique.

Données primaires : entretiens Semi-directifs

Une série d'entretiens semi-directifs a été menée avec des responsables des programmes Industrie 4.0 et développement durable de Stellantis et Valeo. Ces entretiens approfondis, au nombre de 8 et d'une durée moyenne d'une heure trente, visent à saisir les perceptions d'experts sur les leviers, les freins et les synergies potentielles, enrichis par leur

expérience sur le terrain. Une trame d'entretien a été élaborée pour s'adapter aux différents profils (R&D, remanufacturing, IT). Les entretiens ont été enregistrés, avec l'accord préalable des participants, et retranscrits pour une analyse de contenu approfondie.

Données secondaires : analyse Documentaire

Une revue documentaire exhaustive a été effectuée en se fondant sur une grille de collecte standardisée. Les documents clés, incluant les rapports RSE, les plans stratégiques et les communiqués de presse, ont été analysés pour tracer l'évolution des engagements des deux entreprises sur une période de 5 ans.

Codages

Nous avons ensuite codé les informations en procédant à un codage initial des données (17 codes obtenus), l'identification de catégories conceptualisantes (8 catégories) par regroupement des codes initiaux, la mise en relation des catégories et le dégagement d'un phénomène central.

Résultats

Les stratégies de Stellantis et de Valéo : convergence sur des segments différents

La mise en parallèle des deux entreprises révèle des stratégies distinctes mais complémentaires dans l'adoption de l'Industrie 4.0 et l'intégration de l'économie circulaire. Bien que toutes deux soient ancrés dans le secteur automobile français et s'engagent vers des processus de production plus durables, leurs approches reflètent leurs rôles spécifiques au sein de l'industrie.

Stellantis, en tant que constructeur automobile, intègre l'Industrie 4.0 principalement à travers la digitalisation de sa chaîne de production et l'adoption de véhicules électriques. Les investissements dans les « *technologies de véhicules électriques*

et les logiciels de gestion de la performance environnementale démontrent une orientation vers l'économie circulaire à travers l'optimisation des cycles de vie des produits et la réduction des déchets ». Stellantis met l'accent sur le remanufacturing et le recyclage, avec des initiatives visant à prolonger la durée de vie des composants des véhicules et à réduire l'empreinte carbone des processus de fabrication.

Valeo, en tant qu'équipementier, se concentre sur le développement de technologies propres et l'innovation en matière de composants automobiles. « *La société s'est engagée dans l'économie circulaire en investissant dans la recherche et le développement de solutions d'électrification et de logiciels embarqués* ». Valeo s'efforce de créer des produits modulaires et facilement recyclables, une démarche alignée sur les principes de l'économie circulaire. Elle travaille également à réduire l'impact environnemental de sa chaîne d'approvisionnement en collaborant avec ses fournisseurs pour adopter des pratiques plus durables.

Les similitudes entre les deux entités peuvent être observées dans leur engagement pour la réduction des émissions de carbone et leur investissement dans les technologies propres. Elles valorisent la traçabilité des matériaux et l'écoconception, dans la logique que la durabilité commence dès les premières étapes de la conception des produits.

Cependant, les différences sont marquées par leur positionnement dans la chaîne de valeur du secteur automobile. Stellantis semble se concentrer sur l'intégration verticale et la gestion de l'ensemble du cycle de vie des véhicules, tandis que Valeo cible l'innovation horizontale en développant des technologies qui peuvent être intégrées dans les produits de plusieurs constructeurs automobiles. Stellantis pourrait avoir un impact plus direct sur les consommateurs grâce à ses véhicules en partie recyclés, alors que Valeo influence la durabilité à travers la production de composants qui sont des éléments clés des véhicules modernes.

Nos travaux montrent comment les constructeurs et les équipementiers peuvent aborder ces défis de manière complémentaire pour un impact collectif vers une industrie plus durable.

Un phénomène central portant sur la complexité

L'analyse qualitative a produit une série de codes ouverts reflétant les perceptions et les pratiques actuelles au sein des entreprises Stellantis et Valeo. Ces codes indiquent une prise de conscience croissante et une transformation progressive des mentalités et façons de travailler vers une industrie automobile plus durable et connectée. La formation et le développement des compétences sont identifiés comme des facteurs cruciaux pour s'adapter aux Technologies 4.0, telles que l'intelligence artificielle (IA), la robotique et la blockchain, qui sont de plus en plus implantées. La traçabilité des composants, le recyclage, et la réutilisation des matériaux émergent comme des pratiques centrales, malgré une résistance au changement et des réglementations considérées comme complexes. Valeo se distingue par sa transformation numérique, axée sur les capteurs et l'intelligence embarquée, tandis que Stellantis se concentre sur l'innovation à travers son hub à Mirafiori et l'expérimentation de nouvelles solutions de mobilité. Les deux entreprises affichent la volonté d'intégrer l'économie circulaire, en s'alignant sur les principes des 4R (réemploi, réparation, remanufacturing, recyclage).

Ces codes ouverts ont été synthétisés en catégories conceptualisantes plus larges qui représentent les forces motrices et les barrières de la transformation industrielle :

- Leviers de Transformation: la formation, l'adoption de technologies avancées et la mise en œuvre de la traçabilité sont identifiées comme des leviers essentiels.
- Freins au Changement: les résistances internes et les réglementations complexes sont perçues comme des freins significatifs.

- Réalisation de l'Économie Circulaire: les résultats tangibles incluent le recyclage et l'écoconception, indiquant une progression vers des pratiques de production circulaire.
- Transformation Numérique: Valeo se distingue par une transformation numérique poussée, soulignant l'importance de la technologie dans l'évolution de l'industrie.
- Adoption de l'Économie Circulaire: Stellantis démontre une adoption stratégique de l'économie circulaire, intégrant des principes durables dans leurs opérations.

Les analyses révèlent des interconnexions entre les catégories. Ainsi, la combinaison de leviers technologiques et de formation conduit à des avancées concrètes en économie circulaire. Mais les résistances au changement et les réglementations entravent la transformation, alors que la transformation numérique chez Valeo stimule les pratiques circulaires chez Stellantis. Les innovations technologiques soutiennent les initiatives d'économie circulaire, tandis que le changement des mentalités est fondamental pour une transition réussie. Les partenariats externes, y compris ceux avec des startups et des centres de recherche, accélèrent l'innovation et la mise en œuvre de l'économie circulaire.

La transformation vers une économie circulaire dans l'industrie automobile est identifiée comme un phénomène central réclamant une action systémique sur les plans technologique, humain et organisationnel. Les innovations de l'Industrie 4.0 servent de leviers mais ne sont pas suffisantes seules ; une mutation profonde est nécessaire, intégrant l'innovation technologique digitale et l'adoption de nouveaux modèles économiques circulaires. Cela nécessite l'engagement de tous les acteurs de la chaîne de valeur.

Nos résultats soulignent la complexité de la transition vers une économie circulaire dans l'industrie automobile. L'attention est portée sur la nécessité d'une transformation qui ne soit pas seulement technologique mais aussi culturelle et structurelle, nécessitant une collaboration étroite entre divers acteurs industriels pour réaliser le potentiel complet des pratiques circulaires et numériques.

Cette analyse met ainsi en lumière trois dynamiques clés à l'œuvre dans la transformation de l'industrie automobile.

Premièrement, la transition vers l'économie circulaire au sein des entreprises nécessite de lever des freins importants, qu'ils soient culturels, organisationnels ou réglementaires. Les innovations technologiques liées à l'industrie 4.0, comme la traçabilité des composants, constituent des leviers puissants mais non suffisants. La réussite dépend aussi de changements structurels en matière de formation et de management pour accompagner l'adoption de nouvelles pratiques.

Deuxièmement, l'intégration des principes de l'économie circulaire chez les constructeurs automobiles est soutenue par la transformation digitale des équipementiers. Les progrès des équipementiers dans les technologies de capteurs, d'intelligence artificielle, de maintenance prédictive ou encore de blockchain renforcent les démarches d'écoconception, de réemploi et de recyclage des constructeurs. On observe ici une synergie entre avancées technologiques et transition vers de nouveaux modèles économiques.

Troisièmement, ces mutations reposent sur une collaboration étroite entre les différents acteurs de la chaîne de valeur. Les partenariats entre constructeurs et équipementiers pour des projets pilotes, l'open innovation avec des startups, ou encore l'implication des centres de recherche, accélèrent le déploiement de l'économie circulaire

et de l'industrie 4.0. Ces transformations systémiques ne peuvent advenir qu'au travers d'efforts conjoints et d'une vision partagée de l'avenir de cette industrie.

Nos travaux ont identifié le caractère multidimensionnel de la transition vers une industrie automobile à la fois numérique et circulaire. Réussir cette mutation semble exiger des innovations technologiques de rupture ainsi qu'un travail en profondeur sur les modèles économiques, les aspects humains et organisationnels, et la coopération entre les différentes parties prenantes.

Le passage à l'économie circulaire est techniquement favorisé par l'industrie de 4.0 en raison de l'optimisation des processus permettant la réduction des gaspillages des ressources ; une surveillance de traçabilité accrue grâce à l'utilisation de capteurs et de systèmes de suivi et de collecte de données en temps réel, la personnalisation et la flexibilité des productions qui permet la personnalisation de masse. Enfin le développement des écosystèmes numériques devraient permettre de faciliter les échanges et la création de la chaîne de valeur.

Notre terrain montre que la combinaison des principes de l'économie circulaire avec les technologies 4.0 crée des systèmes de production plus durables, efficaces et résilients. Cependant des freins importants sont relevés : la résistance au changement et la mesure du retour sur investissement même si la réduction des coûts de production ou l'avantage concurrentiel développé grâce aux Business models innovants donnent des éléments pertinents pour alimenter les mesures.

Discussion

L'analyse des stratégies d'Industrie 4.0 et d'économie circulaire adoptées par Stellantis et Valeo met en lumière la progression significative vers une industrie automobile plus durable et responsable. L'intégration de technologies avancées de l'Industrie 4.0, telles

que l'IoT, l'IA et la robotique, dans les processus de fabrication et de gestion de fin de vie des produits, offre un potentiel considérable pour accélérer le passage à l'économie circulaire. Cependant, cette transition n'est pas sans défis, nécessitant un engagement envers l'innovation, une collaboration stratégique au sein de la chaîne de valeur, et un changement culturel en faveur de pratiques durables.

Stellantis et Valeo, bien que différentes dans leurs approches spécifiques et leur positionnement dans la chaîne de valeur, montrent que l'adoption de l'économie circulaire est non seulement une nécessité environnementale mais également une opportunité économique stratégique. La personnalisation de masse, la maintenance prédictive, et la modularité des composants ne sont que quelques-uns des avantages qui découlent de l'Industrie 4.0 et qui peuvent être exploités pour promouvoir l'économie circulaire.

D'un point de vue théorique, nous proposons de prolonger ces travaux sur trois axes. Tout d'abord, approfondir la théorie sur la manière dont les technologies de l'Industrie 4.0 peuvent spécifiquement permettre des pratiques d'économie circulaire, en identifiant les facilitateurs et les barrières dans les processus de fabrication et de gestion de la supply chain semble nécessaire. Proposer des cadres intégratifs qui lient les capacités de l'Industrie 4.0 (comme la collecte de données et l'analyse prédictive) aux principes de l'économie circulaire (comme la conception pour le démontage et la remanufacturation) permettrait de faciliter la compréhension et les analyses transsectorielles. Enfin, nous pensons qu'une recherche interdisciplinaire est nécessaire en combinant les connaissances en ingénierie, en gestion environnementale et en économie pour développer des solutions holistiques adaptées à l'industrie automobile.

Du point de vue managériales, nous recommandons cinq axes de développement :

- (1) Formation et compétences en développant des programmes de formation pour les employés à tous les niveaux pour renforcer les compétences numériques et la compréhension des principes de l'économie circulaire.
- (2) Planification stratégique pour intégrer l'Industrie 4.0 et l'économie circulaire dans la planification stratégique de l'entreprise pour créer de la valeur à long terme et répondre aux exigences réglementaires et aux attentes des consommateurs.
- (3) Partenariats d'innovation pour stimuler l'innovation en matière de technologies durables et de pratiques d'affaires.
- (4) Mise en place d'indicateurs de performance circulaire qui mesurent l'efficacité des initiatives circulaires pour guider les décisions managériales et améliorer la transparence.
- (5) Adaptation des politiques d'entreprise pour soutenir la responsabilité élargie des producteurs, en veillant à ce que les produits soient conçus et gérés de manière à faciliter leur récupération et leur réintégration dans le cycle de production.

L'avenir de l'Industrie 4.0 et de l'économie circulaire dans le secteur automobile semble dépendre de plusieurs facteurs dont l'adoption de normes globales pour la traçabilité des matériaux et l'écoconception, afin de faciliter l'interopérabilité et l'adoption à l'échelle mondiale. Les gouvernements doivent jouer un rôle en offrant des incitations pour encourager les investissements dans les technologies de l'Industrie 4.0 et l'économie circulaire, et en mettant en place des réglementations qui favorisent la durabilité. Enfin, les méthodologies pour mesurer l'impact environnemental et économique de l'intégration de l'Industrie 4.0 dans l'économie circulaire doivent être raffinées pour permettre des décisions basées sur des données probantes.

Bibliographie

- Antomarchi, A.-L., Durieux, S., & Duc, E. (2020). Impact de la fabrication additive sur la supply chain : état des lieux et diagnostics. *Logistique & Management*, 28(1), 29-47. <https://doi.org/10.1080/12507970.2019.1682950>
- Boldrini, J.-C. (2018). La co-création de valeur dans un projet d'innovation collaboratif : un cas de transition vers l'économie circulaire. *Innovations*, 55(1). <https://doi.org/10.3917/inno.pr1.0028>
- Daniel Luiz de Mattos, N., Renan Mury, N., Rodrigo Goyannes Gusmão, C., Juan Manuel, M.-M., Juan Manuel, M., José, M.-F., Vikas, K., & Jose Arturo, G.-R. (2022). A sustainable circular 3D printing model for recycling metal scrap in the automotive industry. *Journal of Manufacturing Technology Management*. <https://doi.org/10.1108/jmtm-10-2021-0391>
- Dominique, A., & Estelle, P. (2014). La mise en pratique de l'économie circulaire chez Michelin. <https://doi.org/10.3917/re.076.0038>
- Fel, F., Cayla, J., & Carbone, V. (2020). L'industrie 4.0 peut-elle favoriser une relocalisation de la production en France ? *Logistique & Management*, 28(1), 18-28. <https://doi.org/10.1080/12507970.2019.1683477>
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. Hawaiï.
- Julian, K., Denise, R., & Marko, P. H. (2017). Conceptualizing the Circular Economy: An Analysis of 114 Definitions. *Social Science Research Network*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3037579>
- Karaa, M. (2022). La blockchain au service de la traçabilité de l'huile d'olive : cas d'une entreprise tunisienne. *Logistique & Management*, 30(4), 142-155. <https://doi.org/10.1080/12507970.2022.2133747>
- Kiel, D., Müller, J. M., Arnold, C., & Voigt, K. I. (2017). Sustainable Industrial Value Creation: Benefits and Challenges of Industry 4.0. *International Journal of Innovation Management*. <https://doi.org/10.1142/s1363919617400151>
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. P. (2017). Conceptualizing the Circular Economy: An Analysis of 114 Definitions. *Resources Conservation and Recycling*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Konecka-Szydłowska, B., & Czapich, M. (2022). Coworking — A New Entrepreneurship Model in the Sharing Economy. *Economy of Region*. <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2022-1-20>
- Leitão, P., Colombo, A. W., & Karnouskos, S. (2016). Industrial Automation Based on Cyber-Physical Systems Technologies: Prototype Implementations and Challenges. *Computers in Industry*. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2015.08.004>
- Liao, Y., Deschamps, F., Eduardo de Freitas Rocha, L., & Ramos, L. F. P. (2017). Past, Present and Future of Industry 4.0 - A Systematic Literature Review and Research Agenda Proposal. *International Journal of Production Research*. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1308576>
- Madeira, P. M., Vale, M., & Mora-Aliseda, J. (2021). Smart Specialisation Strategies and Regional Convergence: Spanish Extremadura After a Period of Divergence. *Economies*. <https://doi.org/10.3390/economies9040138>
- Müller, J. M., Kiel, D., & Voigt, K. I. (2018). What Drives the Implementation of Industry 4.0? The Role of Opportunities and Challenges in the Context of Sustainability. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su10010247>

- Nathalia, S., Nathalia, S., Cristina, I. F., Sascha, K., Marc, F., Matthias, F., & Helena, S. (2021). Innovation and the circular economy: A systematic literature review. *Business Strategy and the Environment*. <https://doi.org/10.1002/bse.2834>
- Qinglan, L., Adriana Hofmann, T., Adriana Hofmann, T., Miying, Y., Miying, Y., Mascarenhas, J., & Janaina Mascarenhas Hornos da, C. (2022). A framework of digital technologies for the circular economy: Digital functions and mechanisms. *Business Strategy and the Environment*. <https://doi.org/10.1002/bse.3015>
- Quiroz-Flores, J., Renato Jose, A.-R., Edisson Andree, Z.-A., Collao-Díaz, M., & Flores-Perez, A. (2023). Industry 4.0, circular economy and sustainability in the food industry: a literature review. *International Journal of Industrial Engineering and Operations Management*. <https://doi.org/10.1108/ijieom-12-2022-0071>
- René, L., Pereira, A., Miguel Díaz-Cacho, M., Miguel, D.-C., Jorge, M.-A., & Collazo, A. (2022). Spare Parts Made by Additive Manufacturing to Improve Preventive Maintenance. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app122010564>
- Santos, C., Mehraisi, A., Barros, A. C., Maria Madalena Teixeira de, A., & Ares, E. (2017). Towards Industry 4.0: An Overview of European Strategic Roadmaps. *Procedia Manufacturing*. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.093>
- Syed Abdul Rehman, K., Muhammad, U., Alam, A., Muhammad, T., & Zhang, Y. (2022). Technological Revolution and Circular Economy Practices: A Mechanism of Green Economy. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su14084524>
- Syed Abdul Rehman, K., Zhang, Y., Salman, S., Danish Iqbal, G., Danish Iqbal, G., Sumeela, A., Sumeela, A., & Sobia, S. (2021). The role of block chain technology in circular economy practices to improve organisational performance. *International Journal of Logistics-research and Applications*. <https://doi.org/10.1080/13675567.2021.1872512>
- Usama, A., Usama, A., & Robert, S. (2022). Sustainability in the Circular Economy: Insights and Dynamics of Designing Circular Business Models. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app12031521>
- Usama, A., Usama, A., Robert, S., & Karoly, B. (2022). Designing Value Chains for Industry 4.0 and a Circular Economy: A Review of the Literature. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su14127084>
- Wang, S., Wan, J., Zhang, D., Li, D., & Zhang, C. (2016). Towards Smart Factory for Industry 4.0: A Self-Organized Multi-Agent System With Big Data Based Feedback and Coordination. *Computer Networks*. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2015.12.017>
- Yuk Ming, T., Ka Yin, C., Arooj, F., Muhammad, W., & Muhammad, W. (2022). Industry 4.0 technology and circular economy practices: business management strategies for environmental sustainability. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19081-6>
- Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T. (2017). Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.05.015>