Université Panthéon Sorbonne

Mémoire Master 1 MIAGE

Économie circulaire : quel rôle pour la blockchain dans la phase de recyclage ?

Réalisé par : Maxence BODO

Encadré par : Nicolas Herbaut

2021-2022

ATTESTATION SUR L'HONNEUR DE NON PLAGIAT

Je soussigné BODO Maxence déclare sur l'honneur que ce mémoire est le fruit d'un travail personnel et que je n'ai ni contrefait, ni falsifié, ni copié tout ou partie de l'oeuvre d'autrui afin de la faire passer pour mienne.

Toutes les sources d'information utilisées (supports papiers, audiovisuels et numériques) et les citations d'auteur ont été mentionnées conformément aux usages en vigueur. Je suis conscient que le fait de ne pas citer une source ou de ne pas la citer clairement et complètement est constitutif de plagiat, que le plagiat est considéré comme une faute grave au sein de l'Université et qu'il peut être sévèrement sanctionné.

Date et signature :

24/08/2022

BODO Maxence

Table des matières

ATTESTATION SUR L'HONNEUR DE NON PLAGIAT **3**

Table des matières **4**

Méthodologie de recherche **5**

Remerciement **6**

Introduction **7**

Contexte et motivation **8**

La blockchain 9

L'économie circulaire 12

Etat de l'art **16**

Preuve de confiance, traçabilité et détection des fraudes **16**

Sources principales: [12] [13] 16

Vision globale 16

Discussions 18

L'intégration de l'économie circulaire dans l'industrie 4.0 **21**

Sources principales: [25] [30] 21

Vision globale 21

Efficience de la blockchain 24

Le recyclage et la blockchain **28**

Sources principales: [26] [28] 28

Recyclage du plastique dans l'industrie 4.0 28

Limite de la blockchain dans le recyclage des déchets 32

Conclusion **35**

Annexe **36**

Table des figures 36

Bibliographie **37**

Méthodologie de recherche

Pour réaliser ce mémoire état de l'art, j'ai tout d'abord commencé par faire une liste de documents qui me semblaient pertinents au vu de ma problématique à l'aide de mots clés tel que "Blockchain", "Supply chain", "Industry 4.0", "recycling"s ou encore "Circular Economy".

Une fois cela fait, j'avais à ma disposition une dizaine de documents que j'ai triés selon leurs contenus, certains mentionnent la blockchain d'autres son intégration dans l'économie circulaire et d'autres le recyclage grâce à la blockchain, j'ai ainsi pu trouver mes trois parties.

J'ai pu donc par la suite commencer à lire les documents dans le détail et commencer la rédaction des trois parties de ce mémoire.

Remerciement

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce mémoire.
Je voudrais, dans un premier temps, remercier mon directeur de mémoire M. Herbaut, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion. Sans compter sur sa disponibilité à suivre mes travaux, pendant toute mon année.
Je remercie également toute l'équipe pédagogique de l'université de Paris 1 et les intervenants responsables de ma formation, pour avoir assuré la partie théorique de celle-ci.

Enfin, je voudrais exprimer ma profonde gratitude à toutes les autres personnes qui, même sans être citées personnellement, ont tout autant contribué à la réalisation de ce mémoire par leurs conseils et leurs diverses compétences.

Introduction

La rareté des ressources est une des bases de notre économie : plus une ressource est rare, plus son prix est élevé. Leurs raretés et leurs prix s'expliquent par le système de consommation linéaire sur lequel est basé notre société, un objet est produit, consommé, puis détruit [1].

En raison de la nature non durable de l'économie linéaire, la question de la rareté des ressources doit être revue. En effet, l'humanité génère actuellement un déficit en ressources de 1.75 Terre par an (Global Footprint Network, 2020), c'est dans ce contexte que le concept d'économie circulaire a été créé.

Le concept de ressource réutilisable n'est pas nouveau, malgré cela, le concept de circularité est apparu en économie dans les années 1970. Malgré cela, l'économie circulaire peut être considérée comme une pratique qui est encore en développement autant dans la recherche que dans sa mise en pratique. Elle montre un grand potentiel pour le développement durable en raison de sa capacité à réduire les déchets et à changer les modèles de consommation actuels.

En parallèle du développement de cette nouvelle façon de consommer, nous sommes entrés au fil des années au sein de la quatrième révolution industrielle (Industry 4.0) qui se distingue par l'apparition de technologies innovantes pour le traitement et le suivi de données. On peut citer par exemple l'intelligence artificielle, l'internet des objets ou encore la blockchain, technologies qui peuvent être considérées comme un catalyseur clé pour surmonter les défis de l'économie circulaire [2].

En effet, il y a de réels défis quant à notre mode de consommation. En 1964, 15 millions de tonnes de plastique ont été produites, 359 millions de tonnes en 2018, chiffre qui devrait tripler au cours des trois à quatre prochaines décennies [3]. La plupart de ces déchets plastiques finissent dans les décharges, par exemple en 2015, 60% ont été jetés ou déversés dans des sites d'enfouissement, 30% ont été incinérés et 10% ont été recyclés. [4]. Cet exemple nous montre donc l'urgence actuelle en ce qui concerne le recyclage. Nous allons donc voir dans ce mémoire état de l'art au travers de divers articles de recherche, si la blockchain pourrait permettre d'aider les entreprises à passer à une économie circulaire grâce aux caractéristiques de la blockchain qui seront vus dans ce mémoire.

Contexte et motivation

Nous sommes en 2022 et les enjeux écologiques n'ont jamais été aussi discutés. D'après Global Footprint Network, l'humanité consommerait actuellement 1.75x les ressources renouvelables de la planète, ce qui souligne que notre système actuel de consommation court à la catastrophe. Cela entraîne de graves problèmes sociaux avec une difficulté croissante à nourrir la population mondiale et à assouvir les besoins en énergie.

A cela, nous pouvons ajouter les pénuries de certains métaux comme le scandium, le dysprosium et une dizaine d'autres qui composent les terres rares. Ces matériaux mettent des milliers d'années à se créer et sont en stock limité malgré une utilisation croissante, notamment pour les ordinateurs, les téléphones, la fibre optique, les batteries nucléaires… [5]
On peut admettre que ce mode de consommation n'est pas viable et doit changer très rapidement : c'est là qu'intervient l'économie circulaire.

L'économie circulaire telle qu'elle a été imaginée permet de consommer de manière plus responsable en minimisant l'impact environnemental dès l'élaboration du produit (avec une extraction plus responsable humainement et écologiquement). Par exemple, remettre dans le circuit économique les produits ne répondant plus aux besoins du premier consommateur, réparer les produits au lieu de les jeter et enfin réutiliser les matières premières issues des déchets. Le but étant donc de réduire au maximum la production de déchets et pour les déchets restants de les recycler au maximum.

Un des grands défis de l'économie circulaire est donc de faire accepter aux entreprises et au grand public l'importance de réutiliser des matières premières et l'importance de consommer responsable.
Ce changement arrive progressivement avec, par exemple, en France, la loi n°2020-105 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire [6]. Cette loi composée de 130 articles incite entre autres les villes à adopter une meilleure gestion des déchets et à accentuer les actions pour le recyclage.

C'est avec cette demande de changer de modèle économique qu'intervient la blockchain.
La blockchain est une base de données Peer to Peer (modèle d'échange en réseau où chaque entité est à la fois client et serveur) qui héberge un nombre grandissant de transactions. Chaque transaction est stockée dans des blocs, une fois un certain nombre atteint, le bloc est validé par chaque membre du réseau à l'aide d'algorithmes de consensus.
Une fois la transaction validée, elle est attachée à une chaîne de blocs permettant ainsi un stockage définitif et infalsifiable des transactions.
Cette technologie pourrait devenir un important levier pour favoriser l'économie circulaire, permettant la traçabilité et la valorisation des ressources issues du recyclage des produits.
Pour citer Rémy André Ozcan, président de la fédération française des professionnels de la blockchain :
"La technologie Blockchain constitue un formidable catalyseur pour assurer la transition vers une économie circulaire. Elle permet notamment de favoriser une meilleure inclusion des acteurs de l'économie circulaire en apportant une traçabilité certaine des produits et de valoriser des déchets n'ayant actuellement aucune valeur économique. Elle constitue assurément l'une des meilleures armes pour le passage d'une économie de production linéaire à une économie circulaire"

La blockchain

La blockchain est connue pour avoir été proposée pour la première fois en 2008 par Satoshi Nakamoto dans un document intitulé Bitcoin : A Peer-to-Peer Electronic Cash System, il y expliquait une nouvelle monnaie entièrement numérique sans aucun intermédiaire [7].
Cependant, on peut aussi trouver dès 1991 des traces de ce qui, au vu de son fonctionnement, est une des premières blockchains utilisées à grande échelle. Elle a été présentée par Stuart Haber et W. Scott Stornetta dans un article intitulé How to time-stamp a digital document. Sa première utilisation à grande échelle est un système de certification décentralisé utilisé par la société Surety, cette dernière publie chaque semaine depuis 1995 un certificat cryptographique de sa base de données dans la rubrique « Annonces et objets trouvés » du New York Times, le journal étant distribué de manière journalière à plus d'un million d'exemplaires, ce certificat cryptographique est considéré comme étant infalsifiable.

NOTICES & LOST AND FOUND
(5100-5102)

Universal Registry Entries:
Zone 2 -
dS8492cgVOFAoP9kvE1XzMOrQ
HgEwzkVbVafNvIkUz99qvq8/ME
p5v9EFSG8XxzMBalGQQ==
Zone 3 -
JnFCg+HCmvhj8GmmUP7VZna71
NgZup/RfuKUQNzCHWXMuqLK
durxHQV5pSHLqBGPRlv+mg==
These base64-encoded values represent the combined fingerprints of all digital records notarized by Surety between 2009-06-03Z 2009-06-09Z.
www.surety.com 571-748-5800

Figure 9 : Trace d'une des premières blockchains

(The New York Times)

Une blockchain repose sur plusieurs principes [12],

- Un registre distribué qui est partagé entre les participants
- Une immutabilité, Il est impossible de modifier ou de supprimer ce qui a été écrit et inséré dans la blockchain dû au système de blocs reliés entre eux
- Une décentralisation, contrairement au système monétaire actuel (qui reste l'utilisation la plus connue de la blockchain), la blockchain n'a besoin d'aucun tiers de confiance qui la contrôl, les utilisateurs font consensus entre eux pour savoir si une transaction est acceptée ou rejetée.
- La confiance partagée et la transparence, cela rejoint le registre distribué, les données et les opérations sont toutes partagées entre les utilisateurs.

Ces spécificités s'expliquent par la conception de la blockchain, il s'agit d'une chaîne de blocs liés entre eux. Dès qu'une transaction a lieu, cette transaction est encapsulée dans un bloc et au bout d'un certain nombre de transactions, ce bloc est lié à la chaîne, cette action est irréversible, elle ne peut être ni supprimée ni modifiée. Ainsi, tous les utilisateurs ont accès à des enregistrements identiques et corrects. La blockchain est un registre distribué et en extension continue [29].

La sécurisation de cette blockchain se base sur la confiance de tiers et la cryptographie. Pour ajouter un nouveau bloc, un problème cryptographique doit être résolu, des utilisateurs

appelés *mineurs* vont être en compétition pour être les premier à résoudre ce problème, en échange ils reçoivent une contribution (par exemple une fraction de la somme en crypto monnaie) [12].

Ce qui rend cette chaîne si fiable c'est ce principe de *Proof Of Works*, tout ajout est vérifié et validé par une multitude de noeuds.

Tout cela correspond à la version 1.0 de la blockchain, le déploiement des différentes cryptographies et des architectures, permettant l'échange de monnaies.

Mais cette version 1.0 de la blockchain ne suffisait plus pour les différentes demandes, la blockchain a donc évolué vers sa version 2.0. Cette nouvelle version, a amené les smart contracts qui sont des protocoles capables de reconnaître automatiquement si les conditions prédéfinies de réalisation d'une transaction sont réunies, puis, le cas échéant, d'en appliquer les termes, sans intervention d'un tiers.

Un *smart contract* se définit par un vocabulaire spécifique, des règles et des pénalités qui simplifient leur utilisation même dans les cas les plus complexes. Comme dans la version 1.0, ils sont aussi visibles par tous. Ils se lancent lorsqu'ils reçoivent des données selon les règles spécifiées, si elles sont respectées le *smart contract* est exécuté sinon un message d'erreur visible par l'ensemble des noeuds est écrit.

Au départ la blockchain a été développée comme un outil permettant des transactions sécurisées et surtout décentralisées entre des utilisateurs grâce à ce système de proof-of-work. L'arrivée de la Blockchain 2.0 et des *smart contracts*, une foule de nouvelles utilisations sont apparues :

- L'assurance : avec des micro-contrats, des micro-paiements, des assurances collaboratives, une gestion plus efficace de l'identification des clients et la certification de la provenance d'un bien.
- L'état : avec la possibilité de développer le vote en ligne.
- Le secteur médical : pour les chaînes de fabrication, l'assurance, le copyright (les NFT). Ce qui rend vraiment la blockchain attirante pour divers secteurs est sa faculté à créer un échange Peer To Peer sécurisé et infalsifiable.

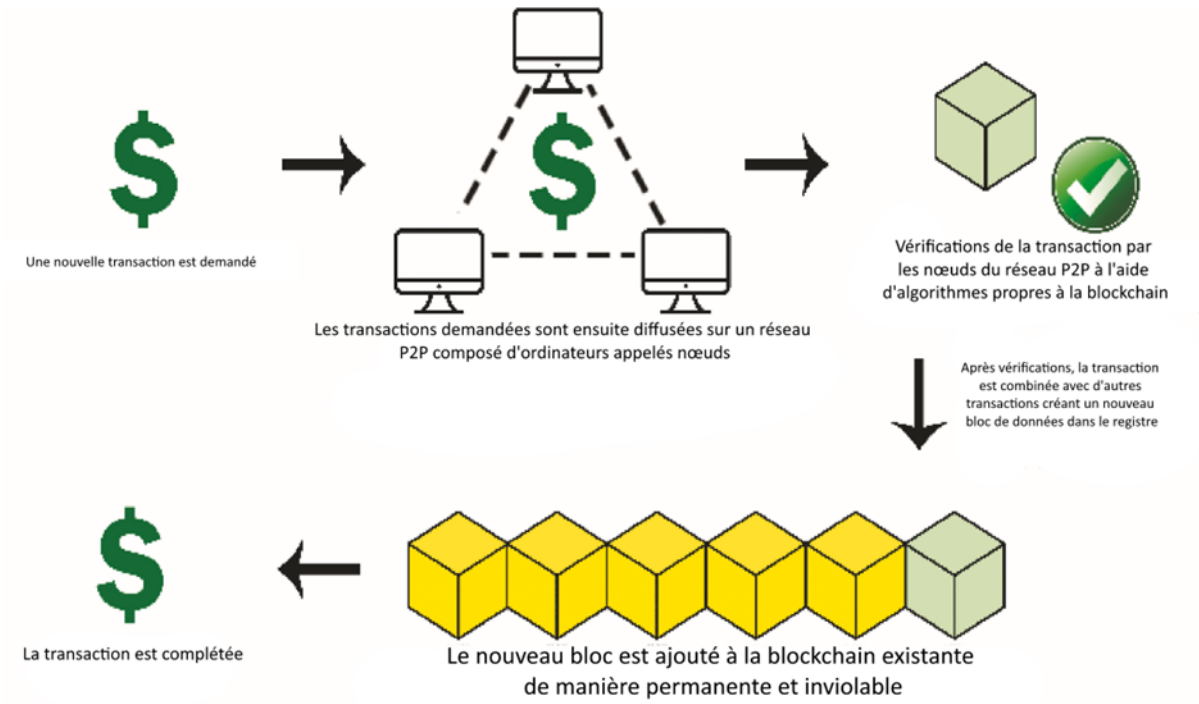

Figure 1 : Fonctionnement d'une blockchain [29]

L'économie circulaire

Comme énoncé précédemment, notre système de gestion des ressources n'est pas viable sur le long terme, selon le PNUE (Programme des nations unies pour l'environnement), dû à l'accroissement démographique et la volonté des nations émergentes de vouloir adopter un mode de consommation similaire à celle des grandes puissances. A ce rythme, le niveau de consommation deviendra critique d'ici 2050.

On peut ajouter à cela les difficultés croissantes que connaissent les entreprises pour se procurer des matières premières dues à leur raréfaction.

Une autre problématique majeure, est la quantité de ressources non renouvelables. Depuis les années 1950 leurs utilisations ont été multipliées par 20 pour l'industrie et le bâtiment. A titre d'exemple, l'étain devrait commencer à manquer d'ici 25 ans et le cuivre d'ici 35 ans.

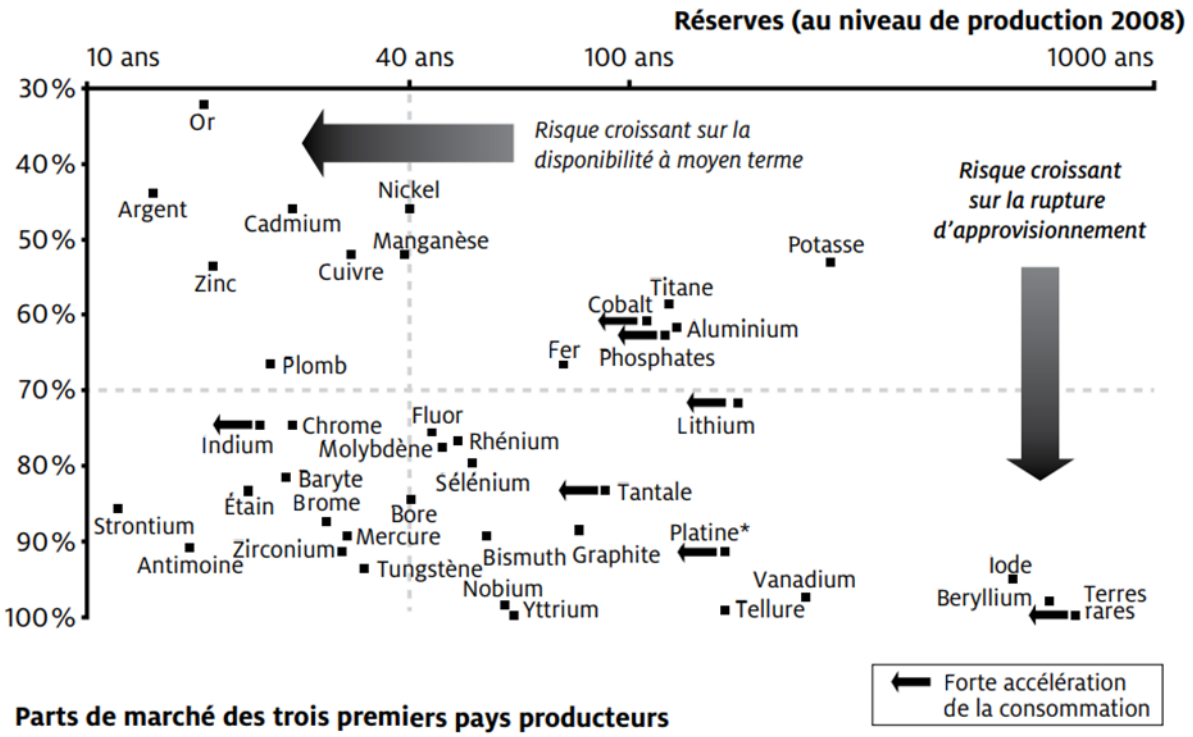

Figure 2 : Parts de marché des trois premiers pays producteurs

(Bouillon et Havard, La gestion durable des matières premières minérales, rapport déposé à l'Assemblée nationale, Paris, 2011, p. 38)

Il y a donc une réelle urgence et il est nécessaire de changer de modèle de consommation.

Le modèle dans lequel nous sommes actuellement est dit linéaire ou "make, use, dispose" : Un bien, une fois conçu, est utilisé puis, il est jeté lorsque sa durée de vie arrive à terme. En raison de la pénurie de ressource actuelle [Figure 1], nous avons pu voir que ce modèle n'est plus viable.

C'est avec ces conclusions qu'un nouveau modèle économique a été pensé : l'économie circulaire.

Ce modèle économique a été formalisé pour la première fois en 2002 par Michael Braungart et William McDonough dans *McDonough, William, and Michael Braungart. Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things. London: Vintage, 2009.*..

L'économie circulaire inclut 3 aspects: l'économie, l'écologie et le social.

D’un point de vue financier, l’économie circulaire propose un nouveau mode de consommation permettant la réutilisation des biens produits. Cela modifie donc tout le modèle économique des entreprises, au lieu de fabriquer un produit et le vendre, il faudrait tout un processus permettant le recyclage de ce produit, cela obligerait donc les entreprises à prévoir un système permettant de recycler leurs produits en prévoyant en leur sein des plateformes de recyclage ou en faisant appel à d’autres entreprises spécialisées. Cela permettrait des économies financières en réduisant la dépendance des entreprises à la fluctuation, à noter que cette augmentation de prix n’est pas dû qu'à une pénurie de matière première, mais aussi à des bouleversements géopolitiques. La Chine possède par exemple 87% de la production mondiale de magnésium [8].

L’économie circulaire en plus de réduire les coups en récupérant dans les produits recyclés les matériaux nécessaires permettrait aussi aux entreprises et États d’être moins soumis aux divers conflits géopolitiques.

En ce qui concerne l’écologie, l’économie circulaire permettrait un véritable renouveau dans notre système de consommation en encourageant à réduire les émissions de produits nocifs pour l'environnement et à réduire la consommation de matières premières. De nouveau, c’est un grand changement qui ne toucherait pas seulement les entreprises mais aussi les populations, il faudrait apprendre à consommer de manière plus responsable, en achetant moins de produits et des produits de proximité pour réduire par exemple l’émission de gaz à effet de serre lors du transport. Dans l’économie circulaire, toute la population est acteur de ce changement, pas seulement les entreprises.

Enfin pour l’aspect social, l’économie circulaire, bien que principalement portée sur le recyclage et la réutilisation des produits, porte aussi d’autres valeurs.

On peut citer plusieurs points [9] :

- L’emploi : Ce développement de l’économie circulaire permettrait une importante création d’emplois, qui dépendent de l’environnement ou qui sont créés, remplacés,

ou redéfinis dans le processus de transition vers une économie plus verte" [10], on parle de "Green Job".

- L'éthique : D'après des rapports en 2020 de l'Unicef, 160 millions d'enfants travaillent encore, 70% dans l'agriculture, 10% dans l'industrie [11], l'économie circulaire tend à supprimer cela en faisant appel à des entreprises avec plus d'éthique.

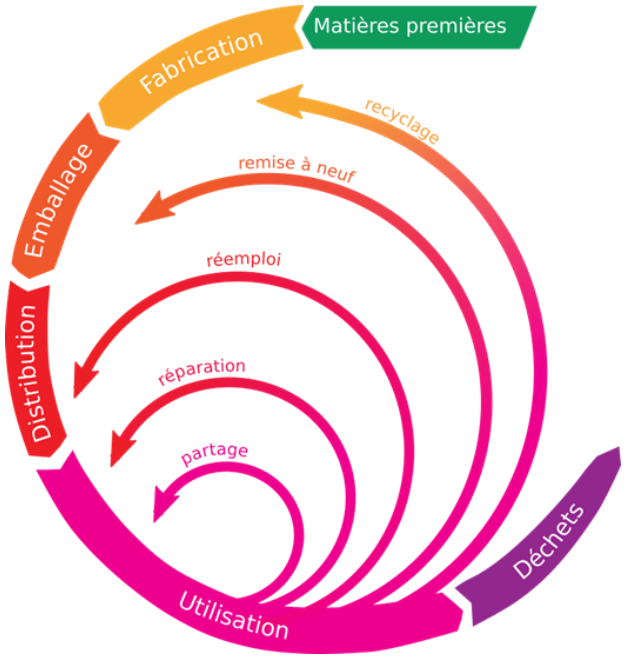

Figure 3 : Schéma simplifié du principe de l'économie circulaire

[économie circulaire Wikipédia]

En France le 10 février 2020 a été votée la loi N°2020-105 connue sous le nom de loi AGEC, composée de 130 articles, elle permet de lutter contre toutes les différentes formes de gaspillage. Elle vise à transformer l'économie linéaire en économie circulaire en se déclinant en 5 grand axes :

- Sortir du plastique jetable
- Mieux informer les consommateurs
- Lutter contre le gaspillage et pour le réemploi solidaire
- Agir contre l'obsolescence programmée
- Mieux produire

Etat de l’art

I. Preuve de confiance, traçabilité et détection des fraudes

Sources principales: [12] [13]

Vision globale

Comme nous avons pu le voir précédemment, l’économie circulaire implique de grands changements dans notre façon de produire et de consommer. La confiance, la traçabilité et la transparence sont des facteurs critiques pour les entreprises.

La blockchain et les smart contracts, peuvent être une des solutions majeures pour pouvoir traiter ces problèmes de contrefaçon, de sécurité et de confidentialité des données.

L’économie circulaire est un secteur relativement ancien datant de 2002, il y a donc déjà de nombreux standards et objectifs qui ont été déjà créés, mais aussi une grande variété d’indicateur de performances ainsi le gouvernement chinois a par exemple établi en 2007 un ensemble d’indicateurs appelé *Circular Economy Evalutation Indicators System* ou l’on peut trouver entre autres la consommation d’énergie par unité de PIB et le taux de recyclage des déchets industriels [14].

Ces indicateurs de performance peuvent ainsi être des données fiables et faciles à intégrer dans des *smart contracts*. A cela il faut ajouter l’important flux de données qui gravitent autour de l’économie circulaire qui peut être traité de manière rapide efficace et surtout autonome par ces derniers.

Nous parlons ici de preuve de confiance, traçabilité et détection des fraudes, il faut donc commencer par définir dans quelle mesure ces 3 fonctionnalités peuvent être traitées par la blockchain et dans quelle mesure elles s’intègrent à l’économie circulaire.

La preuve de confiance est une des pierres angulaires de la blockchain [15].Une de ses caractéristiques principales et la raison pour laquelle elle est utilisée pour des échanges monétaires est de fournir un enregistrement de toutes les transactions réalisées qui soit totalement infalsifiable via des mécanismes de cryptographie et de validation. Cette structure permet ainsi d'éviter la diffusion d'informations erronées et d'autoréguler le comportement d'un système (ici celui de la mise en place de l'économie circulaire par une entreprise) sans avoir besoin d'un tiers vérifiant la véracité des informations.

Concernant la traçabilité, elle offre la possibilité de suivre les produits et de fournir une multitude d'informations à leur propos (leurs origines, leurs compositions, leurs dates de fabrication...) durant tout leur cycle de vie. Cela permet ainsi de simplifier les différents cycles de l'économie circulaire et notamment le recyclage.

Ces informations peuvent vite devenir très nombreuses pour des produits plus complexes comme des ordinateurs possédant une multitude de composants et cela ne fait qu'augmenter au gré des différents recyclages.

C'est en cela que la blockchain intervient, étant un registre distribué, les informations sur les produits sont facilement accessibles et peuvent être stockées en grande quantité.

Des chercheurs ont proposé une solution appelée *OriginChain* [16] qui permettrait d'établir une plateforme de traçabilité fiable. Son fonctionnement sera détaillé dans la partie suivante.

Enfin, la dernière pierre angulaire de cette partie est la détection des fraudes. En effet, certaines entreprises se servent de l'économie circulaire et des valeurs que prône l'écologie pour améliorer leur image auprès du grand public. Ainsi certaines entreprises font en sorte d'améliorer leur image enrecourant au *Greewashing,* pratique définie par TerraChoice comme étant "Le fait d'induire en erreur les consommateurs sur les pratiques environnementales d'une entreprise en axant sa communication sur une performance environnemental qui n'est pas réellement atteinte" [17].

Cela concerne principalement la distribution auprès du grand public et n'est pas illégal seulement de la publicité mensongère.

D’autres entreprises usent d’autres pratiques frauduleuses, promettant le recyclage de produits mais ne le faisant jamais. Par exemple, la société de recyclage Stone Caslte a ainsi été condamnée en 2018 pour avoir stocké plus de mille tonnes de verre CRT (Tubes Cathodiques) illégalement et avoir ainsi contaminé les sols au plomb (Paben, Jared. “Stone Castle CEO Sentenced to Prison - E-Scrap News.” E. E-Scrap News, January 31, 2019.).

Ainsi ces trois composantes que sont la preuve de confiance, la traçabilité et la détection de fraudes sont majeures pour la problématique de l’économie circulaire. La blockchain, de par son fonctionnement, dispose de toutes les fonctionnalités nécessaires pour pallier ses problématiques

Discussions

Pour commencer, évoquons le premier point, la preuve de confiance.

Contrairement à une base de données “classiques” qui est stockée sur des serveurs centralisés appartenant à un organisme, la blockchain existe sur des réseaux avec une multitude de noeuds, permettant ainsi de totalement décentraliser le réseau.

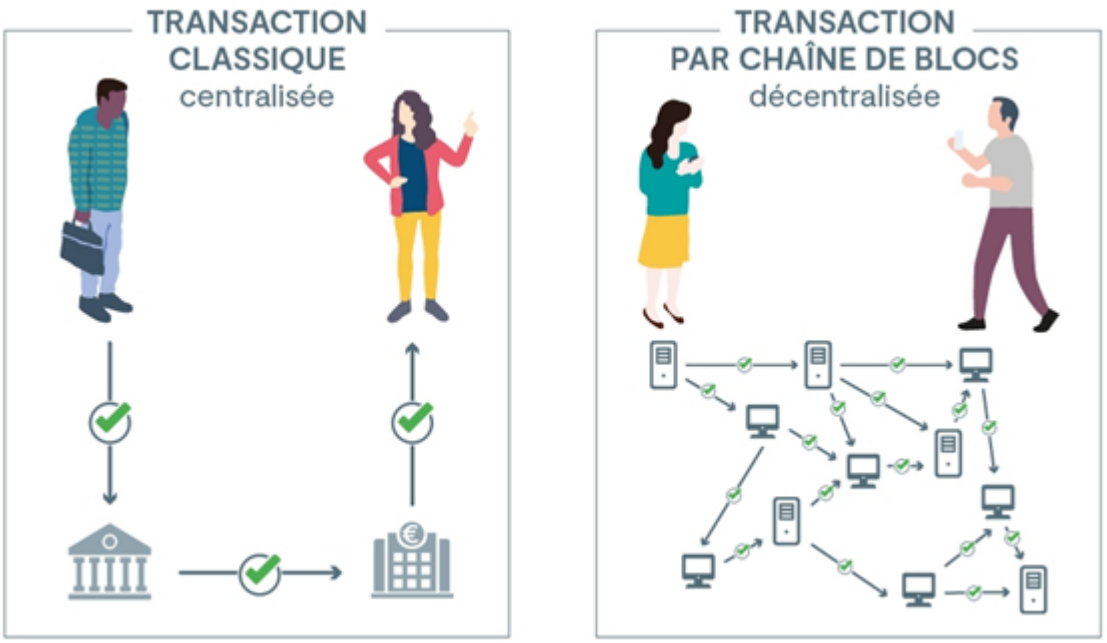

Figure 4 : Schéma simplifié d’un réseau décentralisé

(ministère de l'Économie et des Finances)

Le stockage et la maintenance des données et des enregistrements de transactions dans un registre décentralisé et distribué favorisent la fiabilité et la confiance entre les partenaires en évitant la présence d'une autorité centrale [13].

D'après [12], la mise en place d'une blockchain au sein de l'économie circulaire et donc la mise en place d'une preuve de confiance solide permettrait :

- Un réseau plus fiable et moins sujet à une action externe : dû au fait qu'une blockchain est infalsifiable et peut être automatisée, cela permet ainsi de mener une lutte contre les fraudes, mais aussi d'éviter certains problèmes comme la corruption.
- Un réseau plus rapide et donc plus efficace, les smart contracts permettraient en effet de gérer de manière automatisée et avec une parfaite confiance des transactions nécessaires au fonctionnement de l'économie circulaire (l'enregistrement de l'incorporation d'une pièce dans un moteur par exemple)
- Une économie des coûts, d'après [18], un des arguments qui pourrait pousser les entreprises à s'intéresser à ce système est la réduction des coûts, car sans besoin d'un intermédiaire externe pour vérifier que tout s'est bien déroulé, l'entreprise effectue de réelles économies.

En résumé, la mise en oeuvre d'une blockchain fournit un mécanisme de confiance pour les multiples partenaires de l'économie circulaire.

Le deuxième point capital de l'économie circulaire est la traçabilité, un des indicateurs importants pour l'économie circulaire, est le cycle de vie. Si les entreprises veulent intégrer la blockchain à leur système, il faut que cela garantisse un outil fiable et puissant permettant de tracer un produit sur toute sa durée de vie. [12]

Avant la mise en oeuvre de la blockchain, les entreprises utilisaient des processus longs et coûteux pour les processus de suivi, l'acquisition, le stockage, la distribution d'information…

Pour ce faire, plusieurs technologies ont été utilisées, les EDI (Electronic data interchange) correspondant aux échanges par mail ou téléphone et plus récemment les ERP (Enterprise Ressource Planning) .Tous ces systèmes restent des systèmes propres à une entreprise et ne

permettent pas un réel suivi coordonné entre les entreprises ce qui réduit l'efficacité globale des chaînes d'approvisionnement circulaire [12].

L'harmonisation et la certification des données circulant au sein de l'entreprise sont des activités coûteuses et chronophages Lles EDI et ERP ont pour vocation d'améliorer ce système en permettant un réel gain de temps; Elles ne permettent cependant pas d'empêcher la falsification des données.

D'après [12], la mise en place d'une blockchain dans les chaînes d'approvisionnements, permettrait un système de suivi en temps réel et des mises à jours rapides et aumatiques des données grâce aux smart contract. En effet la blockchain reposant sur un registre distribué, cela permettrait à tous les noeuds (en l'occurrence les participants de cette chaîne) de partager les informations. Grâce à cela, les partenaires peuvent suivre et tracer un changement de statut déclenché automatiquement.

Aussi, ces données de suivi étant partagées, il y aurait un réel gain de temps car les données seraient toutes stockées sous un format unique.

En résumé, la mise en oeuvre d'une blockchain permet aux chaînes d'approvisionnement de réaliser une synchronisation des informations de suivi et de réduire les ressources nécessaires pour consulter le suivi du processus, ce qui accélère à son tour l'automatisation et enlève l'utilisation d'intermédiaires à l'aide des *smart contract*

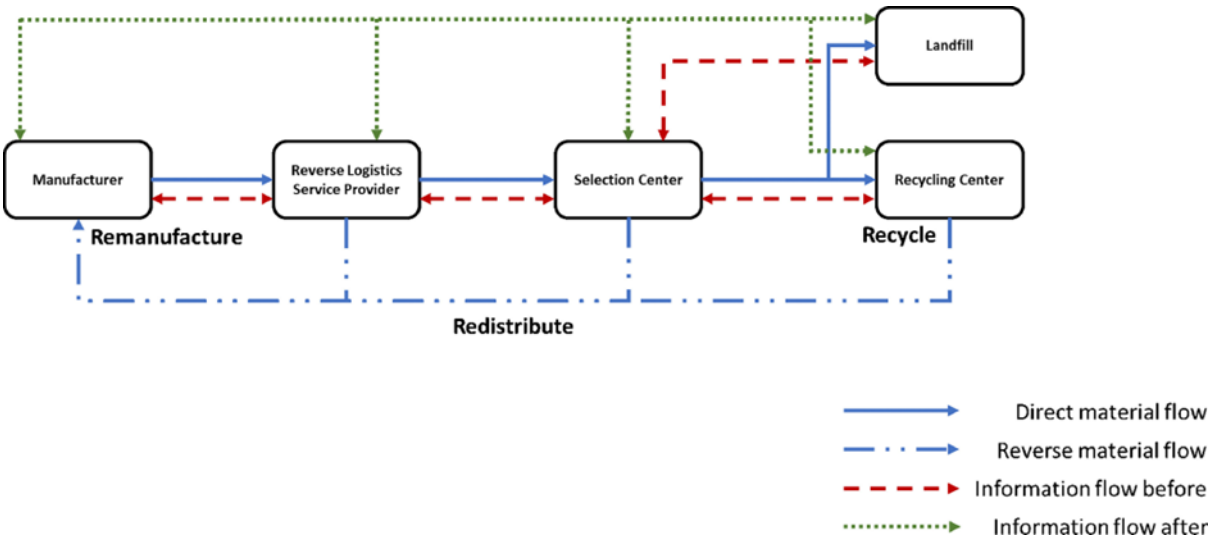

Figure 5 : Représentation des processus de l'économie circulaire [12]

La figure 4 illustre un processus type de l'économie circulaire avec le flux de marchandise (les flèches bleues), les flux d'informations avant la mise en place d'une blockchain (en rouge) et les flux d'informations après la mise en place d'une blockchain (en vert).

On a donc ici deux types de chemin pour les matériaux, une boucle circulaire ou les matériaux peuvent être re-manufacturés, redistribués ou recyclés, ainsi qu'une boucle fermée ou un matériau termine son cycle de vie à la casse, en effet les matériaux ne sont pas tous recyclables actuellement.

Les flux d'informations après l'installation d'une blockchain (en vert) résument bien ce qui a été vu précédemment. Alors qu'avant chaque entité ne communiquait qu'entre elle et de manière unidirectionnelle, avec une blockchain tous les acteurs du cycle de vie d'un matériau peuvent s'échanger des informations de manière sécurisée et sont en mesure d'interroger le système afin d'obtenir des informations sur le produit.

II. L'intégration de l'économie circulaire dans l'industrie 4.0

Sources principales: [25] [30]

Comme nous avons pu le voir dans la partie précédente, la blockchain possède plusieurs caractéristiques que sont la preuve de confiance, la traçabilité et la détection des fraudes. Nous verrons dans cette partie comment ces trois composantes peuvent s'inscrire dans l'économie circulaire et augmenter la performance des sociétés.

Vision globale

Nous allons voir dans un premier temps comment l'économie circulaire peut s'intégrer dans l'industrie 4.0.

Tout d'abord nous devons définir ce que nous entendons par industrie 4.0 et quel est le niveau d'intégration de l'économie circulaire au sein de cette nouvelle forme d'industrie. Le terme industrie 4.0 n'a jamais été clairement défini par un groupe d'étude, dans cet état de l'art nous allons donc nous baser sur les travaux de Culot et al. [20] et de la définition qu'ils ont pu en faire.

L’industrie 4.0 aurait été citée pour la première fois en Allemagne en 2011 par un groupe de travail mandaté par le Ministère fédéral allemand de l'Éducation et de la Recherche. Elle se présenterait comme une quatrième révolution industrielle, dans la continuité des autres évolutions majeures, comme l'illustre le tableau ci dessous.

Première révolution industrielle (XVIIIe siècle)	Apparition de la mécanisation avec l’invention de la machine à vapeur et l’exploitation du charbon Nouvelles industries, le textile, la métallurgie
Seconde révolution industrielle (XIXe siècle)	Extraction du pétrole et du gaz et invention de l’électricité et du moteur à explosion. Nouveau moyen de télécommunication comme le télégraphe et le téléphone
Troisième révolution industrielle (1970)	Apparition de l’informatique, du nucléaire, de l’électronique Recherche spatiale, apparition d’internet
Quatrième révolution industrielle	Numérisation de l’information et inter connectivité des appareils mobiles connectés. Apparition de l’intelligence artificielle, la nanotechnologie.

Tableau 1 : les différentes révolutions industrielles

L’industrie 4.0 est un allié de taille pour faciliter l’intégration de l’économie circulaire, en effet elle dispose d’un important arsenal de technologies comme la blockchain, le big data, l’intelligence artificielle, le cloud, l’internet des objets... Parmi ces technologies, la

blockchain se distingue, bien qu'elle comporte son lot de problèmes tels qu'énoncés par Ilarion Pavel [21] :

- Insuffisance de la capacité de transaction : étant donné que la taille d'un bloc est limitée 1Mo pour éviter les dénis de service
- Un temps de latence trop long : un bloc prend environ 12 secondes pour se propager vers les noeuds
- La consommation d'électricité : des réseaux comme le bitcoin consomme pour l'ensemble du réseau environ 400 MW ce qui représente la moitié de la puissance d'une centrale nucléaire, des solutions bien moins consommatrices commencent à arriver comme la blockchain Cardano[1]

Mais la blockchain présente aussi de grands avantages pour l'industrie 4.0 :

- Une grande fiabilité, due à sa décentralisation qui permet d'éviter des modifications non voulues ainsi que son côté immuable.
- Une transparence, comme expliqué précédemment, tous les participants du réseau de la blockchain peuvent à tout moment voir les données stockées, ainsi que toutes les modifications qui ont été faites.
- La possibilité d'automatiser des tâches de façon sécurisée grâce à la présence des *smart contracts*... [22]

La blockchain permet de mettre en place des solutions permettant aux entreprises de suivre l'origine, l'emplacement en temps réel et le statut de tout produit dans la chaîne d'approvisionnement. Ces fonctionnalités peuvent donc servir de base pour construire des solutions conduisant à une industrie plus verte et circulaire.

Plusieurs entreprises commencent à intégrer la blockchain au sein de leurs chaînes d'approvisionnement, on peut citer par exemple la chaîne de magasin Walmart qui a mis en place une blockchain afin de suivre en temps réel la livraison des marchandises [23], on peut noter également le partenariat entre La London Bullion Market Association (LBMA) et le World Gold Council (WGC) et aXedras et Peer Ledger [24]. Ce projet appelé "*The Bullion Integrity Ledge*r" est une plateforme qui permet de relier, grâce à la blockchain, toutes les

[1] https://cardano.org/

parties prenantes de l'industrie de l’or (et des métaux précieux en général). C’est une plateforme qui grâce à la blockchain est décentralisée et fonctionne en Peer-to-Peer.

Figure 6 Chaîne de distribution de l’or

Ici la blockchain est utilisée pour retracer le cycle de vie de l’or à mesure qu’il traverse la chaîne de distribution. Chaque fournisseur, document et transaction est enregistré au sein de la blockchain durant son cycle de vie, le système permet ainsi d’éviter les fraudes en gardant une trace immuable de chaque action faite durant le cycle de vie du matériau.

Cet exemple illustre comment la blockchain peut être intégrée dans des processus complexes comme peuvent être ceux du suivi des métaux précieux. Nous allons maintenant voir comment cette blockchain peut être intégrée au sein de l’économie circulaire et tout particulièrement pour le recyclage.

Efficience de la blockchain

Rehman Khan et al. [25] ont pu, dans leur étude, mesurer l’efficience de la blockchain sur l’économie circulaire.

L’enquête a été réalisée dans le cadre du Corridor économique Chine-Pakistan (Un ensemble de projets d'infrastructures en construction ou planifié qui touchera l'ensemble du Pakistan) et a consisté en l’envoie de 500 questionnaires avec des questions sous la forme d’échelle de Likert, une échelle de 1 à 7 avec 1 = fortement en désaccord, 2 = en désaccord, 3 = plutôt en désaccord, 4 = neutre, 5 = plutôt d'accord, 6 = d'accord, et 7 = tout à fait d'accord.

En tout 290 questionnaires ont pu être utilisés dans le cadre de cette étude, ils ont été analysés grâce à la méthode statistique dite PLS-SEM (Partial least squares path modeling), qui permet d'analyser des modèles complexes avec des données indépendantes.

Avant de voir les résultats de cette étude, il faut définir les différentes variables et termes utilisés.

H1A	La blockchain (BTC) a un impact positif sur l'éco conception (GD)
H1B	La blockchain (BTC) a un impact positif sur la production verte (GM)
H1C	La blockchain (BTC) a un impact positif sur le recyclage et le remanufacturage (RR)
H2A	L'éco conception a un impact sur les performances environnementales (ENP)
H2B	La production verte a un impact positif sur les performances environnementales (ENP)
H2C	Le recyclage et le remanufacturage a un impact positif sur les performances environnementales (ENP)
H3A	L'éco conception a un impact positif sur les performances économiques (ECO)
H3B	La production verte a un impact positif sur les performances économiques (ECO)
H3C	Le recyclage et le remanufacturage ont un impact positif sur les performances économiques (ECO)
H3D	Les performances environnementales ont un impact positif sur les performances économiques (ECO)
H4A	Les performances économiques ont un impact positif sur les performances de l'organisation

H4B	Les performances environnementales ont un impact positif sur les performances de l'organisation

Tableau 2 : Variables étudiées

Après utilisation de cette méthode statistique, on obtient ceci :

Hypothesis	Effect	Coefficient	T Statistics	p -values
H1a	**BCT -> GD**	**0.261**	**8.515**	**
H1b	**BCT -> GM**	**0.371**	**6.068**	**
H1c	**BCT -> RR**	**0.341**	**6.935**	**
H2a	**GD -> ENP**	**0.292**	**4.587**	***
H2b	**GM -> ENP**	**0.215**	**3.942**	***
H2c	**RR -> ENP**	**0.262**	**6.719**	**
H3a	**GD -> ECO**	**0.180**	**2.799**	**
H3b	**GM -> ECO**	**0.352**	**5.257**	*
H3c	**RR -> ECO**	**0.187**	**4.663**	***
H3d	**ENP -> ECO**	**0.322**	**5.169**	**
H4a	**ECO -> ORM**	**0.121**	**5.079**	**
H4b	**ENP -> ORM**	**0.769**	**7.159**	***

Tableau 3 : Résultat études

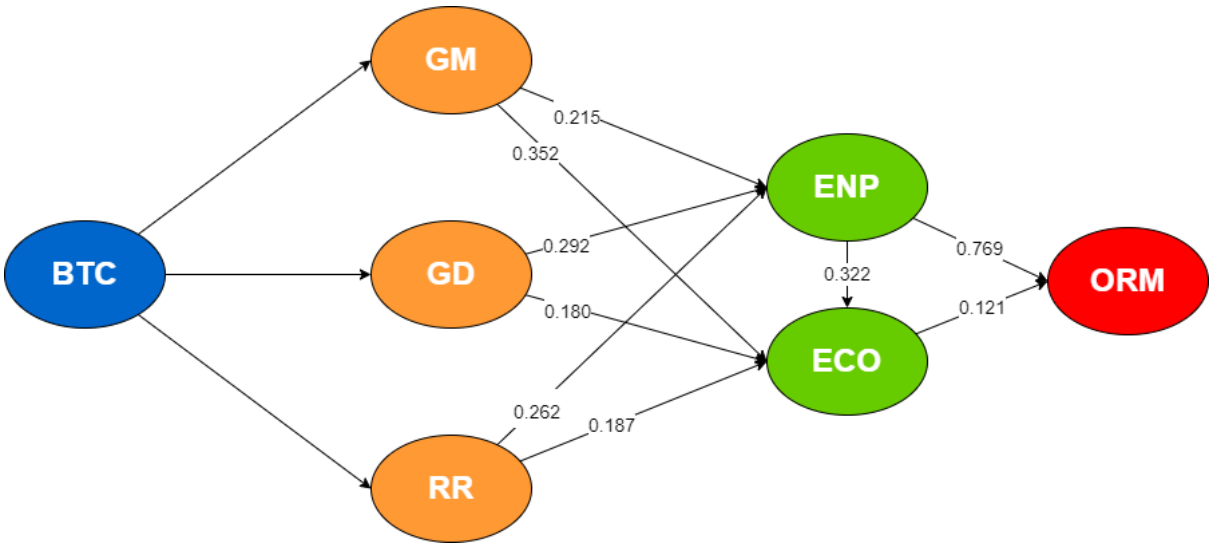

Figure 7 : Résultat étude

[From Trash to Cash: How Blockchain and Multi-Sensor-Driven Artificial Intelligence Can Transform Circular Economy of Plastic Waste?]

Ce tableau souligne que pour l'augmentation de 1% de l'utilisation de la blockchain dans le cadre de l'économie circulaire, nous obtenons par exemple une augmentation de l'impact significatif et positif sur la coopération entre les fournisseurs de 0.212%.

Ainsi comme nous le montre cette étude, la blockchain a un impact significatif sur trois composantes d'une entreprise

- L'éco conception
- La production verte
- Le recyclage et le re-manufacturage

Celles-ci impactent les performances environnementales et économiques qui ont une incidence sur les performances de l'entreprise.

L'économie circulaire a donc un impact significatif en ce qui concerne la performance environnementale et économique d'une entreprise ce qui implique, d'après le tableau, un résultat significatif sur les performances de l'entreprise.

III. Le recyclage et la blockchain

Sources principales: [26] [28]

Nous avons donc vu que la blockchain s'inscrit très bien dans les processus des entreprises pour une démarche d'économie circulaire avec des résultats significatifs.

Dans cette dernière partie nous allons voir comment l'intégration de la blockchain peut être efficiente pour le recyclage qui est une des composantes les plus importantes de l'économie circulaire.

Recyclage du plastique dans l'industrie 4.0

Nous allons ici étudier la méthode de recyclage utilisée par Chidepatil et al. [26]. Cette étude se concentre sur le traitement du plastique au sein de l'économie circulaire et la valeur ajoutée que peut avoir son recyclage pour les entreprises. Pour cela l'étude utilise plusieurs variables de valeurs faisant partie d'un système appelé *méthode du "coût total"*[2]. Par souci de simplicité, cette méthode ne prend pas en compte la compensation gagnée par les acteurs (mineurs) en faisant partie du processus de validation.

[2] https://en.wikipedia.org/wiki/Total_cost

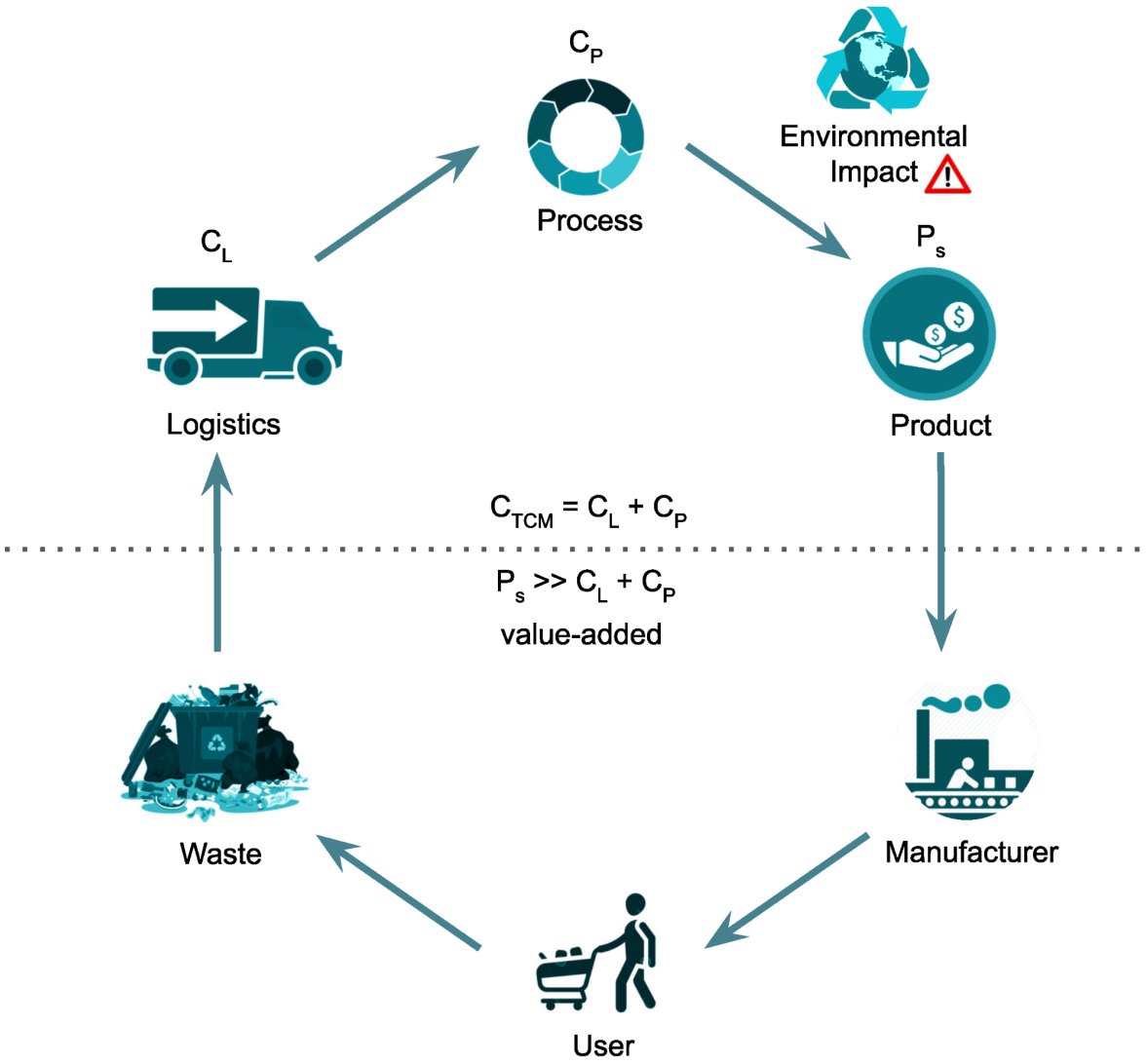

Figure 8:Empreinte carbone des filières de recyclage des déchets plastiques [26]

Ici $\mathbf{C_L}$ est le coût de la logistique et $\mathbf{C_p}$ le coût de la production (le traitement de recyclage) et $\mathbf{P_s}$ corresponds au prix de vente du produit après recyclage. Le principe de ce système est donc que pour que le recyclage de ce produit soit viable pour les entreprises, il faut que $\mathbf{C_L}$ + $\mathbf{C_P}$ soit inférieur au prix du produit fini $\mathbf{P_s}$. Pour réduire ces coûts, l'étude propose deux technologies, tout d'abord l'IA que nous allons rapidement aborder et surtout la blockchain.

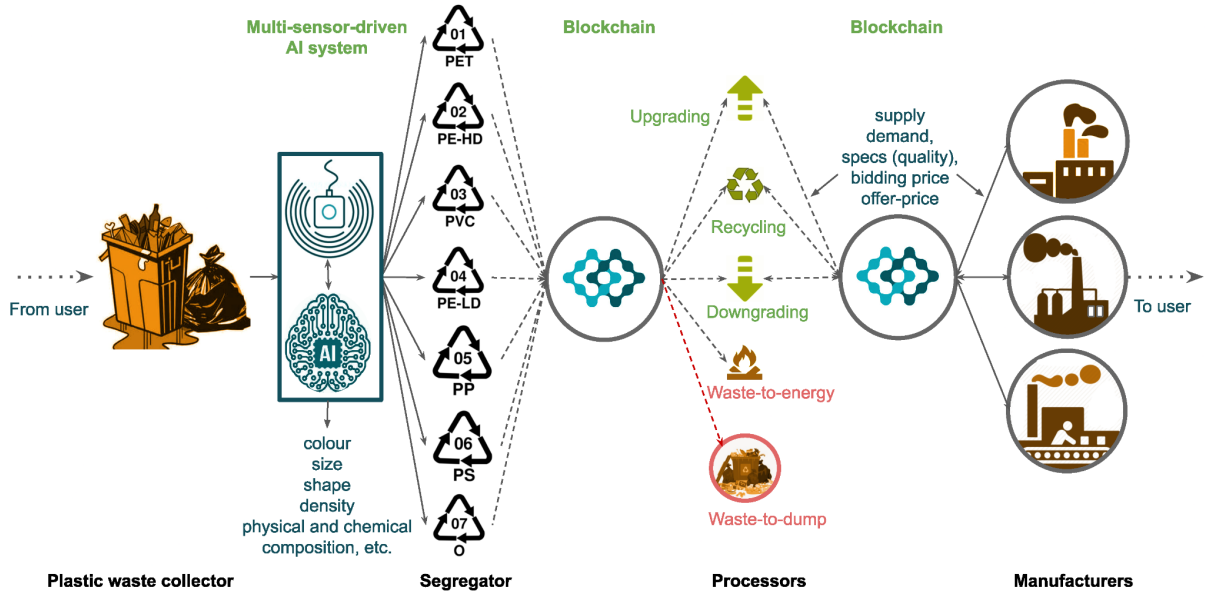

Figure 9 : Utilisation de la blockchain et d'IA pour le recyclage des déchets [26]

Comme le montre la figure 9, une fois que les déchets plastiques arrivent dans le centre de production, il est nécessaire qu'ils soient triés selon leur nature. Nous avons ici six types de plastiques, les plastiques PET (Polytéréphtalate d'éthylène), PE (Polyéthylène), le PVC (Polychlorure de vinyle), le PP (Polypropylène), le PS (Polystyrène Expansé) et l'ABS (Acrylonitrile butadiène styrène). Grâce à un mélange de différents capteurs tels que des capteurs optiques, des diodes laser infrarouge, des spectroscopes… et la mise en place d'une IA, le centre de tri peut déterminer de manière automatique quelle catégorie attribuer à chaque déchet plastique. Le rôle de l'IA est donc de minimiser les incertitudes et de permettre une séparation efficace à moindre coût (réduction de $\mathbf{C_p}$).

Une fois que les déchets sont triés et séparés selon leur nature, c'est icique la blockchain entre en jeu. Elle sert de plateforme de confiance entre le centre chargé de séparer les déchets (les Segregator sur la figure 9), les recycleurs (les Processors) et les acheteurs de matière première plastique (les Manufacturers).

Chaque transaction (ou échange d'informations) entre les différents acteurs est enregistrée au sein de la blockchain, on peut y trouver comme informations des données concernant l'usine dans laquelle le plastique a été recyclé, la quantité voulue, le prix, la qualité, le type du produit (PET, PE, PVC...). La sécurité et la transparence de la plateforme proviennent du

fait que toutes ces informations sont enregistrées sur une blockchain distribuée entre les acteurs. Ainsi les participants sont récompensés par les diverses informations qu'ils peuvent obtenir sur ce qu'ils vont vendre ou acheter, ce qui permet par la suite une planification plus efficace et plus rapide de la chaîne d'approvisionnement. Cela conduit donc à une meilleure efficacité des ressources et donc un modèle plus rentable pour le recyclage des déchets plastiques.

Chidepatil et al. s'appuient dans leurs documents sur les travaux de la *Radical Innovations Groups*, société qui propose deux types de *smart contract* :

- Un premier type qui est utilisé entre un fournisseur de déchets plastiques et un acheteur potentiel (un recycleur par exemple)
- Un deuxième type entre le recycleur et le fabricant de produits en plastique

La Figure 10 nous montre ici un *smart contract* utilisable entre un fournisseur et un acheteur.

Ce *smart contract* possède une partie publique qui permet aux validateurs (les personnes annexes qui ne sont pas l'acheteur et le vendeur) d'examiner et de valider les informations, ici par exemple l'origine des bouteilles, leur nature, leurs couleurs et leurs quantités mais aussi une partie privée qui elle permet de garder la des informations plus sensibles comme le prix, la méthodologie de trie... en effet, cela reste une entreprise à but lucratif, il est donc important pour elle de garder le secret sur certaines données afin de garder son avantage concurrentiel. Ainsi ces données ne sont visibles que par le vendeur et l'acheteur.

Permettant au futur acheteur de savoir ce qu'il achète (le type de plastique, la quantité...), mais aussi d'une partie privée qui contient des informations comme le prix, l'origine... Permettant ainsi au vendeur de garder un avantage concurrentiel. Enfin, chaque *smart contract* sera signé numériquement et horodaté via un protocole de validation ce qui permettra de savoir à tout moment quand a eu lieu la transaction.

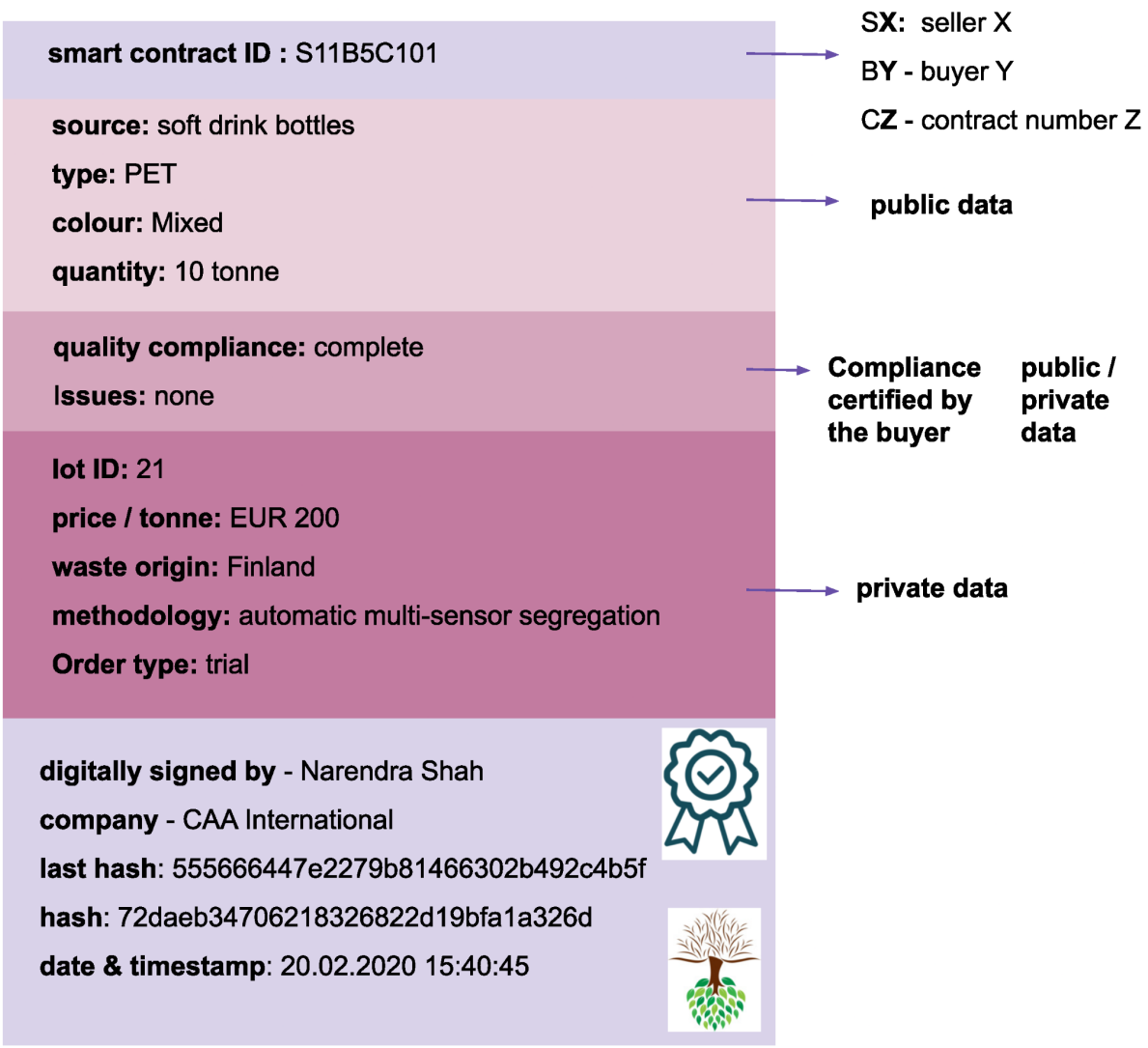

Figure 8 Exemple d'un *smart contract* [26]

Limite de la blockchain dans le recyclage des déchets

Comme nous avons pu le voir, la blockchain peut être très attrayante pour le recyclage des déchets et plus généralement pour la gestion de chaînes d'approvisionnement. Son utilisation pour relier les registres distribués, les bases de données et les parties prenantes de l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement participe à améliorer l'efficacité et garantir des économies de temps et d'argent. Nous pouvons ainsi atteindre les objectifs de durabilité et des responsabilités sociales propres à l'économie circulaire.

Bien que l'avenir de la blockchain au sein de l'économie circulaire soit prometteur au vu de ses avantages, il existe aussi de nombreux défis dont il faut être conscient avant la mise en oeuvre de son application généralisée. L'intégration d'une blockchain pose encore un certain nombre de problèmes. Une blockchain demande une immense puissance de calcul et donc entraîne une grande consommation d'énergie, aussi ce n'est pas une technologie qui est simple à installer au sein d'un système; Sa mise en oeuvre et la mise en place de *smart contract*s nécessite un investissement initial important afin de récolter des bénéfices sur le long terme. Les entreprises doivent donc investir activement dans son développement pour certifier un système efficace et surtout sûr [28].

Cela inclut aussi de repenser les échanges avec les partenaires, en effet pour que ce système soit vraiment efficace il faut que tous les partis de la chaîne l'intègrent.

Aussi, une nouvelle plate-forme blockchain doit être développée ou une plate-forme déja existante intégrée à l'entreprise. Le tableau 4 montre les coûts estimés de la mise en place d'une nouvelle plateforme de blockchain (cas 1) et de l'intégration de la blockchain à une plateforme existante

Cas 1 : Création d'une blockchain	
Temps estimé d'installation	31 semaines
Coûts de développement	109 900$ - 172 700$
Coûts de maintenance	11 932$ - 13 188$
Cas 2 : Intégration d'une blockchain déjà existante	

Temps estimé d'installation	29 semaines
Coûts de développement	102 900$ - 161 700$
Coûts de maintenance	11 172$ - 12 348$

Tableau 4 : Coûts d'une plateforme blockchain [27]

Ce tableau nous montre donc que dans le cas 1 comme dans le cas 2, les coûts pour l'intégration restent élevés.

Il y a aussi un paradoxe avec la concurrence entre les acteurs. En effet, bien que le but de ce système soit un partage efficace des infortmations, il ne faut pas que toutes les informations puissent être consultées par tous les utilisateurs afin de garder un avantage concurrentiel. Pour cela des processus comme les smart contracts publics/privés peuvent être utilisés comme expliqué dans la partie précédente[28].

La fonction d'automatisation des *smart contracts* a aussi pu susciter des inquiétudes parmi les courtiers ou encore les huissiers concernant leur potentiel remplacement par cette nouvelle technologie. En effet ce système n'aura besoin d'aucune intervention externe pour certifier les documents, tout sera fait numériquement et automatiquement [28].

Enfin la législation n'étant pas la même dans tous les pays concernant le recyclage, le traitement des données... il faudra faire en sorte que ce système basé sur la blockchain respecte bien le cadre juridique de tous les pays présents, ce qui ajoute une nouvelle contrainte. [28]

Conclusion

Nous avons pu voir au travers de ces trois parties le potentiel mais aussi la complexité d'intégrer une technologie telle que la blockchain dans le contexte de l'économie circulaire. Ce potentiel est motivé par la possibilité de pouvoir tracer des matériaux, son immuabilité qui permet d'éviter les fraudes et sa décentralisation qui permet aux entreprises d'avoir confiance en ce système. Cela va de pair avec une implémentation qui doit avoir été réalisée de manière optimale. Nous avons pu montrer que la blockchain contribue à l'économie circulaire, en particulier, les résultats de Rehman Khan et al. exposent que la blockchain peut aider à réduire les coûts de transaction, à améliorer les performances et la communication tout au long de la chaîne d'approvisionnement. En outre, nous avons aussi pu étudier les coûts initiaux potentiels impliqués dans la mise en oeuvre de cette technologie.

Par la suite, nous avons aussi pu montrer les limites de l'intégration d'une blockchain au sein du système d'entreprises se tournant vers un modèle d'économie circulaire. Tout d'abord une grande dépense énergétique pour le modèle de proof-of-work utilisé dans les systèmes expliqués dans ce mémoire, cette grande dépense d'énergie n'est pas en adéquation avec les valeurs de l'économie circulaire qui se porte en partie sur l'écologie. Cette technologie étant récente, il en résulte des coûts élevés pour l'implémentation au sein d'un système existant ou dans le cas de la création d'une nouvelle plateforme. Enfin la législation n'étant pas la même dans tous les pays, il faudra réfléchir à la dimension juridique lors de l'implémentation.

A l'ère de l'industrie 4.0 les technologies évoluent vite il suffira de quelques années pour avoir un système vraiment opérationnel pour des projets à grande échelle alliant économie circulaire et une blockchain encore à ses débuts. Malgré cela nous avons pu voir que des projets commencent à émerger comme The Bullion Integrity Ledger pour le suivi de l'or, ou le projet de Chidepatil et al. liant IA et Blockchain, on peut aussi citer des nouveaux protocoles de validation appelés proof-of-work permettant une consommation bien inférieur d'énergie. L'alliance de ces technologies pourrait ainsi permettre une meilleure gestion des déchets dans le futur.

Annexe

Table des figures

Figure 1 : Fonctionnement d’une blockchain

Figure 2 : Parts de marché des trois premiers pays producteurs

figure 3 : Schéma simplifié du principe de l’économie circulaire

Figure 4 : Schéma simplifié d’un réseau décentralisé

Figure 5: Représentation des processus de l’économie circulaire

Tableau 1 : les différentes révolutions industrielles

Figure 6 Chaîne de distribution de l’or

Tableau 2 : Variables étudiées

Tableau 3 : Résultat études

Figure 7 : Résultats études

Figure 8:Empreinte carbone des filières de recyclage des déchets plastiques

Figure 9 : Utilisation de la blockchain et d’IA pour le recyclage des déchets

Figure 8 Exemple d'un *smart contract*

Tableau 4 : Coûts d’une plateforme blockchain

Figure 9 : Trace d’une des première blockchain

Bibliographie

[1] : Sariatli, Furkan. “Linear Economy Versus Circular Economy: A Comparative and Analyzer Study for Optimization of Economy for Sustainability.” Visegrad Journal on Bioeconomy and Sustainable Development 6, no. 1 (2017): 31–34. https://doi.org/10.1515/vjbsd-2017-0005.

[2] Kouhizadeh, Mahtab, Qingyun Zhu, and Joseph Sarkis. “Blockchain and the Circular Economy: Potential Tensions and Critical Reflections from Practice.” Production Planning & Control 31, no. 11-12 (2019): 950–66. https://doi.org/10.1080/09537287.2019.1695925.

[3]: Lebreton, Laurent, and Anthony Andrady. “Future Scenarios of Global Plastic Waste Generation and Disposal.” Palgrave Communications 5, no. 1 (2019). https://doi.org/10.1057/s41599-018-0212-7.

[4]: Geyer, Roland, Jenna R. Jambeck, and Kara Lavender Law. “Production, Use, and Fate of All Plastics Ever Made.” Science Advances 3, no. 7 (2017). https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782.

[5] : Balaram, V. “Rare Earth Elements: A Review of Applications, Occurrence, Exploration, Analysis, Recycling, and Environmental Impact.” Geoscience Frontiers 10, no. 4 (2019): 1285–1303. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005.

[6] : “LOI n° 2020-105 Du 10 Février 2020 Relative à La Lutte Contre Le Gaspillage Et À L'économie Circulaire.” Legifrance.gouv.fr. Accessed August 1, 2022. https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000041553759/.

[7]: Nakamoto, Satoshi. “Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System.” Bitcoin, 2008. https://bitcoin.org/bitcoin.pdf.

[8]: Kalantzakos, Sophia. China and the Geopolitics of Rare Earths. New York, United States of America: Oxford University Press, 2018.

[9]: Notheisen, Benedikt, Jacob Benjamin Cholewa, and Arun Prasad Shanmugam. “Trading Real-World Assets on Blockchain.” Business & Information Systems Engineering 59, no. 6 (2017): 425–40. https://doi.org/10.1007/s12599-017-0499-8.

[10]: Pociovălișteanu, Diana, Isabel Novo-Corti, Mirela Aceleanu, Andreea Șerban, and Eugenia Grecu. “Employment Policies for a Green Economy at the European Union Level.” Sustainability 7, no. 7 (2015): 9231–50. https://doi.org/10.3390/su7079231.

[11]: International Labour Office and United Nations Children’s Fund. “Child Labour: Global estimates 2020, trends and the road forward” LO and UNICEF, New York, (2021).

[12]: Centobelli, Piera, Roberto Cerchione, Pasquale Del Vecchio, Eugenio Oropallo, and Giustina Secundo. “Blockchain Technology for Bridging Trust, Traceability and Transparency in Circular Supply Chain.” Information & Management, 2021. https://doi.org/10.1016/j.im.2021.103508.

[13]: Salmon, Daniel, Callie W. Babbitt, Gregory A. Babbitt, and Christopher E. Wilmer. “A Framework for Modeling Fraud in E-Waste Management.” Resources, Conservation and Recycling 171 (2021). https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105613.

[14] : Aurez, Vincent, and Laurent Georgeault. “Les Indicateurs De l’Économie Circulaire En Chine.” Revue de l'OFCE N° 145, no. 1 (2016): 127–60. https://doi.org/10.3917/reof.145.0127.

[15]: Padilla-Rivera, Alejandro, Sara Russo-Garrido, and Nicolas Merveille. “Addressing the Social Aspects of a Circular Economy: A Systematic Literature Review.” Sustainability 12, no. 19 (2020): 7912. https://doi.org/10.3390/su12197912.

[16] : Xu, Xiwei, Qinghua Lu, Yue Liu, Liming Zhu, Haonan Yao, and Athanasios V. Vasilakos. “Designing Blockchain-Based Applications a Case Study for Imported Product Traceability.” Future Generation Computer Systems 92 (October 30, 2018). https://doi.org/10.1016/j.future.2018.10.010.

[17]: de Freitas Netto, Sebastião Vieira, Marcos Felipe Sobral, Ana Regina Ribeiro, and Gleibson Robert Soares. “Concepts and Forms of Greenwashing: A Systematic Review.”

Environmental Sciences Europe 32, no. 1 (2020). https://doi.org/10.1186/s12302-020-0300-3.

[18]: Paben, Jared. “Stone Castle CEO Sentenced to Prison - E-Scrap News.” E. E-Scrap News, January 31, 2019. https://resource-recycling.com/e-scrap/2019/01/31/stone-castle-ceo-sentenced-to-prison/.

[19] Farooque, Muhammad, Abraham Zhang, Matthias Thürer, Ting Qu, and Donald Huisingh. “Circular Supply Chain Management: A Definition and Structured Literature Review.” Journal of Cleaner Production 228 (2019): 882–900. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.303.

[20] Culot, Giovanna, Guido Nassimbeni, Guido Orzes, and Marco Sartor. “Behind the Definition of Industry 4.0: Analysis and Open Questions.” International Journal of Production Economics 226 (2020): 107617. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107617.

[21] Pavel, Ilarion. “La Blockchain – Les Défis De Son Implémentation.” *Annales des Mines - Réalités industrielles* Août 2017, no. 3 (2017): 20–24. https://doi.org/10.3917/rindu1.173.0020.

[22] Khan, Syed Abdul, Asif Razzaq, Zhang Yu, and Sharon Miller. “Industry 4.0 and Circular Economy Practices: A New Era Business Strategies for Environmental Sustainability.” *Business Strategy and the Environment* 30, no. 8 (2021): 4001–14. https://doi.org/10.1002/bse.2853.

[23] Kshetri, Nir. “1 Blockchain’s Roles in Meeting Key Supply Chain Management Objectives.” *International Journal of Information Management* 39 (2018): 80–89. https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2017.12.005.

[24] Insights, Ledger. “World Gold Council Invests in Axedras Blockchain Supply Chain.” Ledger Insights - enterprise blockchain, May 4, 2022. https://www.ledgerinsights.com/world-gold-council-invests-in-axedras-blockchain-supply-chain/.

[25] Rehman Khan, Syed Abdul, Zhang Yu, Salman Sarwat, Danish Iqbal Godil, Sumeela Amin, and Sobia Shujaat. “The Role of Block Chain Technology in Circular Economy Practices to

Improve Organisational Performance." *International Journal of Logistics Research and Applications* 25, no. 4-5 (2021): 605–22. https://doi.org/10.1080/13675567.2021.1872512.

[26] Chidepatil, Aditya, Prabhleen Bindra, Devyani Kulkarni, Mustafa Qazi, Meghana Kshirsagar, and Krishnaswamy Sankaran. "From Trash to Cash: How Blockchain and Multi-Sensor-Driven Artificial Intelligence Can Transform Circular Economy of Plastic Waste?" *Administrative Sciences* 10, no. 2 (2020): 23. https://doi.org/10.3390/admsci10020023.

[27] Bhubalan, Kesaven, Arularasu Muthaliar Tamothran, Seng Hon Kee, Shin Ying Foong, Su Shiung Lam, Keisheni Ganeson, Sevakumaran Vigneswari, Al-Ashraf Amirul, and Seeram Ramakrishna. "Leveraging Blockchain Concepts as Watermarkers of Plastics for Sustainable Waste Management in Progressing Circular Economy." Environmental Research 213 (2022): 113631. https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113631.

[28]: Upadhyay, Arvind, Sumona Mukhuty, Vikas Kumar, and Yigit Kazancoglu. "Blockchain Technology and the Circular Economy: Implications for Sustainability and Social Responsibility." Journal of Cleaner Production 293 (2021): 126130. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126130.

[29] Bhubalan, Kesaven, Arularasu Muthaliar Tamothran, Seng Hon Kee, Shin Ying Foong, Su Shiung Lam, Keisheni Ganeson, Sevakumaran Vigneswari, Al-Ashraf Amirul, and Seeram Ramakrishna. "Leveraging Blockchain Concepts as Watermarkers of Plastics for Sustainable Waste Management in Progressing Circular Economy." Environmental Research 213 (2022): 113631. https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113631.

[30] Rejeb, Abderahman, Karim Rejeb, John G. Keogh, and Suhaiza Zailani. "Barriers to Blockchain Adoption in the Circular Economy: A Fuzzy Delphi and Best-Worst Approach." Sustainability 14, no. 6 (2022): 3611. https://doi.org/10.3390/su14063611.