



HAL
open science

Analyse de l'utilisation des technologies digitales émergentes pour les systèmes de production circulaires : un point de vue d'industriels

Maxence Denu, Pierre David, Aurélie Landry, Fabien Mangione

► To cite this version:

Maxence Denu, Pierre David, Aurélie Landry, Fabien Mangione. Analyse de l'utilisation des technologies digitales émergentes pour les systèmes de production circulaires : un point de vue d'industriels. 1er Congrès Interdisciplinaire sur l'Economie Circulaire (CIEC 2024), AIFREC (Association Interdisciplinaire Française pour la Recherche en Economie Circulaire), Jun 2024, Montpellier, France. hal-04661655

HAL Id: hal-04661655

<https://hal.science/hal-04661655v1>

Submitted on 25 Jul 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Analyse de l'utilisation des technologies digitales émergentes pour les systèmes de production circulaires : un point de vue d'industriels

M. DENU^a, P. David^a, A. Landry^b, F. Mangione^a

^a Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP*, G-SCOP, 38000 Grenoble, France
*Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes

^b Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP*, LIG, 38000 Grenoble, France
Auteur correspondant : maxence.denu@grenoble-inp.fr

Mots clés : économie circulaire, technologies digitales, industrie 4.0, industrie 5.0, systèmes de production circulaires

Abstract

L'économie circulaire (EC) peine à s'imposer dans les systèmes de production industriels alors que la situation environnementale continue de s'aggraver. Dans ce contexte, plusieurs chercheurs ont suggéré que la mise en œuvre des technologies digitales (TD) de l'industrie 4.0 pourrait être une ressource essentielle dans cette transition vers une plus grande circularité. Basé sur une revue de la littérature sur les opportunités, obstacles et facilitateurs de l'utilisation des technologies numériques émergentes dans les systèmes de production circulaires (SPC), un questionnaire et des entretiens avec des industriels ont été menés pour mettre en perspective les résultats de la littérature. Cette communication vise à fournir les résultats de cette enquête et proposer une feuille de route pour combler le manque de preuves empiriques sur les avantages potentiels des TD dans les SPC. Dans le cadre d'un projet pluridisciplinaire combinant ingénierie et sciences humaines et sociales, cette recherche donnera la priorité à une approche intégrant les trois piliers du développement durable.

1. Introduction

Malgré l'intérêt croissant des chercheurs pour l'économie circulaire (EC), les industriels peinent à traduire ce concept en actions concrètes. Face à ces difficultés, il est nécessaire de comprendre les leviers et les freins inhérents à la mise en place de pratiques circulaires au sein des entreprises. De plus, l'utilisation des technologies digitales (TD) – communément associées à l'Industrie 4.0 ou l'Industrie du futur – a été mise en avant par plusieurs publications comme l'une des solutions pour faciliter la mise en œuvre de pratiques circulaires [1–5]. Cependant, peu d'articles étudient cette combinaison entre digitalisation et circularité, et la plupart ne fournissent pas de preuves empiriques de l'utilité de ces technologies pour la circularité [10].

Afin d'avoir une vue d'ensemble des barrières et leviers liés à l'adoption combinée des TD émergentes dans le contexte des pratiques circulaires au sein des systèmes de production, une revue de littérature systématique a été menée [7]. Sur la base de cette revue de la littérature, un questionnaire a été élaboré à l'intention des industriels pour confronter leurs opinions avec les résultats issues de la littérature.

La structure du document est détaillée ci-dessous. La section 2 présente la méthode utilisée pour créer et analyser le questionnaire et les entretiens. La section 3 présente les principaux résultats de l'enquête. La méthodologie et les résultats sont ensuite discutés dans la section 4, avant de conclure et d'ouvrir les perspectives sur cette thématique de recherche dans la section 5.

2. Méthode

Une enquête en ligne a été réalisée d'avril à juillet 2023, afin de déterminer la vision des entreprises sur les thématiques de l'EC et des TD. Le questionnaire a été réalisé en ligne sur la plateforme Framiforms et a été diffusé via plusieurs canaux de communication, notamment sur le réseau social professionnel LinkedIn (à travers des groupes francophones spécialisés ou des messages à des industriels), des courriels et via le réseau de l'équipe de recherche. Les e-mails et les contacts directs s'adressaient principalement aux entreprises souhaitant développer l'EC, bien que cela ne soit pas exclusif et qu'un large éventail d'entreprises ait été invité à répondre au questionnaire.

Le questionnaire était composé de 38 questions, portant sur la perception de la maturité de l'entreprise en ce qui concerne les pratiques d'EC et les technologies émergentes dans les systèmes de fabrication. Les répondants devaient évaluer, sur une échelle de Likert de 1 à 5, leur accord ou leur désaccord avec les énoncés sur les avantages et les obstacles perçus de la mise en œuvre de l'EC et/ou des TD de l'industrie 4.0. Le questionnaire comprenait également des questions sur les perspectives attendues d'utilisation des TD dans les systèmes de production de l'EC.

Certains participants ont également participé à de courts entretiens avec l'équipe de recherche en visioconférence entre mai et septembre 2023. Le guide d'entretien utilisé a été conçu pour aller plus loin dans les réponses données au questionnaire en ligne, en personnalisant les questions selon le niveau de maturité des entreprises interrogées.

Le nombre de réponses étant limité et le questionnaire comportant plusieurs questions qualitatives, une analyse quantitative ne permettrait pas d'obtenir des résultats représentatifs de la situation des entreprises françaises en termes de perception des TD au sein des SPC. De plus, les entretiens ont également fourni des informations qualitatives, d'où la décision de se concentrer en priorité sur ce type d'analyse qualitative et de mettre en avant les tendances globales des industriels. Cette analyse a principalement été réalisée avec les logiciels Excel et Power BI.

3. Résultats

Dans cette section, les différents points du questionnaire sont abordés, en analysant la compréhension qu'ont les participants de la définition de l'EC, leur perception des possibilités et des obstacles liés à l'EC et de TD, ainsi que les possibilités envisagées par les praticiens des TD pour l'EC.

3.1 Analyse des résultats du questionnaire

Au total, 40 questionnaires ont été remplis par les participants. Les questionnaires des participants extérieurs à l'industrie manufacturière et ayant trop peu d'expérience (<1 an) ont été exclus. L'analyse des questionnaires a porté sur 34 réponses, dont 44 % de PME (<250 salariés), 26 % d'entreprises de taille intermédiaire et 29 % de grands groupes (> 5 000 salariés). Au total, 5 entretiens ont été réalisés. Le tableau 1 présente les entreprises interviewées.

Tableau 1 – Caractéristiques des entreprises interrogées

Compagnie	Secteur	Pays	Taille de l'entreprise	Engagement dans l'EC*	Engagement dans I4.0**
A	Appareils électroniques	France	Taille intermédiaire	Haut	Bas
B	Plastiques / Caoutchouc	France	Grand groupe	Moyen	Moyen
C	Appareils électroniques	France	Grand groupe	Haut	Haut
D	Métallurgie	Allemagne	Grand groupe	Bas	Haut
E	Transport	France	Grand groupe	Haut	Moyen

*Échelle pour « Engagement dans l'EC » : Haut = production principalement circulaire; Moyen = production circulaire et linéaire ; Bas : production principalement linéaire

**Échelle d'engagement dans l'I4.0 : Haut = plus de 5 types de technologies mises en œuvre ; Moyenne = entre 3 et 5 types de technologies mises en œuvre ; Bas : moins de 2 types de technologies mises en œuvre

3.2 Comprendre le concept d'économie circulaire

Pour évaluer la compréhension du concept d'EC, il a d'abord été demandé aux répondants d'évaluer leur niveau de mise en œuvre de l'EC selon plusieurs niveaux (pas du tout, en cours de réflexion, en cours de mise en œuvre, partiellement, complètement), puis de donner leurs propres définitions de l'économie circulaire. Dans l'échantillon étudié, un quart des entreprises ont indiqué que l'EC était complètement mise en œuvre, et plus d'un tiers l'ont partiellement mise en œuvre.

Deuxièmement, les définitions des principales stratégies d'EC (réemploi, réparation, reconditionnement, refabrication et réutilisation) ont été fournies aux répondants sans y faire explicitement référence. Il a été remarqué que même les entreprises qui se définissent comme peu ou pas impliquées dans l'EC ont des pratiques circulaires. Cela semble indiquer que le concept d'EC n'est pas encore pleinement compris par les entreprises, ou que certaines entreprises n'ont pas intégré ce vocabulaire

dans leurs activités en préférant d'autres termes (maintenance par exemple). De plus, les stratégies de réutilisation, réparation, reconditionnement et remanufacturing sont largement pratiquées dans notre échantillon, au contraire de la stratégie de repurposing.

3.3 Perception des opportunités et des freins liés à l'économie circulaire

La principale motivation des entreprises interrogées est d'améliorer les pratiques environnementales, de réduire la consommation d'énergie et de matières premières. D'autres apports ont également été évoqués par les répondants, tels que la réduction des coûts de production, une meilleure image pour l'embauche de nouveaux talents et la communication avec les clients. Plusieurs réponses ont mis en évidence une volonté personnelle d'agir des managers pour la préservation de l'environnement et la notion de « sens au travail » a été évoquée à plusieurs reprises. Plusieurs opportunités complémentaires ont enfin été notées, comme l'effet vitrine améliorant l'image de l'entreprise, un gain de compétitivité face aux coûts de production dans d'autres pays, ou encore la validation d'opportunités d'affaires.

En ce qui concerne les obstacles, les résultats semblent être en faveur d'un accord sur la plupart des obstacles proposés dans la revue de littérature [7]. Le seul désaccord à noter concerne le manque de main-d'œuvre qualifiée et le risque de détérioration des conditions de travail. Néanmoins, la peur du changement chez les employés de l'entreprise à tous les niveaux semble être un obstacle important. En effet, lorsque des pratiques circulaires sont introduites, la matière première devient plus complexe à gérer (forte variabilité de l'état, état et propreté variables, ...). Les opérateurs peuvent donc éprouver un sentiment de déclassement puisqu'ils manipulent des pièces sales, comme rapporté par l'entreprise C. Pour les personnels en soutien à la production (approvisionnement, gestion de la production, finances, etc.), la complexité provient de la dualité de la matière première à l'entrée (neuve ou usagée), ainsi que de l'état de la matière première utilisée. Il est donc nécessaire de s'émanciper des principes existants de l'économie linéaire et de changer la façon de penser de l'entreprise (grande variation de rentabilité selon les produits par exemple, projets d'industrialisation plus complexes, gestion des stocks...). Enfin, il peut y avoir une crainte d'avoir un rejet du projet par les opérateurs ou de les surcharger. L'entretien avec l'entreprise B a également mis en évidence le fort besoin de main d'œuvre, de même que la difficulté d'automatiser des processus à risques (avec de fortes contraintes physiques) dans ces activités circulaires. La peur de dégradation de la qualité semble également être l'un des freins liés à la mise en place de l'EC. Il est également difficile de déterminer la pertinence d'une activité circulaire d'un point de vue écologique pour les entreprises. Enfin, d'autres freins peuvent apparaître en fonction du secteur d'activité qui ont des exigences spécifiques ou des normes spécifiques (ferroviaires, systèmes de paiement, etc.), comme on le retrouve dans les entreprises A, D et E. Enfin, certaines entreprises ont montré un très faible intérêt pour l'EC. Elles visent généralement à augmenter leurs profits plutôt que

d'entamer des projets de changement complexes et chronophages, avec des retours sur investissements difficiles à prévoir.

3.4 Perception des opportunités et obstacles liés aux technologies émergentes

Bien que la liste des TD appartenant au concept d'industrie 4.0 ne fasse pas consensus, plusieurs d'entre elles couramment reconnues par les chercheurs ont été suggérées aux répondants. Les robots mobiles autonomes transportent des matières sans intervention humaine dans l'atelier. Les robots collaboratifs assistent les opérateurs dans leurs tâches au sein d'un même espace. La simulation numérique prédit le comportement de systèmes industriels à partir de modèles numériques. L'Internet des objets (IoT) forme un réseau d'appareils qui collecte et échange des données. La fabrication additive manufacture des objets par ajout de couches successives de matière. La réalité virtuelle reproduit numériquement des environnements, et la réalité augmentée superpose des éléments virtuels dans un milieu réel. Les systèmes cyber-physiques combinent des objets connectés pour surveiller et prédire le comportement d'un système industriel en temps réel. Les technologies d'identification (QR code, RFID, ...) authentifient des objets, et la communication entre machines permet aux appareils industriels de coopérer et de prendre des décisions autonomes. Les progiciels d'entreprises sont des systèmes logiciels intégrés qui permettent aux entreprises de gérer et d'automatiser leurs différentes fonctions métiers. L'intelligence artificielle (IA) permet d'automatiser des tâches précédemment réalisées par des humains.

Parmi les entreprises interrogées, 85% d'entre elles disposent d'au moins une de ces TD, pour des activités linéaires ou circulaires. Les technologies d'identification et les progiciels d'entreprise semblent être les TD les plus plébiscités au sein du panel, suivies par la fabrication additive. Ces TD semblent également être les plus utilisées dans les SPC. Les logiciels de simulation sont également relativement répandus pour les systèmes de production linéaires, alors qu'ils ne sont que peu appliqués pour les SPC. Les robots (mobiles autonomes collaboratifs notamment) ainsi que l'IA semblent moins répandus au sein de l'échantillon. Le niveau de digitalisation augmente également avec la taille de l'entreprise (en moyenne 3 TD pour les PME, et 7 pour les grands groupes).

En ce qui concerne les opportunités, les apports liés à la collecte de données pour optimiser les opérations, l'interaction en temps réel avec le système de production, l'intégration électronique des fournisseurs et des clients, la flexibilité et l'agilité du système en fonction du contexte et de la demande, ainsi que l'augmentation de la qualité des produits semblent être reconnus par les entreprises de toutes tailles. Au contraire, la réduction de la pression hiérarchique grâce aux TD ne semble pas faire consensus, et même un désaccord se profile avec cette opportunité. De plus, la perception des opportunités et des obstacles liés aux TD émergentes diffère selon la taille de l'entreprise. L'utilisation plus efficace des ressources et de l'énergie, ainsi que la

prolongation de la durée de vie des produits, sont des opportunités qui semblent être plus prisées par les grandes entreprises. Par ailleurs, les petites entreprises semblent s'accorder sur le fait que les TD permettent d'augmenter leurs capacités de production, alors que les grands groupes semblent moins convaincus sur ce point.

En ce qui concerne les barrières, le coût de mise en œuvre et les incertitudes sur le retour sur investissement sont les seuls obstacles qui font consensus. Les entreprises interrogées semblent également en désaccord avec le fait que les TD dégradent les conditions de travail ou détruisent des emplois. Ce désaccord est encore plus fort avec les personnes interrogées qui ont un rôle dans l'entreprise fortement lié aux TD. Une autre barrière à noter est la résistance au changement, de même que les incertitudes associées à ces TD (fiabilité des TD et des infrastructures, interopérabilité des TD, etc.). La conduite du changement semble être l'un des facteurs déterminants, et la mise en place d'un accompagnement et d'une formation au plus près des opérateurs avec des possibilités d'évolution permet de faciliter le changement comme dans l'entreprise D.

3.5 Perspectives imaginées pour la digitalisation des SPC

La majorité des entreprises interrogées s'accordent sur le fait que les TD pourraient être utiles dans le cadre de SPC. Les usages envisagés concernent principalement la qualité (évaluation et tri des pièces usagées à l'entrée, contrôle qualité à la sortie du process), la traçabilité des pièces (en cours de vie pour la maintenance prédictive, et pour le suivi au sein de l'atelier) et une aide à la décision lors des opérations.

4. Discussion

Il a été mis en évidence que les opportunités et les obstacles identifiés dans la revue de la littérature [7] semblaient correspondre à ceux perçus par la majorité des fabricants interrogés. Les principaux points de désaccord concernaient les questions sociales, en particulier la détérioration des conditions de travail au sein des SPC et l'utilisation des TD. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ce point. Lorsque des analyses ergonomiques sont réalisées, elles sont généralement réalisées en amont du projet en vue d'améliorer les conditions de travail, mais l'atteinte de cet objectif en aval du projet n'est pas forcément vérifiée par un second diagnostic ergonomique. Des éléments similaires ont été observés en ce qui concerne les questions environnementales, où les bénéfices de la mise en œuvre de l'EC ont été supposés mais non quantifiés. De plus, lorsque des analyses environnementales sont effectuées, l'ensemble du cycle de vie de la technologie n'est pas nécessairement pris en compte. En effet, l'analyse se limite souvent aux gains réalisés lors de la phase d'utilisation, impliquant généralement des gains économiques, et ignore les phases de production et d'élimination, qui ont le plus grand impact sur l'environnement. Les entretiens ont

également confirmé la prédominance de l'aspect économique dans l'évaluation des projets d'EC ou de TD.

En outre, les entretiens ont également révélé une forte différence entre la réponse au questionnaire et durant l'entretien sur certains aspects. En effet, malgré le désaccord sur les conditions de travail dans le questionnaire, plusieurs personnes interrogées ont admis l'accroissement de la difficulté pour les opérateurs dans certaines opérations au sein de SPC (postures contraignantes, vision d'un travail plus sale, etc.).

Plusieurs limites sont également à souligner. Compte tenu du nombre de réponses, une analyse quantitative n'a pas été possible et les réponses sont limitées à des entreprises françaises ou des pays limitrophes. Il serait intéressant de réaliser une enquête similaire avec une diffusion plus large. De plus, il aurait été intéressant de réaliser des groupes de discussions entre industriels pour confronter leurs opinions.

5 *En conclusion*

Réalisée dans le cadre du projet de recherche CIRCULAR de l'Université Grenoble Alpes, cette communication présente une enquête qui a permis de recueillir l'avis d'industriels sur les opportunités et freins liés à l'EC et au TD trouvés dans la littérature scientifique. Face aux manques de preuves concrètes sur l'utilité des TD pour l'EC, le recueil des difficultés et perspectives des industriels sur l'EC et les TD a pour objectif de définir des thématiques de recherche prioritaires sur ce sujet, et d'apporter des éléments concrets sur l'utilité de ces TD pour faciliter la mise en œuvre de pratiques circulaires au sein des ateliers de production. Le projet de recherche CIRCULAR vise donc à fournir des preuves concrètes des avantages potentiels des TD pour accroître la circularité des systèmes de production, avec une vision systémique et pluridisciplinaire. La prochaine étape consistera donc à mettre en place des expérimentations pour atteindre les objectifs ci-dessus, en tenant compte des résultats des questionnaires et des entretiens, et en appliquant la roadmap présentée dans [7].

Références :

- [1] Bressanelli G, Adrodegari F, Pigosso D, Parida V. Towards the Smart Circular Economy Paradigm: A Definition, Conceptualization, and Research Agenda. *SUSTAINABILITY* 2022;14.
- [2] Chauhan C, Parida V, Dhir A. Linking circular economy and digitalisation technologies: A systematic literature review of past achievements and future promises. *Technol Forecast Soc Change* 2022;177:121508.
- [3] Jabbour A, Jabbour C, Foropon C, Godinho Filho M. When titans meet – Can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors. *Technol Forecast Soc Change* 2018;132:18–25.
- [4] Rajput S, Singh SP. Connecting circular economy and industry 4.0. *Int J Inf Manag* 2019;49.
- [5] Rosa P, Sassanelli C, Urbinati A, Chiaroni D, Terzi S. Assessing relations between Circular Economy and Industry 4.0: a systematic literature review. *Int J Prod Res* 2020;58:1662–87.
- [6] Jabbour A, Jabbour C, Choi T, Latan H. "Better together": Evidence on the joint adoption of circular economy and industry 4.0 technologies. *Int J Prod Econ* 2022;252.
- [7] Denu M, David P, Landry A, Mangione F. Exploring opportunities and barriers of digital technologies in circular manufacturing systems: An overview and a research roadmap. *Sustain Prod Consum* 2023:S2352550923002671.