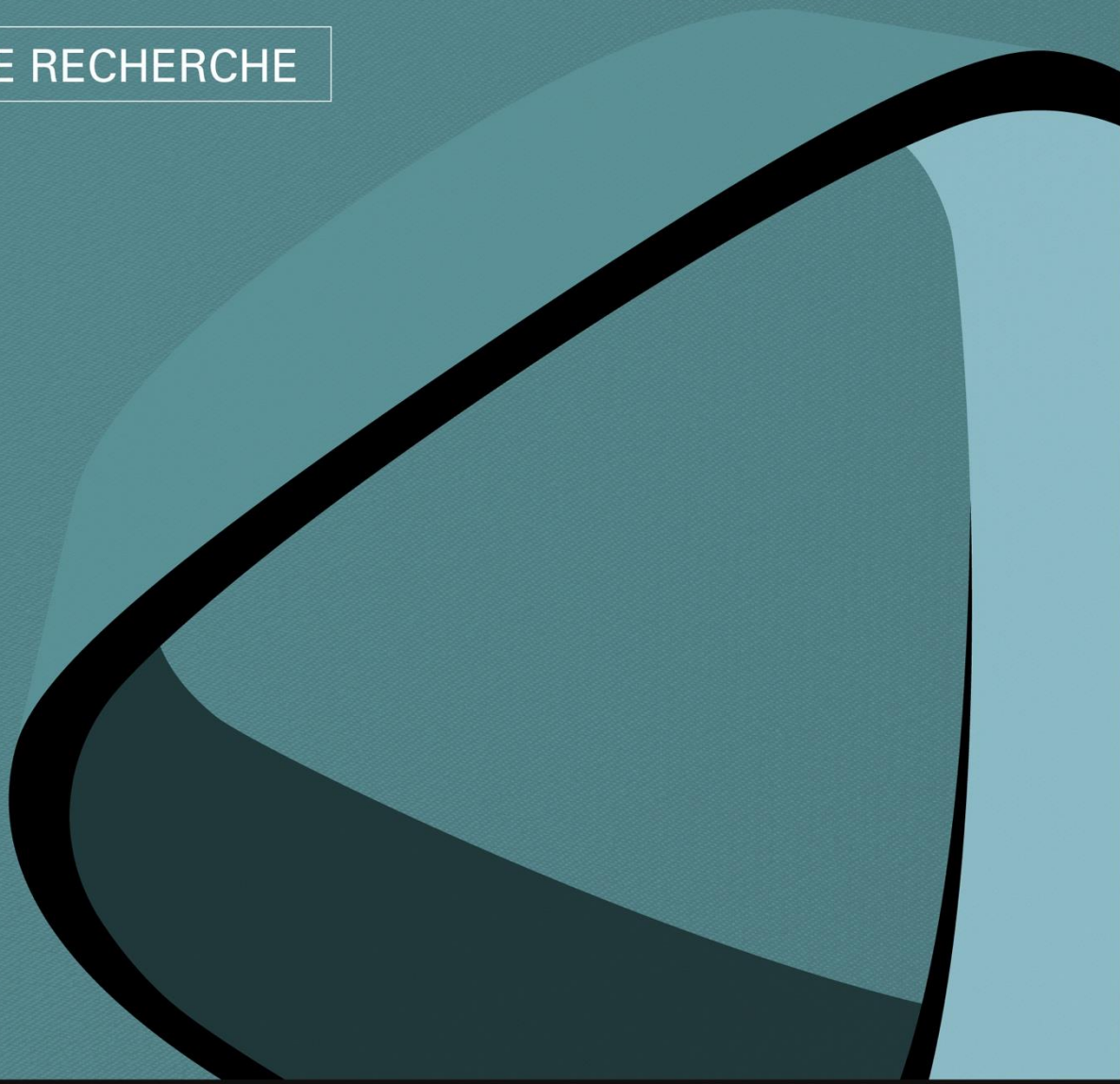
Chaire de recherche du Canada
en technologie, durabilité et société

# RAPPORT DE RECHERCHE



CANADA
RESEARCH CHAIRS
CHAIRES DE
RECHERCHE DU
CANADA

UQAC

Chaire de recherche du Canada
en technologie, durabilité et société

RAPPORT DE RECHERCHE

# Les TIC pour l'environnement et la durabilité : La contribution de l'intelligence numérique à l'économie circulaire

Cynthia Tremblay
Myriam Ertz
Chourouk Ouerghemmi

**4 Juillet 2024**

# Résumé :

Ce rapport vise à répondre à une interrogation cruciale tandis que s'amorcent concomitamment le virage numérique et la transition écologique. Il vise notamment à explorer comment l'intelligence numérique (la donnée) contribue à la transition vers l'économie circulaire. De plus, il examine la contribution des données dans l'atteinte de cet objectif. Ces questionnements sont au centre de la thématique dite « ICT for/through/in greening » ou « ICT for sustainability », consistant à utiliser la technologie et la donnée comme un effet de levier pour améliorer les performances environnementales (Klimova, 2018), et plus largement, « durables » ou « soutenables » (Santarius et Wagner, 2023), des systèmes et des sociétés.

Les moyens par lesquels ce verdissement et cette soutenabilité peuvent se faire par le biais de la technologie sont nombreux et variés et comprennent notamment les réseaux électriques intelligents, les systèmes de transport intelligents, les systèmes de gestion de l'énergie des bâtiments, les moteurs intelligents et les usines intelligentes, mais aussi le télétravail et les téléconférences, ou encore les solutions sans papier (numérisation) (Lee et al., 2013 ; Hankel et al., 2019). La notion d'intelligence (smart) revient d'ailleurs souvent au travers de ces divers concepts auxquels on pourrait aussi ajouter les villes intelligentes, et les bâtiments intelligents (Commission Européenne, 2022). L'intelligence accrue provenant du numérique produit donc de l'intelligence numérique.

Cette intelligence numérique est un outil versatile, car il a aussi des implications pour l'environnement et pour la durabilité, comme en atteste la littérature abondante sur le verdissement et la soutenabilité des technologies de l'information et de la communication (TIC) (ex. Rout et Samantaray, 2023). Cependant, l'intelligence numérique peut s'avérer fort utile et pertinente pour promouvoir la durabilité, pour autant qu'on l'utilise de manière judicieuse.

Le concept de la durabilité (ou même la soutenabilité), issu de la notion de développement durable, peut être relativement flou ou abstrait. Il est donc souvent opérationnalisé par des concepts plus concrets, ou du moins, qui permettent de mieux saisir les actions à mettre en place pour atteindre ladite durabilité. L'un de ces concepts est l'économie circulaire, qui est définie comme un « système de production, d'échange et de consommation qui repose sur des stratégies permettant d'optimiser l'utilisation des ressources à chacune des étapes

du cycle de vie des produits, dans le but de réduire les impacts environnementaux et d'améliorer le bien-être des individus et des collectivités » (OQLF, 2023). Ces stratégies sont très diverses et variées, mais se recoupent sur leur aspect très concret. Elles ont été amplement documentées par la Fondation Ellen MacArthur, L'Institut EDDEC et RECYC-QUÉBEC :

(1) Repenser : pour réduire la consommation de ressources et préserver les écosystèmes (ex. écoconception, consommation et approvisionnement responsables, optimisation des opérations),
(2) Optimiser : utiliser les produits plus fréquemment (ex. économie collaborative, location à court terme); prolonger la durée de vie des produits et des composants (ex. entretien et réparation, don et revente, reconditionnement, économie de fonctionnalité); et donner une nouvelle vie aux ressources (écologie industrielle, recyclage et compostage, valorisation).

Le concept de l'économie circulaire a été développé en raison des dépassements des limites planétaires dans une optique de *ralentir*, *boucler* et *diminuer* (Raufflet, 2024; Glaus, 2024). L'aspect *ralentir* fait référence à une volonté d'utiliser les biens et matière plus longtemps, l'aspect *boucler* fait référence à une volonté d'utiliser les biens et les matières de nouveau et l'aspect *diminuer* fait référence à une volonté d'utiliser moins de ressources (Raufflet et Glaus, 2024).

Ce rapport explore ainsi spécifiquement quatre grands thèmes en lien avec l'utilisation de l'intelligence numérique pour l'économie circulaire, soit, la transition vers une économie circulaire, l'impact environnemental du numérique, l'utilisation de l'intelligence numérique pour la transition écologique ainsi que les défis et les opportunités de la transition écologique et numérique.

# Table des matières :

Résumé : 3
Table des matières : 5
Introduction : 6
1. Mise en contexte de l'intelligence numérique 7
2. Exploration des thèmes clés dans la transition vers une économie circulaire 8
2.1. La transition écologique et numérique : 8
2.2. L'impact environnemental du numérique : 8
2.3. L'utilisation de l'intelligence numérique pour la circularité : 9
2.4. Les défis et les perspectives de l'intelligence numérique dans l'économie circulaire : 10
2.5. Les défis numériques : une approche prospective pour la convergence des transitions numériques et écologiques 11
2.6. Vers un jumeau numérique géospatial au service de l'économie circulaire : Le cas de la valorisation des matières organiques 13
2.7. Transformer les déchets en richesse : comment l'intelligence numérique peut-elle favoriser la circularité dans l'entretien hivernal des routes ? 13
2.8. Optimisation de la conception et du pilotage de systèmes logistiques de l'économie circulaire : projets et défis 14
2.9. L'apport du Machine Learning à la transition vers l'économie circulaire dans le secteur d'aérospatiale : 15
2.10. Système de gestion intelligent et durable du marc de café : de déchets à ressources 16
Conclusion : 20
Bibliographie 22

# Introduction :

Aujourd'hui, les ressources naturelles s'épuisent rapidement et avec une prise de conscience croissante des enjeux environnementaux, l'économie circulaire est perçue comme une alternative prometteuse permettant d'assurer une durabilité à long terme. L'objectif de cette approche consiste à revoir les systèmes de production et de consommation pour réduire les déchets et favoriser l'utilisation des ressources. Dans cette perspective, l'intelligence numérique s'est révélée cruciale dans la transition vers une économie circulaire, mettant en avant des projets concrets et des défis à relever dans différents secteurs. En effet, la gestion efficace de l'énergie et des flux de matériaux est rendue possible grâce à l'intelligence numérique. Il s'agit d'un changement majeur dans le monde des entreprises qui visent à inclure les principes de durabilité dans leurs stratégies économiques. C'est ce qui explique l'importance des technologies numériques ainsi que des données afin d'adopter des stratégies innovantes favorisant la circularité des ressources et réduire l'impact environnemental.

Néanmoins, la mise en place de pratiques durables pose certains défis, notamment en matière de collecte des ressources dispersées, de gestion des résidus et d'optimisation des processus de production. C'est dans ce cadre qu'intervient l'intelligence numérique afin de fournir des alternatives innovantes.

Ce rapport cherche à explorer, d'une manière approfondie, l'apport des technologies ainsi que de l'intelligence numérique dans la transition vers l'économie circulaire. Plus précisément, nous évaluons l'utilisation et l'interprétation des données pour accroître l'efficacité des ressources en optimisant les processus de recyclage et en réduisant les déchets.

Dans le cadre de la transition vers une économie circulaire, le rapport aborde les différentes dimensions de l'utilisation de l'intelligence numérique. Nous commençons par une mise en contexte afin d'expliquer la notion de l'intelligence numérique. Ensuite, nous examinons les divers aspects de la transition écologique et numérique, notamment l'impact environnemental du numérique, l'utilisation de l'intelligence numérique pour la circularité et les défis et les perspectives de l'intelligence numérique dans l'économie circulaire. Nous terminons par une synthèse des principaux points traités dans le rapport.

# 1. Mise en contexte de l'intelligence numérique

Qu'est-ce que l'intelligence numérique ? Selon la définition proposée par IVADO (s.d.), il s'agit d'un ensemble de techniques et approches qui permet de faciliter, d'améliorer et de guider les processus décisionnels qui intègrent la collecte et l'analyse de données avec la création et l'application de modèles et d'algorithmes (IVADO, s.d.). Plus sommairement, Bahn (2024) résume l'intelligence numérique à la capacité de comprendre et d'utiliser les technologies de l'information. Cette synthèse apporte une nuance intéressante en mettant davantage en lumière l'aspect lié à l'intelligence. En effet, l'intelligence numérique s'articule autour de deux concepts clés à savoir la science des données et l'intelligence artificielle (IA) (IVADO, s.d.). L'intelligence numérique est ainsi représentée en fonction de trois piliers :

(1) L'analytique descriptive, appelée aussi business reporting (Delen et Ram, 2018). Selon ces chercheurs, elle correspond au premier niveau d'analyse des données. Elle se focalise sur la collecte et l'interprétation des informations afin d'appréhender la situation de l'entreprise. Alors, cette phase permet de comprendre les données liées à l'intelligence d'affaires. Elle implique la présentation des activités commerciales et des rapports ad-hoc pour saisir les performances passées et actuelles de l'entreprise (Delen et Ram, 2018).

(2) L'analytique prédictive dépasse la simple description des actions effectuées. A ce niveau, les entreprises se concentrent sur l'avenir. L'objectif consiste à faire des prévisions des résultats futurs à l'aide des outils de prédiction, comme la régression, afin de fournir des insights pertinents permettant d'aider les entreprises à prendre des décisions stratégiques (Delen et Ram, 2018).;

(3) L'analytique prescriptive se réfère aux décisions liées à la recherche opérationnelle (IVADO, s.d.). Cette étape avancée met l'accent sur la transformation des données en solutions et stratégies fiables et adaptées à un problème précis en se basant sur les résultats des analyses descriptives et prédictives (Delen et Ram, 2018).

La science des données se recoupe avec les aspects de l'analytique descriptive et prédictive, alors que l'intelligence artificielle constitue de l'analytique prédictive voire prescriptive (IVADO, s.d.).

# 2. Exploration des thèmes clés dans la transition vers une économie circulaire

## 2.1. La transition écologique et numérique :

Le lien entre le numérique et l'écologie est de plus en plus étroit et complexe (Arushanyan et al. 2014 ; Haldar et Sethi, 2022). Dans le contexte de l'économie circulaire, l'intelligence numérique joue un rôle important en mesurant, connectant et optimisant les systèmes logistiques. Les données permettent de rendre ces systèmes plus intelligents, notamment en surveillant, informant, investiguant, analysant, évaluant et planifiant les opérations (Frayret, 2024). Par conséquent, les technologies numériques, telles que l'intelligence artificielle, l'analyse des données et la modélisation, contribuent à l'optimisation des ressources et à une économie plus durable et circulaire (Mostafavi, 2024).

Ces outils permettent notamment de repenser la gestion des matières résiduelles, dans une perspective d'économie circulaire, en visant à optimiser leur valorisation sur le marché ou leur réutilisation après traitement (Mostafavi, 2024 ; Chaabane et Jabbarzadeh, 2024 ; Lamghari, 2024). Cependant, il est essentiel de développer une vision à long terme pour surmonter les défis actuels et explorer de nouvelles possibilités pour la convergence des transitions numériques et écologiques (Deron, 2024). En l'absence de véritable expert, la transition socio-écologique doit s'appuyer sur des connaissances variées, incluant des savoirs non strictement académiques, pour être réussie (Deron, 2024).

L'importance de la transition vers une économie circulaire réside dans la nécessité de repenser nos modes de production et de consommation pour favoriser la durabilité et la réutilisation des ressources (Frayret, 2024). L'amélioration de la circularité permet, entre autres, de réduire les émissions de gaz à effet de serre en considérant les déchets comme des ressources potentielles à valoriser, contribuant ainsi à une gestion plus efficace et responsable des ressources (Chaabane et Jabbarzadeh, 2024).

## 2.2. L'impact environnemental du numérique :

L'intégration des technologies numériques à des pratiques écologiques conduit à la réduction de l'impact environnemental de la consommation et favorise des pratiques plus durables. Toutefois, il est important de prendre en compte la notion de la matérialité du numérique, qui dépend de l'extraction minière et de l'utilisation des ressources non

renouvelables (Deron, 2024). L'univers numérique inclut des milliers d'appareils connectés, des câbles, des satellites, des centres informatiques, des serveurs, des puces, des capteurs et bien plus encore. Par conséquent, il est crucial de considérer les ressources limitées nécessaires à leur fonctionnement et l'empreinte écologique tout au long de leur cycle de vie (Deron, 2024).

Ainsi, il faut développer des outils pour quantifier les impacts environnementaux des technologies numériques et guider les processus d'innovation vers une utilisation plus responsable des ressources (Deron, 2024). Par exemple, l'intégration de capteurs aux objets, bien que facilite la collecte de données, nécessite des ressources supplémentaires et de réfléchir à leur circularité. En outre, les approches de conception écologique jouent un rôle important dans la réduction des déchets électroniques et la promotion du recyclage et de la réutilisation des objets technologiques.

Dans l'optique de limiter les effets rebonds, la sobriété numérique se présente comme un élément central pour réduire les impacts environnementaux des technologies numériques, en priorisant une juste répartition et en dématérialisant les secteurs non essentiels (Deron, 2024). Citons l'exemple des actions permettant de diminuer la consommation d'énergie dans le secteur des services digitaux, tels que la programmation verte, qui vise à rédiger des codes en optimisant l'utilisation excessive des ressources informatiques, à l'aide de l'amélioration des algorithmes.

En conclusion, la régulation de l'utilisation du numérique et la promotion de nouveaux modèles d'affaires responsables sont cruciales pour une utilisation plus efficiente des ressources (Deron, 2024). Bien que les outils numériques permettent d'améliorer la circularité et de réduire l'utilisation de matériaux vierges, cela pourrait entraîner une stimulation indirecte de la consommation d'autres types de matières (Raufflet et Glaus, 2024). Par déduction, la conscience environnementale et les politiques encourageant les initiatives durables sont très importants dans le secteur numérique.

## 2.3. L'utilisation de l'intelligence numérique pour la circularité :

Les applications de l'intelligence numérique pour la circularité sont nombreuses, offrant des solutions prometteuses pour optimiser la gestion des matières en explorant différentes stratégies d'optimisation et en permettant la visualisation des interventions nécessaires

(Mostafavi, 2024). Ainsi le jumeau numérique géospatial optimise la gestion des matières organiques dans une perspective d'économie circulaire, à la fois sur le plan économique, social, technologique et fonctionnel (Mostafavi, 2024). Cet outil modélise l'espace virtuel et permet d'explorer différentes stratégies d'optimisation tant en termes d'utilisation que de réutilisation des produits. Connecté à la réalité par le biais de capteurs, le jumeau numérique permet de visualiser les interventions nécessaires et d'anticiper les comportements futurs (Mostafavi, 2024). Les principaux avantages qui lui sont associés sont la scénarisation prédictive, la simulation et l'optimisation, ainsi que l'intégration de données massives et diversifiées sur les flux de matières (Mostafavi, 2024).

L'intelligence numérique améliore la circularité des matériaux en évaluant de nouvelles approches et technologies pour revaloriser certains résidus (Lamghari, 2024). Des outils, comme le machine learning et la modélisation 3D optimisent la conception, la fabrication et le recyclage dans divers contextes (Keivanpour, 2024). Ainsi, la combinaison d'approches écologiques et numériques permet d'atteindre les objectifs de durabilité en évaluant les impacts économiques et environnementaux de diverses pratiques (Lamghari, 2024).

L'optimisation des systèmes logistiques vise à minimiser l'utilisation de ressources naturelles, réduire les coûts et favoriser une économie circulaire par le biais de simulation évaluant l'impact en temps réel des systèmes sur l'environnement (Frayret, 2024). De plus, ces outils prévoient les tendances et planifient et anticipent les besoins futurs en matière de gestion des déchets (Chaabane et Jabbarzadeh, 2024). L'utilisation de technologies, telles que les poubelles intelligentes, optimise les trajets de collecte et améliore l'efficacité du processus (Chaabane et Jabbarzadeh, 2024).

## 2.4. Les défis et les perspectives de l'intelligence numérique dans l'économie circulaire :

Une approche écosystémique, favorisant la collaboration entre les acteurs et l'utilisation d'outils d'aide à la décision basés sur des données fiables, est nécessaire (Mostafavi, 2024). Pour cela, l'exploitation des données collectées et analysées doit être effectuée avec précaution afin de les rendre utilisables (Frayret, 2024). Il est essentiel d'accéder à des données de qualité afin de garantir le succès des initiatives analysées et de ne pas biaiser les résultats (Keivanpour, 2024). Par exemple, la précisions des données peuvent influencer

la prédiction des besoins en matières premières. Cependant, l'adoption d'outil numérique pose des défis en matière d'accessibilité, de confidentialité des données et de sécurité (Mostafavi, 2024). Les entreprises peuvent être réticentes à partager leurs données sur les matières premières en raison des risques perçus liés à la divulgation d'informations sensibles (Mostafavi, 2024). Par conséquent, il faut développer des mesures de confidentialité afin d'inciter les entreprises à s'engager dans ces initiatives.

L'accessibilité aux données peut également être très onéreuse, car généralement, les organisations qui collectent des données cherchent souvent à en tirer profit de leur échange, entravant l'accès pour les budgets de recherche (Keivanpour, 2024). De surcroît,la collecte des ressources présente des défis, notamment en matière de dispersion des ressources sur le territoire, du manque de contrôle sur la manière dont les propriétaires actuels vont s'en départir et de contamination des matériaux collectés (Frayret, 2024). Il est crucial de prévoir les volumes et les niveaux de contamination pour planifier efficacement les opérations de collecte sans augmenter les émissions de gaz à effet de serre (Frayret, 2024). Cela inclut également la recherche de moyens pour encourager la participation citoyenne à la collecte volontaire, par exemple en utilisant des incitatifs appropriés.

## 2.5. Les défis numériques : une approche prospective pour la convergence des transitions numériques et écologiques

Le défi numérique représente une transition entre le numérique et l'écologie, nécessitant une nouvelle approche en matière de planification et de gestion du territoire et de mobilité, c'est-à-dire la manière dont nous occupons et déplaçons sur le territoire (Deron, 2024). Une attention particulière doit être portée à l'importance d'une approche à long terme pour surmonter les défis actuels et explorer de nouvelles possibilités. En outre, Il est également essentiel de réguler l'utilisation du numérique, de promouvoir de nouveaux modèles d'affaires responsables et de considérer l'empreinte écologique du numérique. La sobriété numérique est une vision centrale pour réduire les impacts environnementaux des technologies numériques (Deron, 2024).

L'absence de véritables experts de la transition a été mise en avant, soulignant l'importance de miser sur des approches intersectorielles afin de profiter de la diversité des savoirs, incluant des connaissances non strictement académiques (Deron, 2024). L'approche de

M. Deron comprend quatre étapes clés : l'exploration des futurs possibles, l'identification d'un futur souhaitable, la définition des chemins de transition et le partage des savoirs (Deron, 2024). Par ailleurs, les chercheurs ont identifié 33 étapes clés pour la transition écologique, mettant en avant des approches telles que l'économie circulaire et la mutualisation des ressources (Deron, 2024). Enfin, Deron (2024) souligne la nécessité de développer des outils de quantification des impacts environnementaux des technologies numériques, tels que les indicateurs de performance environnementale, pour guider les processus d'innovation vers une utilisation plus responsable des ressources (Deron, 2024).

Dans ce contexte, Geoffron (2017) a mis la lumière sur le rôle important de la numérisation dans la transition écologique. Par exemple, la nécessité des avancées technologiques pour gérer efficacement les sources d'énergie renouvelable. Dans le cadre des smart cities, Geoffron (2017) affirme la nécessité d'intégrer les technologies numériques dans la gestion et la planification des villes en optimisant les données pour améliorer certains services, tels que la gestion des déchets, le logement, le transport, la santé et l'éducation. Ce chercheur met alors l'accent sur la capacité des smart cities à combiner des solutions ad hoc en incluant les technologies numériques afin de créer un environnement urbain durable en faisant face à divers défis, tels que la pollution. Cela favorise une transition harmonieuse entre le numérique et l'écologie.

La relation entre la transition écologique et numérique a été aussi discuté par Longaretti et Berthoud (2021), en évaluant l'effet potentiel des différentes technologies sur l'environnement, tels que la consommation massive de l'énergie et la production des déchets électroniques. Un autre défi mis en avant, par ces chercheurs, concerne l'intensification de l'obsolescence et l'accélération du consumérisme. Ces chercheurs ont déclaré également qu'il est crucial de revoir les modèles économiques ainsi que la taille de l'économie afin d'assurer une transition écologique efficace.

## 2.6. Vers un jumeau numérique géospatial au service de l'économie circulaire : Le cas de la valorisation des matières organiques

Ce paragraphe met le point sur l'importance de l'optimisation pour la gestion des matières organiques dans une perspective d'économie circulaire (Mostafavi, 2024). Fares (2021) a abordé l'idée de la valorisation et la gestion optimale des matières organiques pour aider à la transition vers une économie circulaire, en mettant en avant le cycle de renouvellement des matériaux biologiques, notamment l'exploration des ressources, la fabrication des matériaux biologiques, la récupération de l'énergie et la réintégration des nutriments dans la nature (Fares, 2021). Ce processus vise à développer un système durable permettant de recycler et de réutiliser les mêmes matériaux biologiques et minimiser le recours aux ressources naturelles. Un autre projet a été proposé par (Mostafavi, 2024) : le projet Optimi-O. Ce dernier vise à développer des outils pour optimiser la chaîne de valeur des matières organiques, en se concentrant sur l'outil géospatial multidimensionnel d'aide à la décision (Mostafavi, 2024). Le jumeau numérique géospatial permet de modéliser virtuellement l'espace et d'explorer différentes stratégies d'optimisation (Mostafavi, 2024). De plus, l'analyse des données spatiales, environnementales et de transport est essentielle pour une gestion efficace des matières organiques (Mostafavi, 2024).

Cependant, il est essentiel de prendre en compte divers facteurs économiques, sociaux et technologiques pour garantir une gestion efficace (Mostafavi, 2024). Des défis tels que la confidentialité des données et la sécurité doivent être surmontés pour une adoption réussie de cette technologie (Mostafavi, 2024).

## 2.7. Transformer les déchets en richesse : comment l'intelligence numérique peut-elle favoriser la circularité dans l'entretien hivernal des routes ?

L'intelligence numérique offre des solutions pour transformer les résidus issus de l'entretien hivernal des routes en matériaux utiles et réutilisables (Lamghari, 2024). Cependant, ces résidus contiennent divers contaminants, tels que des métaux lourds et des hydrocarbures, imposant ainsi une réglementation stricte pour leur utilisation (Lamghari,

2024). Il est également important de noter que la plupart des résidus recyclés peuvent être utilisés pour la construction et la répartition des routes ainsi que comme abrasif hivernal. En effet, la collecte des matériaux recyclés est plus élevée en milieu urbain (Lamghari, 2024). Ce surplus pourrait être utilisé pour approvisionner les autoroutes, mais nécessiterait une optimisation logistique supplémentaire (Lamghari, 2024). Toutefois, ils ne conviennent pas pour les couches filtrantes en raison de la présence de contaminants post-traitement (Lamghari, 2024). Une simulation a révélé une réduction de la consommation de ressources vierges de 2 % grâce à ces pratiques (Lamghari, 2024). Cette initiative s'aligne avec les principes de l'économie circulaire, qui aide à réduire les déchets en favorisant le recyclage et la réutilisation des ressources (Prioux et al., 2020). Selon ces chercheurs, une combinaison des données, de la science et de l'analyse de l'environnement permet de faciliter la sélection des technologies adéquates et durables pour la transformation des déchets en coproduits utiles (Prioux et al., 2020).

## 2.8. Optimisation de la conception et du pilotage de systèmes logistiques de l'économie circulaire : projets et défis

L'importance de l'intelligence numérique et des modèles de simulation dans l'optimisation des systèmes logistique de l'économie circulaire est mise en avant. En fait, ces outils peuvent dynamiser les activités des *Fab Labs*, encourager l'apprentissage et l'échange de connaissances et de trouver les meilleures options de conception et de fonctionnement pour ces systèmes (Frayret, 2024). Les défis liés à la collecte des ressources dispersées sur le territoire ont été abordés en mettant en avant l'utilisation de modèles d'optimisation pour évaluer l'efficacité des points de collecte, analyser les données de traçabilité des matériaux collectés et concevoir des réseaux d'échange de ressources (Frayret, 2024). L'importance de la participation citoyenne à la collecte volontaire réside dans l'adoption des incitatifs appropriés. Cela met la lumière sur les projets qui visent à optimiser la collecte des résidus agricoles et à réduire la consommation énergétique résidentielle en modélisant les comportements des occupants (Frayret, 2024).

Par ailleurs, les innovations logistiques sont cruciales pour la mise en place de l'économie circulaire (Fernandes et Kadio, 2018). En d'autres termes, pour répondre aux objectifs de

l'économie circulaire il faut optimiser la conception des systèmes logistiques afin d'améliorer les pratiques logistiques. Dans le même contexte, Fulconis et Philipp (2017) ont remis en question le modèle de packaging actuel, conçu pour les chaînes logistiques linéaires, et ont suggéré un nouveau modèle de packaging qui s'aligne avec les principes de l'économie circulaire. Ce modèle se caractérise par la facilité de démontage et la durabilité matérielle. Il vise également à maximiser les ressources et à diminuer les déchets (Fulconis et Philipp, 2017). Pour résumer, le modèle proposé s'oriente plutôt vers l'économie circulaire et contribue à la transition des systèmes logistiques vers une économie circulaire.

## 2.9. L'apport du Machine Learning à la transition vers l'économie circulaire dans le secteur d'aérospatiale :

Plusieurs secteurs s'intéressent aujourd'hui à la circularité afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre, notamment le secteur de l'aérospatiale. En effet, les pratiques se concentrent sur la réduction de l'impact environnemental par l'utilisation d'énergies renouvelables et de matériaux légers (Keivanpour, 2024). Toutefois, des défis et des motivations liés à la circularité se présentent, tels que la nécessité de revaloriser les matériaux utilisés dans la fabrication des moteurs, de l'identification des pièces à recycler, et d'investir dans des technologies durables (Keivanpour, 2024). Le machine learning est considéré comme une solution potentielle pour optimiser la conception, la fabrication et le recyclage des pièces d'avion (Keivanpour, 2024). Cet outil permet aussi de favoriser la transition vers une économie circulaire dans l'aérospatiale, en relevant les défis liés à la qualité des données et à l'interprétation des résultats pour garantir le succès de ces initiatives (Keivanpour, 2024). En effet, Le machine Learning contribue à la transition vers une économie circulaire en se basant sur les techniques de la science des données (Prioux et al., 2020). Il permet également de catégoriser les procédés en fonction de leurs impacts environnementaux et d'améliorer la visualisation des données afin de faciliter le processus de prise de décision (Prioux et al., 2020).

## 2.10. Système de gestion intelligent et durable du marc de café : de déchets à ressources

Pour optimiser le processus de gestion de déchets, il faut intégrer les technologies numériques, comme la blockchain et l'Internet des Objets (IoT) (Bachiri et El Kadiri, 2024). Ces outils permettent d'améliorer le tri, le traitement et la valorisation des déchets. Toutefois, la gestion responsable des déchets ne se limite pas à l'utilisation des technologies avancées, mais elle implique également les résidents ainsi que les entreprises (Bachiri et El Kadiri, 2024).

La conception d'un système de logistique de transport durable, écologique et économiquement viable pour la gestion des déchets présente un défi. Prenons l'exemple de la gestion des déchets de marc de café. Les technologies, telles que les poubelles intelligentes, jouent un rôle important dans l'analyse des quantités de marc de café et l'optimisation des trajets de collecte (Chaabane et Jabbarzadeh, 2024). D'autre part, en cas de retard de collecte, les technologies de déshydratation coûteuses pourraient être nécessaires, soulevant des questions sur les emplacements des installations, la capacité de traitement des centres et les coûts de transport (Chaabane et Jabbarzadeh, 2024). De plus, l'incertitude quant aux quantités collectées pourrait influencer les coûts. Par exemple, une augmentation de ces quantités pourrait réduire les coûts, rendant ainsi le modèle économique plus avantageux (Chaabane et Jabbarzadeh, 2024). Dans le même contexte, Haddoudi et al., (2014) ont fourni une perspective globale sur la gestion intelligente et durable du marc de café. Ils ont mis l'accent sur la valorisation du marc de café en procédant à l'extraction de l'huile et en analysant son effet antioxydante. Ces chercheurs se focalisent sur le processus de transformation du déchet agricole en une ressource valorisable. Pour se faire, il est important de penser aux systèmes intelligents et durables pour la gestion du marc de café. En effet, ces outils sont cruciaux pour contribuer à la transition écologique (Haddoudi et la., 2014).

Les jumeaux numériques sont un outil performant pour surmonter ce défi. Cet outil permet de prévoir les tendances sur cinq ans, en étudiant l'intérêt des cafés à participer au projet en termes de revenus et la viabilité financière globale (Chaabane et Jabbarzadeh, 2024).

Enfin, la valorisation du marc de café pour la production de charbon actif ou la culture de champignons est une question à explorer pour déterminer la viabilité économique.

Il est important ainsi d'adopter des stratégies pertinentes permettant de gérer d'une manière durable des déchets, comme l'investissement dans les infrastructures alimentées par les technologies numériques afin de faciliter le processus de collecte sélective des déchets (Bachiri et El Kadiri, 2024).

Nous présentons ci-dessous un tableau récapitulatif (cf. tableau 1) qui propose un aperçu des divers projets portant sur la transition vers une économie circulaire. Il met en avant les tendances actuelles dans la transformation vers une économie circulaire en utilisant l'intelligence numérique. Ce tableau présente également les opportunités potentielles ainsi que les défis afin d'améliorer l'efficacité et la durabilité des systèmes abordés.

*Tableau 1: Vue d'ensemble des projets sur la transition vers une économie circulaire*

| | *L'intelligence numérique au service de la circularité* | *Optimisation des systèmes logistiques de l'économie circulaire* | *Le « machine learning » pour la transition vers l'économie circulaire* | *Les systèmes de gestion de déchets à ressources* |
|---|---|---|---|---|
| *Opportunités* | – La transformation des résidus en matériaux réutilisables<br>– La réduction de la consommation de ressources | – Réseau d'échange de ressources<br>– Optimisation des systèmes logistiques<br>– Encourager l'apprentissage et l'échange de connaissances | – Réduction des émissions de gaz à effet de serre<br>– Optimiser la conception, la fabrication et le recyclage<br>– Utiliser des matériaux durables et recyclés | – Logistique durable pour la gestion des déchets<br>– Utilisation des poubelles intelligentes pour optimiser les trajets<br>– L'utilisation des jumeaux numériques pour prévoir les tendances |
| *Défis* | – Réglementations strictes sur les contaminants<br>– Adaptation des résidus pour les utiliser dans toutes les applications | – Les défis liés à la collecte et à l'efficacité des points de collecte<br>– Logistique optimale pour collecter les ressources dispersées<br>– Analyse des données de traçabilité des matériaux collectés | – Identification des pièces à recycler<br>– Les défis liés à la qualité et l'interprétation des données<br>– Investissement initial élevé dans les technologies durables | – Les défis liés à la capacité de traitement des données<br>– L'incertitude des quantités collectées |

Pour synthétiser le propos, les sections abordées dans ce rapport peuvent se décliner sous forme de *clusters* thématiques (figure 2). Le thème central intitulé « Transition vers l'économie circulaire », présenté sous forme de cercle, relie tous les clusters. Le premier *cluster* englobe les thèmes qui tournent autour de l'interaction entre l'écologique et le numérique, notamment la transition écologique et numérique et l'impact environnemental du numérique. En d'autres termes, ce *cluster* se focalise sur la synergie et les répercussions croisés entre ces deux transitions afin de comprendre la contribution des initiatives numériques dans la réduction de leurs impacts négatifs sur l'environnement. Ensuite, le deuxième *cluster* évalue comment l'application de l'intelligence numérique, telle que le Machine Learning, permet de résoudre les défis de la circularité. Quant au troisième *cluster*, il concerne la planification et la gestion. En effet, il met l'accent sur les approches prospectives permettant de comprendre les défis liés à la convergence des transitions numériques et écologiques et de prévoir des stratégies fiables pour surmonter ces défis. Un autre thème intéressant, qui représente le *cluster* 4, s'intéresse aux outils de soutien de l'économie circulaire. Il se concentre sur les solutions et les innovations technologiques qui permettent d'améliorer la circularité. Enfin, le *cluster* 5 focus sur les applications pratiques de l'économie circulaire, comme la transformation des déchets et le pilotage de systèmes intelligents et durables.

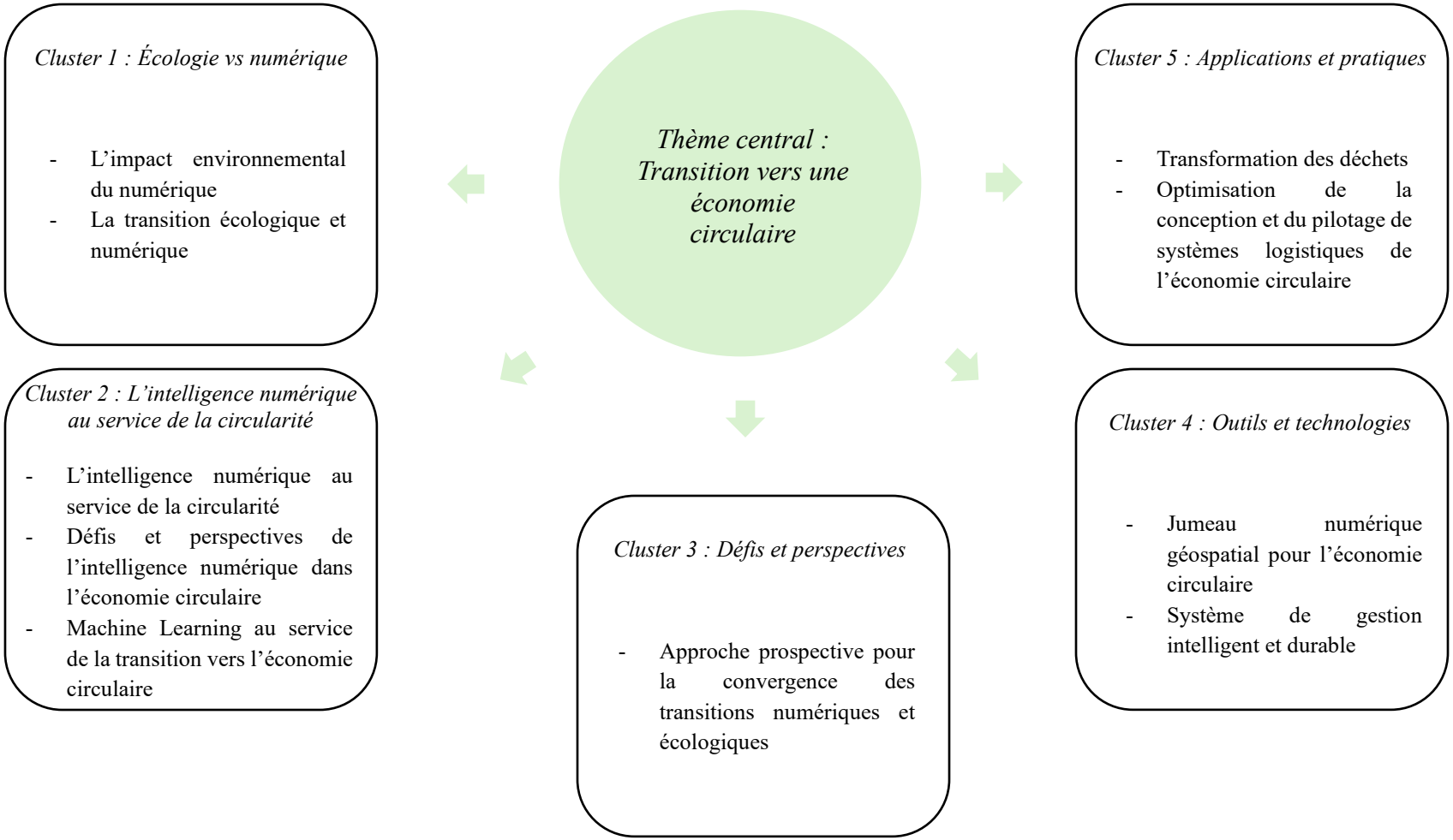



*Figure 1 : Quand le numérique rencontre l'écologie : Synergie et Défis*

# Conclusion :

En conclusion, la discussion portant sur l'intelligence numérique au service de l'économie circulaire a mis en évidence l'importance croissante des données et des technologies numériques dans la transition vers des pratiques économiques plus durables. Les présentations ont souligné la diversité des approches de l'économie circulaire, telles que la mutualisation des ressources et l'économie de la fonctionnalité, pour prolonger la durée de vie des produits et réduire leur impact environnemental. L'utilisation judicieuse de l'intelligence numérique a été présentée comme un outil polyvalent pour favoriser la circularité des ressources dans différents secteurs.

Ce rapport a ainsi exploré les opportunités offertes par l'intelligence numérique pour relever les défis de la transition vers une économie circulaire et soutenable, mettant en avant l'importance de l'innovation et de la collaboration pour un avenir plus respectueux de l'environnement. Toutefois, il est essentiel de reconnaître que l'adoption généralisée du numérique dans le cadre de l'économie circulaire n'est pas sans poser certains défis.

Les problématiques soulevées, telles que l'impact environnemental croissant, la dépendance aux ressources non renouvelables, la nécessité d'une sobriété numérique, et la quantification des impacts environnementaux, nécessitent des solutions intégrées et novatrices. Il est crucial de veiller à ce que les initiatives numériques visant à soutenir l'économie circulaire contribuent réellement à la durabilité globale, en évitant les effets rebond et en anticipant les conséquences inattendues.

Les enjeux liés à la collecte et à l'utilisation des données, notamment en termes de confidentialité, de sécurité et d'accessibilité, exigent également une approche équilibrée qui favorise le partage responsable des informations tout en protégeant les droits et les intérêts des parties prenantes.

En somme, pour garantir une gestion efficace et éthique de l'information dans le cadre de l'économie circulaire, il est impératif de prendre en compte les dimensions multidimensionnelles du développement durable et d'adopter une approche holistique qui

intègre les principes économiques, environnementaux et sociaux. Cela nécessitera un engagement continu en faveur de l'innovation, de la collaboration et de la responsabilité, afin de créer un avenir où le progrès technologique est véritablement synonyme de progrès environnemental et social.

# Bibliographie


Arushanyan, Y., Ekener-Petersen, E., et Finnveden, G. (2014). Lessons learned - Review of LCAs for ICT products and services. *Computers in Industry*, 65(2), 211-234.

Bachiri, H., et El Kadiri, K. (2024). Transformation vers l'Urbanisme Durable : Pôle urbain Hay Riad en Avant-Garde de la Gestion des Déchets. *International Journal of Economic Studies and Management*, 4(2), 326-336.

Bahn. O. (2024). Mot de bienvenue et introduction au panel de discussion. Lors de l'événement « L'intelligence numérique au service de l'économie circulaire », HEC Montréal, Montréal, Canada.

Chaabane, A., et Jabbarzadeh, A. (2024). Système de gestion intelligent et durable du marc de café : de déchets à ressources. Présentée à l'événement « L'intelligence numérique au service de l'économie circulaire », HEC Montréal, Montréal, Canada.

Commission Européenne (2022). Les performances de l'UE en matière de science, de recherche et d'innovation 2022. https://op.europa.eu/fr/publication-detail/-/publication/c24f38a8-8fce-11ed-b508-01aa75ed71a1

Delen, D., et Ram, S. (2018). Research challenges and opportunities in business analytics. *Journal of Business Analytics*, 1(1), 2-12.

Deron, M. (2024). Le défi numérique : une approche prospective pour la convergence des transitions numériques et écologiques. Présenté à l'événement « L'intelligence numérique au service de l'économie circulaire », HEC Montréal, Montréal, Canada.

Fares, R. (2021). Economie circulaire et les ressources intégrées. *Journal de l'Economie Circulaire et Développement Durable*, 1(1), 19-23.

Fernandes, V., et Kadio, C. (2018). Intégration de l'économie circulaire dans le management de la supply chain : une étude exploratoire. *Logistique & Management*, 26(1), 15-25.

Frayret, J.M. (2024). Optimisation de la conception et du pilotage de systèmes logistiques de l'économie circulaire : projets et défis. Présentée à l'événement « L'intelligence numérique au service de l'économie circulaire », HEC Montréal, Montréal, Canada.

Fulconis, F., et Philipp, B. (2017). Emballage, logistique et économie circulaire : prémices d'un nouveau packaging scorecard. Dans *CNRIUT'2017-Congrès-National de la Recherche des IUT*, 1-18.

Geoffron, P. (2017). Comment transition numérique et transition écologique s'interconnectent-elles?. *Annales des Mines-Responsabilité et Environnement*, 87(3), 17-19. Institut Mines-Télécom.

Glaus. M. (2024). Mot de bienvenue et introduction au panel de discussion. Lors de l'événement « L'intelligence numérique au service de l'économie circulaire », HEC Montréal, Montréal, Canada.

Haddoudi, M., Mellouk, H., Bejjany, B., Dani, A., et Digua, K. (2014). Valorisation du marc du café : extraction de l'huile et évaluation de son activité antioxydante. *Les technologies de laboratoire*, 8(36), 29-37.

Haldar, A., et Sethi, N. (2022). Environmental effects of Information and Communication Technology-Exploring the roles of renewable energy, innovation, trade and financial development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 153, 111754.

Hankel, A., Heimeriks, G., et Lago, P. (2019). Green ICT adoption using a maturity model. *Sustainability*, *11*(24), 7163.

IVADO, (s.d.) L'intelligence numérique, pour passer de la donnée à la décision. Définition : intelligence numérique. Saisi de : https://ivado.ca/lintelligence-numerique-pour-passer-de-la-donnee-a-la-decision/

Keivanpour, S. (2024). L'apport du Machine Learning à la transition vers l'économie circulaire dans le secteur aérospatial. Présentée à l'événement « L'intelligence numérique au service de l'économie circulaire », HEC Montréal, Montréal, Canada.

Klimova, A. (2018). Systematic literature review of using knowledge management systems and processes in green ICT and ICT for greening. *Technology for smart futures*, 329–344.

Lamghari, A. (2024). Transformer les déchets en richesse : comment l'intelligence numérique peut favoriser la circularité dans l'entretien hivernal des routes.

Présentée à l'événement « L'intelligence numérique au service de l'économie circulaire », HEC Montréal, Montréal, Canada.

Lee, S. M., Park, S. H., et Trimi, S. (2013). Greening with IT: practices of leading countries and strategies of followers. *Management Decision*, *51*(3), 629–642.

Longaretti, P.Y., et Berthoud, F. (2021). Le numérique, espoir pour la transition écologique?. *L'Economie politique*, (2), 8-22.

Mostafavi, M. (2024). Vers un jumeau numérique géospatial aux services de l'économie circulaire : le cas de valorisation des matières organiques. Présentée à l'événement « L'intelligence numérique au service de l'économie circulaire », HEC Montréal, Montréal, Canada.

OQLF (2023). Économie circulaire. https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/26560537/economie-circulaire

Prioux, N., Ouaret, R., Chen, Z., Hetreux, G., et Belaud, J.P. (2020). Evaluation environnementale couplée à l'analyse multidimentionnelle des données pour l'économie circulaire. Dans *13ème Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et Simulation (MOSIM2020)*, Agadir-Maroc, 1-8.

Raufflet. E. (2024). Mot de bienvenue et introduction au panel de discussion. Lors de l'événement « L'intelligence numérique au service de l'économie circulaire », HEC Montréal, Montréal, Canada

Rout, S., et Samantaray, S. (2023). Green ICT: Exploring the Role of IoT-Enabled Technologies in Small-Scale Businesses. In *International Conference on Information and Communication Technology for Competitive Strategies* (pp. 309–321). Singapore: Springer Nature Singapore.

Santarius, T., et Wagner, J. (2023). Digitalization and sustainability: A systematic literature analysis of ICT for Sustainability research. *GAIA-Ecological Perspectives for Science and Society*, *32*(1), 21–32.