

UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE – UFR des sciences économiques,
sociales et de gestion

MÉMOIRE DE RECHERCHE

présenté en vue d'obtenir le

Master Analyse et Politique Economique

Parcours : Statistique pour l'Évaluation et la Prévision

Le paradoxe entre l'économie circulaire et la technologie blockchain, un frein négligeable pour une meilleure transition écologique ?

Vers une économie circulaire 4.0 : analyse critique de l'utilisation de la technologie
blockchain pour soutenir la transition écologique.

Alexandre BRUNET

Sous la direction de : **M. Romain DEBREF**, maître de conférences en sciences économiques au
Laboratoire REGARDS.

JURY

MEMBRES : M. Romain DEBREF

M. Franck-Dominique VIVIEN

Soutenu le 24 mai 2023

Remerciements

Je voulais prendre un moment pour exprimer ma gratitude pour le soutien que j'ai reçu tout au long de la production de mon mémoire.

Je suis particulièrement reconnaissant envers M. Debref, pour sa patience, son expertise et sa disponibilité. Ses conseils m'ont permis de perfectionner mon travail et d'atteindre un niveau de qualité que je n'aurais jamais cru possible. En plus de M. Debref, je tiens également à remercier M. Vivien pour son temps et son évaluation minutieuse de mon travail. Plus globalement, je remercie la faculté des sciences économiques, sociales et de gestion et la Bibliothèque universitaire Robert de Sorbon de m'avoir permis de consulter librement de nombreuses ressources.

Je n'aurais pas pu y arriver non plus sans le soutien mes parents qui ont cru en moi dès le début. Mes amis comptant des anciens camarades de ma dernière année de Licence : Solenne, Vincent, Florian et Douae et mes camarades de première année de Master : Fanny et Thomas, m'ont également soutenu et m'ont permis de persévérer jusqu'à la fin.

Résumé

L'économie circulaire et la blockchain sont toutes les deux des innovations systémiques. La première est faite pour répondre aux enjeux environnementaux et l'autre pour transmettre et stocker des informations cryptographiques (monétaires ou non). Ces innovations sont dépendantes de nombreux déterminants qui facilitent plus ou moins leur pénétration dans le marché : demande, pressions exercées sur elles et aussi les politiques encadrant leurs activités. L'économie circulaire est à la mode depuis quelques années, est strictement réglementée et présente de nombreux avantages à la fois économiques et environnementaux, mais présente également des inconvénients. La blockchain, quant à elle, est une innovation plus récente, mais de plus en plus demandée. Cependant, elle baigne dans un grand flou juridique, ce qui ne facilite pas son développement. Elle présente néanmoins des avantages qui peuvent, en théorie, combler certains inconvénients de l'économie circulaire, notamment en dévoilant l'information, mais également des inconvénients qui peuvent contrebalancer les avantages de cette synergie innovante. Les cas de SolarCoin, du Microgrid, de CircularChain et de Plastik Bank sont des exemples d'application de la technologie blockchain dans l'économie circulaire. Ces exemples montrent qu'avec une bonne configuration d'un système basé sur la blockchain et un choix pertinent d'algorithme de consensus, les inconvénients induits de la synergie innovatrice sont compensés par les avantages qu'elle présente.

Mots-clefs : Blockchain, économie circulaire, cryptographie, innovation, information, algorithme de consensus.

Abstract

The circular economy and blockchain are both systemic innovations. The former is designed to address environmental challenges, while the latter is used to transmit and store cryptographic information (monetary or otherwise). These innovations depend on various determinants that facilitate their penetration in the market to varying degrees: demand, pressures exerted on them, and the policies governing their activities. The circular economy has been in vogue for several years, strictly regulated, and offers numerous economic and environmental advantages, but it also presents disadvantages. On the other hand, blockchain is a more recent innovation but is increasingly in demand. However, it operates in a legal grey area, which hampers its development. Nonetheless, it offers advantages that can, in theory, offset certain disadvantages of the circular economy, particularly by revealing information, but it also has drawbacks that can counterbalance the benefits of this innovative synergy. Examples such as SolarCoin, Microgrid, CircularChain, and Plastik Bank demonstrate the application of blockchain technology in the circular economy. These examples show that with a well-configured blockchain-based system and a relevant choice of consensus algorithm, the drawbacks arising from the innovative synergy are offset by the benefits it presents.

Keywords: Blockchain, circular economy, cryptography, innovation, information, consensus algorithm.

Liste des abréviations

EIB : European Investment Bank.

IA : Intelligence artificielle.

PBFT : Practical Byzantine Fault Tolerance.

PoA : Proof-of-authority.

PoS : Proof-of-stake.

PoS_T : Proof-of-stake time.

PoW : Proof-of-work.

UE : Union Européenne.

Glossaire

Blockchain : Technologie décentralisée qui permet de stocker et de transmettre des informations de manière sécurisée et transparente, en utilisant des chaînes de blocs liées de manière chronologique.

Cryptomonnaie : Forme de monnaie numérique basée sur la cryptographie, qui permet des transactions sécurisées et vérifiables. Elle fonctionne de manière décentralisée, indépendamment des institutions financières traditionnelles, et son approvisionnement et sa valeur sont généralement régis par des algorithmes spécifiques. C'est l'utilisation la plus connue de la blockchain.

Économie circulaire : Modèle économique qui vise à optimiser l'utilisation des ressources en favorisant la réduction, la réutilisation, le recyclage des produits et des matériaux. Elle cherche à minimiser le gaspillage, à préserver les ressources naturelles et à créer un système plus durable et résilient.

Innovation : Application commerciale d'une invention.

Practical Byzantine Fault Tolerance : Algorithme de consensus qui vise à résoudre le problème du consensus dans un réseau où certains nœuds peuvent être défectueux ou malveillants.

Proof-of-authority : Algorithme de consensus dans lequel la validation des informations est effectuée par des nœuds de confiance préalablement identifiés et reconnus.

Proof-of-stake time : Algorithme de consensus dans lequel les validateurs d'informations doivent posséder une certaine quantité de jetons durant un certain temps.

Proof-of-stake : Algorithme de consensus dans lequel la validation des informations est déterminée en fonction de la quantité de cryptomonnaies détenue par les participants du réseau.

Proof-of-work : Algorithme de consensus dans lequel la validation des informations nécessite la résolution de problèmes mathématiques complexes. Les participants du réseau, appelés mineurs, doivent effectuer un travail intensif en termes de puissance de calcul pour prouver leur contribution et sécuriser le réseau.

SOMMAIRE

Introduction	9
Chapitre 1 ^{er} - Une analyse théorique de l'application de la blockchain dans l'économie circulaire.....	12
1. Économie circulaire : une innovation systémique clé dans la transition énergétique ...	13
1.1. Historique : une innovation environnementale systémique basée sur la circularité	13
1.2. Définition de l'économie circulaire et son rôle dans la transition énergétique et de matière.....	16
1.3. Où en sommes-nous maintenant ?	18
1.4. Avantages et inconvénients de cette innovation environnementale à partir d'une perspective d'économie écologique et d'économie de l'innovation.....	30
2. La blockchain : innovation systémique, moteur d'une transition majeure dans l'économie de l'information	36
2.1. Une histoire témoignant de la nature systémique de la blockchain	36
2.2. Les trois visages de la blockchain.....	38
2.3. Le déploiement de la blockchain aujourd'hui.....	39
2.4. Les forces et les faiblesses de la blockchain	48
2.5. Blockchain et Big Data : Bonnie and Cloud	53
3. Blockchain et économie circulaire : analyse des avantages et défis d'une synergie innovante pour la transition écologique.....	55
3.1. Des innovations victimes de pressions	55
3.2. Un couple permettant d'améliorer l'efficacité de l'économie circulaire... ..	57
3.3. ...mais engendre des conséquences non-souhaitables	60
4. Les déterminants de la blockchain déployée pour l'économie circulaire : analyse des trajectoires d'innovation	63

4.1. Influence des politiques publiques.....	63
4.2. Les technologies de la blockchain : des innovations qui s’accumulent.....	69
4.3. Influence de la demande	72
4.4. Conclusion et synthèse – Tableau récapitulatif des avantages et des inconvénients	75
Chapitre 2 - Une analyse empirique et critique de l’application de la technologie blockchain dans l’économie circulaire	
1. La blockchain pour l’économie circulaire : rappel des hypothèses de la partie 1 et méthodologie de la comparaison	79
2. Des cas témoins d’une réelle possibilité d’alliance entre deux innovations systématiques différentes	80
2.1. Une cryptomonnaie pour la production d’énergie solaire : le SolarCoin	80
2.2. Le Microgrid : une blockchain pour l’indépendance énergétique	93
2.3. CircularChain : pour une meilleure traçabilité et transparence des déchets	102
2.4. Plastic Bank : vers une transition écologique et une intégration sociale	105
3. Analyse critique et bilan du déploiement de la blockchain pour l’économie circulaire	115
Conclusion.....	118
Bibliographie.....	120
Webographie	127
Table des figures	133
Table des tableaux	135
Table des matières	136

INTRODUCTION

Notre ère est de plus en plus caractérisée par une urgence écologique à laquelle est associée un changement radical dans les façons de faire et les façons de penser (les habitudes, la production, la consommation, etc.). Mais grâce à l'évolution rapide de la technologie, l'innovation est fondamentale pour, au moins, retarder la fatalité écologique avancée par de nombreux scientifiques. Ces innovations révolutionnent notre monde et parmi elles figurent la blockchain et l'économie circulaire, qui sont deux domaines qui ont suscité beaucoup d'intérêt ces dernières années.

L'économie circulaire est un modèle économique qui vise à optimiser l'utilisation des ressources en favorisant la réutilisation, la réparation et le recyclage des produits. Elle s'oppose à une économie linéaire qui consiste à extraire les matières premières, à fabriquer des produits à partir de ces matières premières puis à jeter ces produits lorsqu'ils ne sont plus utiles. En ce sens, l'économie circulaire contribue à massivement réduire l'impact environnemental qu'engendre la création de richesse.

La blockchain est une technologie de transmission et stockage d'informations décentralisée, immuable, sécurisée et transparente. Elle permet de stocker des données dans des blocs liés les uns aux autres, formant ainsi une blockchain. Elle est particulièrement adaptée pour de nombreux domaines, dont les transactions financières ou encore pour les chaînes d'approvisionnement. La blockchain permet en effet de garantir la sécurité et l'authenticité des transactions, tout en réduisant les coûts en argent et en temps.

L'économie circulaire devient une priorité pour construire un avenir durable, la blockchain émerge comme une technologie révolutionnaire, optimisant la gestion des ressources. Grâce à son potentiel de suivi immuable et transparent, la blockchain renforce la traçabilité des produits recyclés et de l'énergie produite, encourage la réutilisation, facilite les échanges de matériaux et en incitant aux acteurs à participer activement à l'économie circulaire. En combinant ces deux innovations, nous introduirons les modèles économiques actuels dans un système dans lequel chaque étape du cycle de vie des produits est capturée, partagée et valorisée, donnant naissance à un avenir durable, et respectueux de l'environnement.

Il est particulièrement pertinent de questionner l'intégration de la blockchain dans le contexte de l'économie circulaire. Ce domaine constitue la convergence entre l'expertise en analyse économique et politique économique, liée à la technologie qui constitue une composante essentielle de notre parcours, et les idées essentielles soutenant la nécessité d'une révision

globale du système économique afin d'éviter un impact dramatique sur l'environnement. C'est ainsi que nous nous demanderons si la technologie blockchain, considérée comme une innovation systémique, peut contribuer à l'essor de l'économie circulaire tout en prenant en compte les limites de la biosphère.

L'objectif de la démonstration est de conclure à l'efficacité réelle de la blockchain dans la prise en compte des limites de l'économie circulaire. Autrement dit, nous regarderons d'un point de vue critique si l'économie circulaire peut être efficacement soutenue par la blockchain et ainsi fournir des résultats satisfaisants.

Ainsi, nous dresserons d'abord une analyse théorique à la fois de l'économie circulaire et de la blockchain. Par cette approche, nous déroulerons leur histoire respective, leur état des lieux, leurs avantages/inconvénients respectifs dans un premier temps puis les avantages et inconvénients de leur combinaison. Nous regarderons également les facteurs qui influencent leur pénétration dans le marché.

Ensuite, nous étudierons plusieurs cas d'application de la blockchain dans l'économie circulaire pour fournir une analyse critique à la fois sur la technologie et la prise en compte de la question environnementale, tout en mobilisant les outils théoriques présentés précédemment. La finalité de l'étude de ces cas, c'est d'en déduire une conclusion critique sur une application efficiente de la technologie blockchain pour favoriser la transition d'un système économique linéaire à un système économique circulaire.

CHAPITRE 1^{ER} - UNE ANALYSE THEORIQUE DE L'APPLICATION DE LA BLOCKCHAIN DANS L'ECONOMIE CIRCULAIRE

1. Économie circulaire : une innovation systémique clé dans la transition énergétique

L'objectif de cette section est de dresser un profil théorique complet de l'économie circulaire afin de mieux cerner sa nature et ses implications. Par ce profil théorique, nous dévoilerons son histoire, son rôle dans la transition écologique et énergétique, son état des lieux puis ses avantages et inconvénients.

1.1. Historique : une innovation environnementale systémique basée sur la circularité

Dans les années 70, la question environnementale contemporaine a émergé, ce qui a conduit à remettre en question le rôle de l'innovation et à critiquer la croissance. Jusqu'alors, et encore aujourd'hui, c'était le courant néoclassique qui dominait. Selon ce courant de pensée, le progrès technique est exogène au modèle économique et à la croissance (Guerrien et Gun, 2012, p. 421). En d'autres termes, dans le modèle néoclassique, le producteur choisit parmi différentes combinaisons de techniques optimales en fonction des prix des intrants et des extrants, dans le but de maximiser ses profits. Dans cette perspective, le progrès technique n'est rien de plus qu'une mise à jour des possibilités techniques optimales (Debref, 2018). C'est ainsi que naissent les controverses, qui réévaluent l'innovation en tant qu'acteur actif de la croissance économique : elle ne "tombe pas du ciel", comme le montre le premier rapport du Club de Rome de 1972. Dans cette optique et dans ce contexte, il est nécessaire de trouver une solution pour sortir d'un modèle économique qui ne tient pas compte des aspects environnementaux de la production. Cette solution passe par l'innovation, comme l'a souligné Georgescu-Roegen, dont nous parlerons un peu plus loin.

En 1939, Schumpeter intègre dans son œuvre "Business Cycles" le rôle de l'entrepreneur dans l'économie par le biais de l'innovation. D'ailleurs, il donne une définition assez large de l'innovation : "Toute tentative de faire les choses différemment dans le domaine de la vie économique devrait être considérée comme une innovation susceptible de fournir un avantage temporaire, et des profits, à une firme" (Schumpeter, 1939, vol. 1, p. 84). La théorie de Schumpeter s'inscrit dans une vision assez dynamique, décrivant un cycle qui se met en marche et se poursuit grâce à l'innovation. Il établit une classification de cinq types d'innovations qui forment des "grappes d'innovation". L'une d'entre elles nous intéresse particulièrement, car elle correspond le mieux à la nature de l'économie circulaire. Il s'agit de l'introduction d'une

méthode de production nouvelle, c'est-à-dire pratiquement inconnue de la branche concernée de l'industrie [...] et peut également résider dans de nouveaux processus commerciaux pour une marchandise". Selon Schumpeter, la combinaison de ces grappes d'innovation a des effets et marque ainsi le changement technique qui influence les sociétés et les modes de consommation des agents.

La vision schumpétérienne est effectivement macroéconomique, ce qui permet de l'étendre aux différents pays où chacun représente un entrepreneur. Il n'est pas abusif de transposer le niveau entrepreneurial au niveau étatique pour ensuite étudier la situation au niveau mondial, surtout compte tenu de la mondialisation qui s'est développée depuis les années 80 et a favorisé les échanges entre les pays. Cette mondialisation ne concerne pas seulement l'augmentation des échanges entre les nations, mais aussi la diffusion accrue de l'innovation grâce à ces échanges. Cette transposition n'était pas possible à l'époque de la théorie de Schumpeter (années 30-40) en raison du contexte économique mondial très différent, marqué par la Grande Dépression et la Seconde Guerre mondiale, qui ont réduit considérablement les échanges commerciaux. Même après ces périodes d'instabilité, la diffusion des innovations n'était pas optimale en raison de la crise des années 70 et de la Guerre froide. Ce n'est qu'à partir des années 90-2000 que la situation s'est considérablement améliorée.

Cependant, même si les innovations ne se diffusent pas correctement pendant les périodes d'instabilité, les idées ne suivent pas nécessairement la même logique. C'est le cas de Georgescu-Roegen, qui a écrit au début des années 70 "The Entropy Law and the Economic Process". Il souligne que la pensée dominante ne prend pas en compte l'usure des biens physiques ni une possible pénurie d'énergie et de matériaux (Debref, 2018). C'est pourquoi il s'est interrogé sur des solutions techniques prenant en compte le respect et la préservation de la biosphère. Tout comme Schumpeter, il distingue quatre catégories d'innovations, qui ne sont pas énumérées ici car la distinction des innovations de Schumpeter est plus pertinente et suffisante pour le moment. Cependant, Georgescu-Roegen s'inscrit dans la continuité de la pensée schumpétérienne tout en introduisant une dimension environnementale qui nous intéresse particulièrement ici.

Tout comme Schumpeter, Georgescu-Roegen pensait que l'introduction d'une innovation dans l'économie, en détruisant celle qu'elle remplace (idée de "destruction créatrice" de Schumpeter), était synonyme de processus évolutionniste et donc irréversible. C'est dans cette

optique qu'il affirmait que l'utilisation de l'énergie solaire allait être la base d'un changement irréversible au service de l'environnement (Debref, 2018).

C'est en 1987 que naît le concept d'écologie industrielle (Gallaud et Laperche, 2016). Selon les auteurs, ce concept émerge de la prise de conscience de la non-soutenabilité des modes de production et de consommation actuels, qui génèrent des déchets, de la pollution et une pression croissante sur les ressources naturelles. L'écologie industrielle propose une approche systématique pour optimiser l'utilisation des ressources et minimiser les déchets et la pollution. Elle s'inspire de la fonction des écosystèmes naturels, où les déchets d'une espèce deviennent les ressources d'une autre espèce. L'approche de l'écologie industrielle implique l'optimisation des flux d'énergie et de matière par le biais de techniques améliorées par les ingénieurs.

L'écologie industrielle a favorisé la création de boucles de rétroaction positives, où les déchets d'une entreprise peuvent devenir les matières premières d'une autre entreprise. Les auteurs expliquent également comment le concept d'écologie industrielle s'est développé depuis 1987, notamment en intégrant les concepts d'économie circulaire et de développement durable.

Le terme "économie circulaire" apparaît à la fin des années 80 dans un livre sur l'économie de l'environnement (Pearce et Turner, 1989) et vise à valoriser les déchets. Cependant, le concept lui-même est bien plus ancien. Selon certains historiens, un tel modèle existait sans être nommé jusqu'à la fin du 19^e siècle. L'historienne Sabine Barles parle d'une "circulation spontanée" entre l'industrie, la ville et l'agriculture (Ntsondé et Aggeri, 2022). Ce modèle reposait principalement sur le travail des chiffonniers qui collectaient de nombreuses matières abandonnées pour créer des produits utiles à la société. Cependant, depuis la révolution industrielle, accompagnée de la révolution hygiéniste qui l'a suivie au Royaume-Uni, les chiffonniers ont été marginalisés et une économie linéaire a été instaurée depuis lors. Cette économie linéaire se caractérise par des modes de consommation très gourmands en ressources naturelles et a perduré pendant plusieurs décennies, voire des siècles.

Depuis les années 2000, la nécessité de revenir à une économie compatible avec les objectifs du développement durable s'est imposée. Trois raisons expliquent cela : l'augmentation constante du prix des matières premières, l'embargo chinois sur les terres rares qui a débuté dans les années 2010, et l'urgence écologique qui ne cesse de prendre de l'ampleur (Ntsondé et Aggeri, 2022).

C'est une chose de montrer que l'économie circulaire est une innovation (environnementale), mais ce n'est pas suffisant pour être rigoureux. Il est nécessaire d'aller plus loin pour caractériser avec précision la nature de l'économie circulaire. Un aperçu a déjà été donné grâce à la définition de Schumpeter d'une des grappes d'innovation, mais rien n'est mentionné concernant l'influence de l'innovation.

Une typologie d'innovation a été dressée par des économistes pour les classer selon leur degré de changement ; il y en a trois. D'abord, l'innovation incrémentale, selon la théorie évolutionniste, est une innovation ajoutant des particularités à une autre innovation déjà existante : degré faible de changement (Dois *et al.*, 1982). Ensuite, l'innovation radicale a des impacts beaucoup plus marqués car elle modifie fortement les méthodes de production : degré fort de changement (Freeman et Soete, 1990). Puis, l'innovation systémique est une combinaison d'innovations incrémentales et radicales : changement systémique.

Selon cette typologie, l'économie circulaire peut être classée comme étant une innovation systémique. Cela se manifeste d'abord par l'introduction de biens limitant les déchets, surtout les non-dégradables. Le site Médicis Immobilier Neuf¹ a établi un top 19 des innovations écologiques qui permettent d'illustrer l'aspect systématique de l'économie circulaire. Par exemple, la société Greenhope a conçu le sac Ecoplas qui se substitue aux sacs plastiques que l'on peut trouver dans les grandes surfaces et qui a l'avantage d'être biodégradable au bout de 5 ans maximum (innovation incrémentale). Cela se manifeste également par de nouveaux modèles économiques basés sur la circularité. Par exemple, l'entreprise Ecosystem se base sur la circularité pour proposer des biens électroménagers recyclés (innovation radicale). L'entreprise perçoit un certain profit, non pas en utilisant une méthode de production « linéaire », mais bien circulaire.

1.2. Définition de l'économie circulaire et son rôle dans la transition énergétique et de matière

Le concept d'économie circulaire appartient aux sciences sociales. Comme l'économie elle-même, elles sont assujetties à des débats et donc définies différemment. Comme montré précédemment, l'économie circulaire est une innovation et la définition même d'une innovation

¹ Site de Médicis Immobilier Neuf sur les innovations en matière d'écologie : <https://www.medicis-patrimoine.com/actualites-immobilier-neuf/eco-habitat/2020/07/28/3186-top-19-des-innovations-ecologiques-completement-folles.html>

diffère (rien qu'avec les néoclassiques et Schumpeter). Par extension, l'économie circulaire n'a pas de définition précise.

La réalité théorique de l'économie circulaire peut se comparer à une maison où un certain nombre d'intellectuels apportent leur propre pierre à l'édifice. Cela peut sembler une bonne chose, mais ça ne l'est pas. En effet, ces "pierres" sont de natures différentes car elles proviennent de différents domaines scientifiques et semi-scientifiques, entre autres : l'économie écologique, l'écologie industrielle, le biomimétisme, l'économie de la performance, le capitalisme naturel, etc. (Korhonen *et al.*, 2018). De plus, tous les domaines n'ont pas contribué au même niveau et dans la même direction. C'est pourquoi le concept d'économie circulaire n'est pas évident à intégrer clairement dans les esprits. Ce flou est aussi causé par le fait que le concept est à la mode et donc que tous les domaines cherchent à le définir, comme nous l'avons précédemment mentionné. Mais le but n'est pas de rester coincé dans ce flou, c'est pourquoi nous proposerons une définition un peu plus tard.

Le rôle de l'économie circulaire dans la transition énergétique et de matière se reflète par ses principes fondamentaux qui s'entremêlent et se rejoignent sur certains points, c'est le Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires qui met en avant ces principes fondamentaux. D'abord, l'écoconception qui permet de faire en sorte d'adopter une vision écologique d'un produit dès sa conception. Cela se traduit par une conception qui favorise la réparation, et surtout le recyclage. L'enjeu de l'écoconception est de maintenir un même niveau de qualité et de performance après chaque réparation. Ainsi, il y a une prise en compte des impacts environnementaux sur le cycle de vie du produit (l'approvisionnement durable qui caractérise une partie l'écoconception). Ensuite, un autre pilier qui est celui de l'écologie industrielle et territoriale. Elle correspond à une optimisation des flux d'énergies et de matières dans les processus de production d'un territoire. Par cette écologie industrielle, les acteurs économiques d'un même territoire (entreprises, ménages...) mutualisent leurs flux pour que les déchets de l'un soient les matières premières de l'autre. Deux autres piliers sont interconnectés, ce sont ceux de l'allongement de la durée d'usage et de la consommation responsable. En effet, ces principes tournent autour de l'achat d'occasion : au lieu d'acheter un produit neuf, autant réparer le produit en question (si c'est nécessaire) pour qu'un autre acteur (ou le même) puisse jouir de ce bien, au lieu de le jeter. L'objectif est donc de produire le moins de bien neuf, c'est le même objectif que le pilier de l'économie de fonctionnalité (vendre un service plutôt qu'un bien, comme le service d'une laverie par exemple). Enfin, le pilier qui est le plus connu, celui

du recyclage et de la gestion des déchets qui consiste à trier les déchets puis de réutiliser les matières premières extraites des produits jetés pour la création ou réparation d'autres biens (ou le même).

Tous ces principes (piliers) se croisent dans leurs objectifs. Par exemple, le recyclage se retrouve dans l'allongement de la durée d'usage, la consommation responsable, l'écoconception... Grâce à ces piliers et aux différentes implications dans le monde scientifique qui tentent de définir ce qu'est l'économie circulaire, une définition peut être donnée pour à la fois dévoiler l'identité de l'économie circulaire ainsi que son rôle dans la transition écologique. Elle est certes assez générale, mais reste néanmoins simple à comprendre. D'ailleurs, elle est inspirée de la définition donnée par le Ministère français de la Transition Écologique et Énergétique.

L'économie circulaire est un modèle économique qui, contrairement à celui du « tout jetable », valorise les déchets produits par la production et la consommation de biens et services en les réintégrant dans le processus de production. Le but est de limiter la consommation et le gaspillage de ressources naturelles ainsi que la production de déchets. À terme, la production en serait d'autant plus durable.

1.3. Où en sommes-nous maintenant ?

L'économie circulaire est loin d'être récente et occupe une place de plus en plus centrale dans les discussions sur l'adoption d'une nouvelle vision économique respectueuse de l'environnement. De nombreux pays, y compris ceux d'Europe, s'engagent de plus en plus à s'orienter vers ce modèle responsable.

1.3.1. Un effet de mode ?

Une étude réalisée par D'Amato et al. (2019) compare l'adoption de l'économie circulaire, de l'économie verte et de la bioéconomie à travers le monde, ainsi que dans cinq secteurs d'activité différents : le papier et les produits forestiers, l'alimentation, les boissons, les métaux et l'extraction minière, et l'énergie et les services d'équipement. Cette étude s'appuie sur les rapports des entreprises qui cherchent à légitimer leurs actions environnementales entre 2006 et 2018. Dans le cas qui nous intéresse, nous pouvons conclure de cette étude que le concept d'économie circulaire est le plus fréquemment mentionné dans les secteurs étudiés (73%). De plus, il s'agit du concept le plus "stable" dans ces secteurs, c'est-à-dire qu'il est présent dans tous

les secteurs, contrairement à l'économie verte qui est peu présente dans l'énergie et les services d'équipement (3%), et à la bioéconomie qui ne l'est pas du tout dans les métaux et l'extraction minière. Il est logique que l'économie circulaire soit le concept le plus stable, car il aborde trois thèmes récurrents liés à la surveillance de l'utilisation des ressources, à la réduction de leur utilisation et au recyclage. De plus, il traite à la fois de l'utilisation des matériaux et de l'énergie, ainsi que des intrants et des extrants tels que les matières premières, l'eau, l'énergie et les déchets. Ces thèmes sont pertinents dans tous les secteurs.

En examinant les différentes régions du monde (figure 1), comme mentionné précédemment, c'est le concept d'économie circulaire qui domine, mais il varie selon les zones géographiques. L'économie circulaire est mentionnée le plus souvent en Europe, suivie des Amériques, de l'Asie et de l'Océanie, puis de l'Afrique.

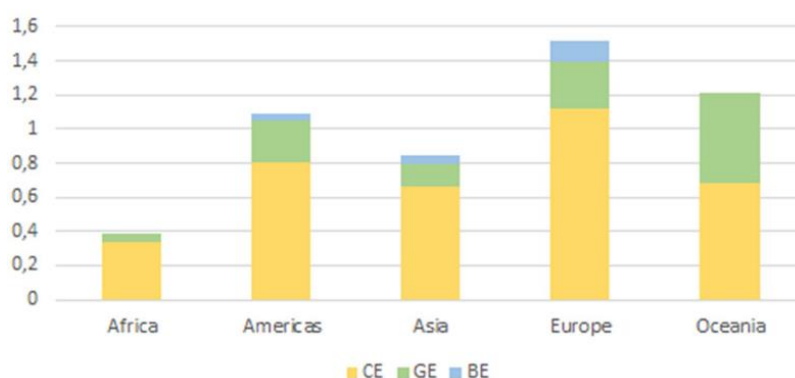


Figure 1 : Fréquence moyenne par page selon l'origine géographique de l'entreprise pour les cinq secteurs.

Lecture : Dans les Amériques, l'économie circulaire est mentionnée en moyenne 0,8 fois par page. **Source** : D'Amato *et al.*, Circular, Green, and Bio Economy: How Do Companies in Land-Use Intensive Sectors Align with Sustainability Concepts? Ecological Economics, 2019, 158, 116-133.

Grâce à cette étude, nous constatons que le sujet de l'économie circulaire est très tendance, comparé à l'économie verte et à la bioéconomie. Les entreprises y accordent beaucoup plus d'intérêt, notamment en Europe. Cependant, il reste à déterminer si les actions suivent cette tendance.

1.3.2. La circularité en France en quelques chiffres

En France métropolitaine, la tendance en faveur de l'économie circulaire est plus que satisfaisante. Cela se traduit par deux éléments importants : l'emploi et la nature de l'activité économique.

En ce qui concerne l'emploi, selon Niang *et al.* (2022), entre 2008 et 2015, le nombre d'emplois dans le domaine de la circularité a augmenté de 3,02% (passant de 559 000 à 576 000

emplois). En revanche, la croissance de l'emploi dans l'ensemble de l'économie n'a atteint que 1,49% (passant de 26 338 000 à 26 731 000 emplois). Autrement dit, le nombre d'emplois "verts" augmente plus rapidement que le nombre d'emplois "normaux". Plus précisément, parmi les emplois liés à la consommation responsable, à l'allongement de la durée d'usage et au recyclage et à la valorisation des déchets, c'est ce dernier domaine qui connaît la croissance la plus rapide (5,7% contre 3,42% et 0,94%), mais c'est le domaine de l'allongement de la durée de vie qui emploie le plus de personnes (243 000 en 2015).

En ce qui concerne la nature de l'activité économique, toujours selon Niang et al. (2022), l'activité circulaire gagne en importance. Entre 2008 et 2015, le nombre d'emplois circulaires a augmenté de 3,58% dans les 20 zones qui comptent le plus d'emplois circulaires (à l'exception de Paris et de la Corse). Parallèlement, sur la période 2008-2015 et dans les 20 zones qui comptent le moins d'emplois circulaires, les auteurs observent une diminution de 8,22% de ces emplois. Selon les auteurs, cela s'explique par une densité de population plus faible dans les zones où l'économie circulaire est moins implantée. Ils émettent également l'hypothèse que l'effet observé (différences en termes d'emploi) est lié à l'engagement de certaines régions dans la mise en œuvre de politiques publiques en faveur de l'économie circulaire. Les auteurs notent également une évolution des effets de l'action publique selon les zones. En effet, au début de la période, les régions où la croissance de l'activité circulaire était la plus prononcée étaient les moins favorisées. Ce constat met en évidence un rattrapage régional qui renforce l'hypothèse d'un impact positif des politiques publiques locales sur le développement de l'économie circulaire.

Globalement, le système économique français tend à être plus responsable vis-à-vis de l'environnement, que ce soit au niveau de l'emploi ou de l'activité économique. Cependant, l'évolution n'est pas homogène dans toutes les régions. La raison en est que les politiques publiques peuvent ou non financer des projets ou des activités liés à l'économie circulaire, ce qui peut permettre ou non la création d'emplois dans ce domaine.

1.3.3. Union Européenne : vers une circularité de qualité ?

Maintenant, analysons si le modèle économique des pays de l'Union européenne tend vers un modèle circulaire ou non. Pour rappel, l'un des objectifs de l'économie circulaire est de réduire la quantité de déchets en les réintégrant dans le processus de production. C'est donc ce

que nous devons examiner pour déterminer si la quantité de déchets a réellement diminué depuis le début du 20^e siècle.

Il semblerait que la quantité de déchets par personne connaît des fluctuations au fil des périodes (figure 2). Par exemple, lors des crises de 2008 et de 2020, l'Union européenne a enregistré la plus forte baisse de quantité de déchets par personne (respectivement 4 881 kg et 4 813 kg), selon Eurostat. En dehors de ces périodes, la production de déchets fluctue entre 5 000 et 5 240 kg par personne entre 2004 et 2018.

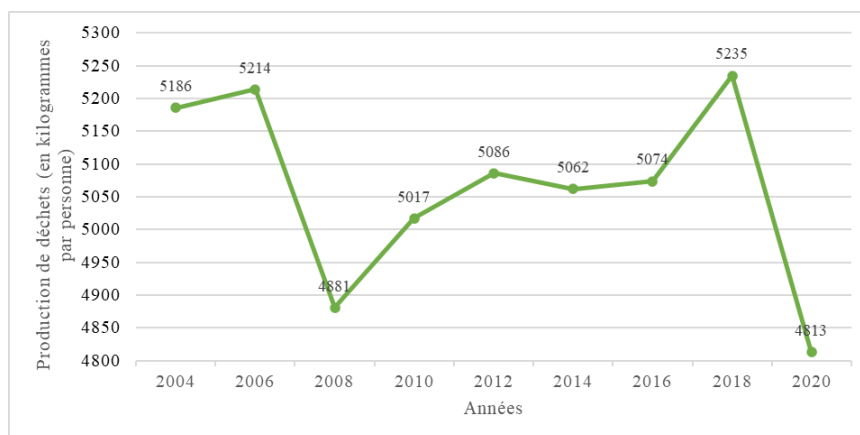


Figure 2 : Production de déchets par habitant entre 2004 et 2020 au sein de l'Union Européenne. **Lecture :** En 2012, chaque personne au sein de l'Union Européenne a produit en moyenne 5 086 kg de déchets. **Source :** Eurostat, code : CEI_PC034.

En nous plongeant un peu plus dans les détails, nous pouvons nous concentrer sur un exemple de déchets pour analyser si l'évolution de la production de ces déchets correspond à celle que nous avons caractérisée précédemment. L'exemple des déchets d'emballages (figure 3) est pertinent car il suscite des préoccupations, étant donné que ce type de déchet pollue les plages et les eaux (sans oublier les déversements de pétrole dans les océans à la suite d'accidents).

Malgré la diminution générale de la quantité de déchets produits par habitant, les déchets d'emballages ne suivent pas la même tendance. En 2005, chaque personne produisait 158,34 kg de déchets d'emballages, et en 2020, cette quantité est passée à environ 177,92 kg par personne, soit une augmentation d'environ 12,37 %. De plus, contrairement à ce que l'on observe pour l'ensemble des déchets lors de périodes d'instabilité, ce n'est pas le cas pour les déchets d'emballages. En effet, le niveau est passé de 161,59 kg par personne en 2008 à 149,89 kg par personne en 2009, pour remonter à 154 kg par personne en 2010. En revanche, l'année 2020 est

marquée par une stabilité dans la production des déchets d'emballage, avec 177,56 kg par personne en 2019 et 177,92 kg par personne en 2020.

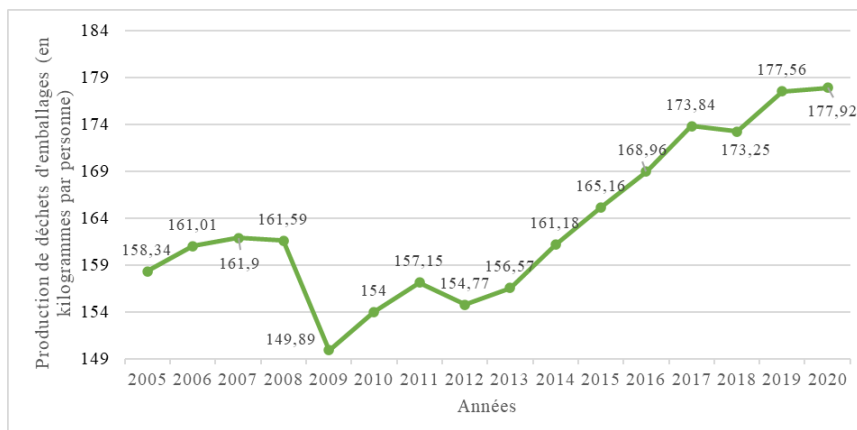


Figure 3 : Production de déchets d'emballages par habitant dans l'Union Européenne entre 2005 et 2020.

Lecture : En 2011, chaque personne a produit en moyenne 157,15 kg de déchets d'emballages au sein de l'Union Européenne. **Source :** Eurostat, code : CEI_PC040.

A partir de là, nous pouvons établir un lien avec la quantité de déchets d'emballages plastiques (figure 4). La première constatation que l'on peut faire est que les tendances de la quantité de déchets pour tous les emballages et les emballages plastiques sont similaires, avec une croissance constante entre 2005 et 2020, avec une interruption en 2009. La quantité de déchets d'emballages plastiques passe de 28,18 kg par personne en 2005 à environ 34,56 kg par personne en 2020, soit une augmentation d'environ 22,64 %, selon Eurostat. Ainsi, la quantité de déchets d'emballages plastiques a augmenté plus rapidement que la quantité de déchets pour l'ensemble des emballages. De plus, la proportion de déchets d'emballages plastiques dans la quantité totale de tous les emballages a augmenté entre 2005 et 2020. En 2005, les déchets d'emballages plastiques représentaient 17,8 % de la quantité totale de déchets d'emballages, tandis qu'en 2020, cette proportion est passée à 19,42 %, soit une augmentation d'environ 10 %.

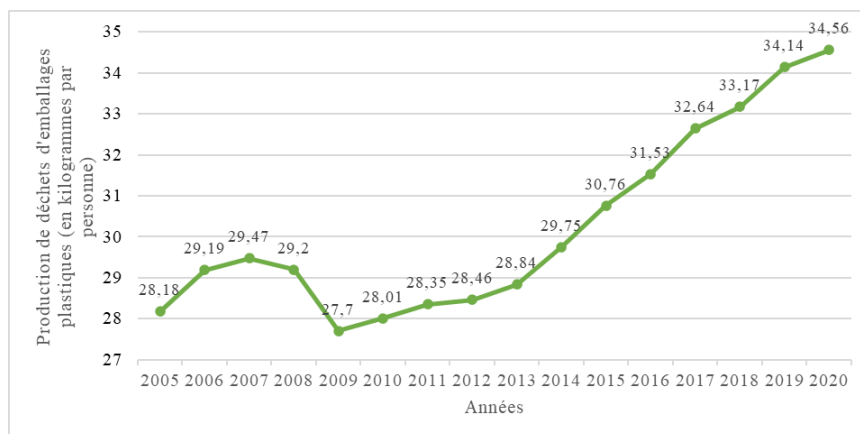


Figure 4 : Production de déchets d’emballages en plastique par habitant dans l'Union Européenne entre 2005 et 2020. **Lecture :** En 2013, chaque personne a produit en moyenne 28,84 kg de déchets d’emballages plastiques au sein de l’Union Européenne. **Source :** Eurostat, code : CEI_PC050.

La diminution des déchets n'est pas le seul objectif de l'économie circulaire, bien entendu. Un autre objectif important est la valorisation de ces déchets, notamment par le biais du recyclage. Bien que le défi de la réduction des déchets ne soit pas véritablement réussi au sein de l'Union européenne, celui du recyclage peut compenser cette situation (figure 5). Nous pouvons observer une augmentation constante du taux de recyclage des déchets, c'est-à-dire une proportion de plus en plus importante de déchets qui sont recyclés depuis 2004. Selon Eurostat, ce taux est passé de 8,3 % en 2004 à 11,7 % en 2021. Ainsi, 3,4 % de déchets supplémentaires ont été recyclés en 2021 par rapport à 2004. Cependant, cette augmentation s'est atténuée depuis 2012 : entre 2012 et 2021, on observe une augmentation du taux de déchets recyclés de seulement 0,6 %.



Figure 5 : Taux de recyclage des déchets (sauf minéraux principaux) entre 2004 et 2020, au sein de l’Union Européenne. **Lecture :** En 2015, 11,3% des déchets ont été recyclés au sein de l’Union Européenne. **Source :** Eurostat, code : CEI_WM010.

Outre les objectifs que l'économie circulaire doit atteindre, elle doit également s'inscrire dans une perspective de croissance. La croissance se caractérise notamment par une augmentation de l'emploi, de l'investissement, de la valeur ajoutée et du nombre de brevets accordés dans le secteur de l'économie circulaire.

Dans un premier temps, l'emploi dans le secteur de l'économie circulaire de l'Union européenne a augmenté depuis 2012 (figure 6). Selon Eurostat, le nombre d'emplois dans ce secteur est passé de 3,79 millions de personnes en 2012 à 4,28 millions en 2021, soit une augmentation d'environ 12,93 %.

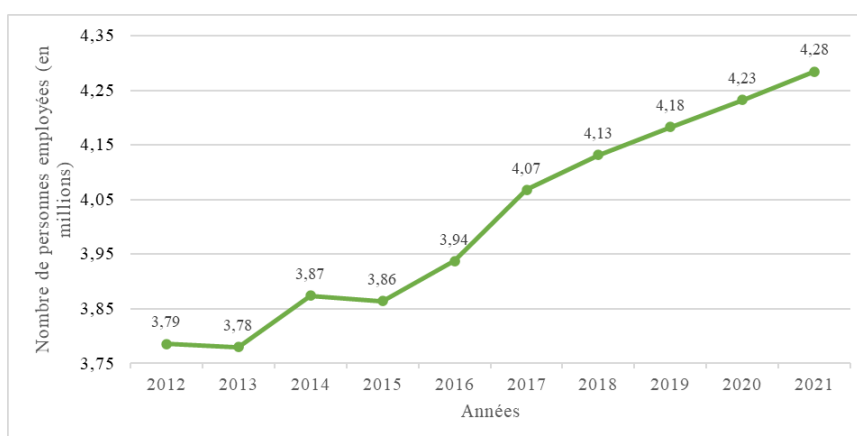


Figure 6 : Nombre de personnes employées dans le secteur de l'économie circulaire entre 2012 et 2021 au sein de l'Union Européenne. **Lecture :** En 2014, 3,87 millions de personnes au sein de l'Union Européenne ont été employé dans le secteur de l'économie circulaire. **Source :** Eurostat, code : CEI_CIE011.

Ensuite, l'économie circulaire obtient de très bons résultats, tant au niveau de l'investissement que dans la création de valeur ajoutée au sein de l'Union européenne (figure 7). Les deux ont connu une croissance depuis 2012. En ce qui concerne l'investissement privé réalisé dans l'économie circulaire, il a bondi de 100,2 milliards d'euros à 1215,8 milliards d'euros entre 2012 et 2021, soit une multiplication par environ 12,13 selon Eurostat. L'augmentation la plus importante a eu lieu en 2013, passant de 100,2 milliards d'euros à 796,2 milliards d'euros, soit une multiplication de l'investissement privé par environ 7,95. Malgré cette exposition du côté de l'investissement privé, la valeur ajoutée brute n'a pas suivi la même tendance et a connu une augmentation beaucoup moins rapide mais néanmoins constante. En 2012, l'économie circulaire a généré une valeur ajoutée brute de 215,6 milliards d'euros et en 2021, cette valeur a augmenté pour atteindre un peu moins de 300 milliards d'euros, soit une augmentation d'environ 38,91 %.

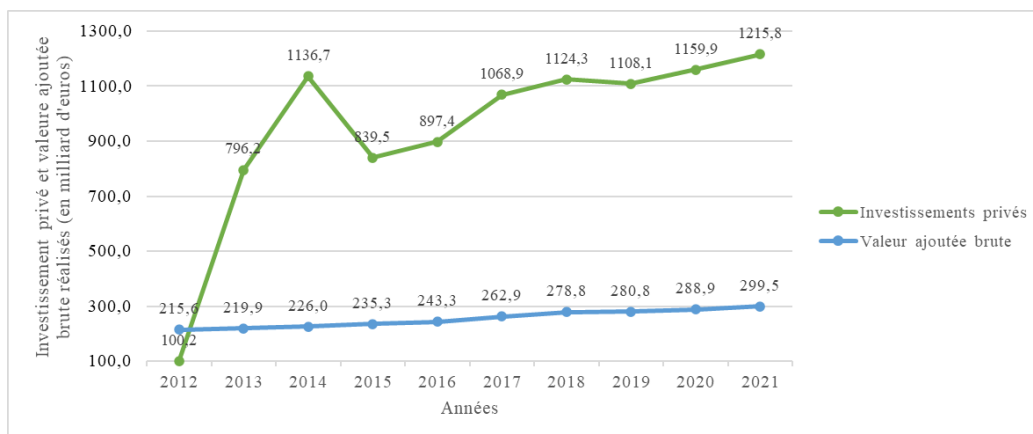


Figure 7 : Investissement privé et valeur ajoutée brute liés aux secteurs de l'économie circulaire au sein de l'Union Européenne, en 2017. **Lecture :** En 2017, dans l'Union Européenne, 1068,9 milliards d'euros ont été investis dans l'économie circulaire et elle réalisée une valeur ajoutée brute de 262,9 milliards d'euros. **Source :** Eurostat, code : CEI_CIE012.

Pour finir, les brevets sont une source de croissance car ils constituent l'un des moyens légaux d'encourager l'innovation. Comme nous l'avons mentionné précédemment, l'économie circulaire est composée d'innovations incrémentales et radicales. Si les dépôts de brevets étaient impossibles, personne ne serait incité à innover et donc à contribuer à l'économie circulaire. C'est pourquoi les brevets sont importants. Cependant, au sein de l'Union européenne, le nombre de brevets liés au recyclage et aux matières premières secondaires (revalorisation des déchets) a globalement diminué depuis 2010 (figure 8). En 2010, 306 brevets ont été déposés, contre 295 en 2019. Bien que cette diminution puisse sembler modeste, elle s'est produite à partir de 2015, année où 350 brevets ont été déposés, ce qui représente une baisse d'environ 18,64% en 4 ans, selon Eurostat.

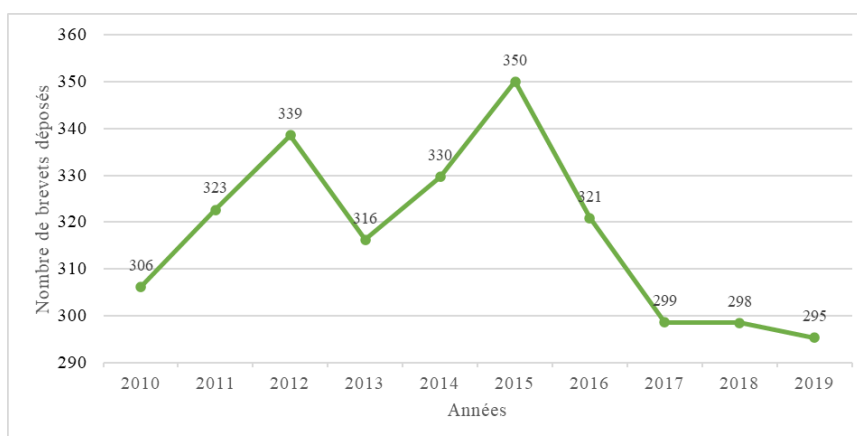


Figure 8 : Brevets liés au recyclage et aux matières premières secondaires au sein de l'Union Européenne, en 2018. **Lecture :** En 2018, 298 brevets liés au recyclage et aux matières premières secondaires ont été déposé dans l'Union Européenne. **Source :** Eurostat, code : CEI_CIE020.

Pour conclure, depuis 2004-2005, l'Union européenne, y compris la France, montre une tendance à adopter un modèle économique circulaire en augmentant le recyclage de ses déchets. De plus, l'investissement contribue à la croissance du modèle circulaire et ouvre de nouvelles opportunités d'innovation, même si le nombre de brevets déposés ne reflète pas pleinement les efforts financiers engagés.

1.3.4. Evaluation de la circularité mondiale à différents niveaux

Les observations précédentes se concentrent principalement sur la France et l'Union européenne au niveau macroéconomique. Cependant, il est important de prendre en compte le développement de l'économie circulaire à différents niveaux : macro, méso et micro, à l'échelle mondiale.

1.3.4.1. Niveau macroéconomique

Ce premier niveau, le plus élevé, concerne les villes, les régions, etc. À ce niveau, nous nous intéressons à la création d'éco-villes, aux modèles de consommation collaborative et à la gestion innovante des déchets (Ghisellini *et al.*, 2016).

Le concept d'éco-villes vise à restructurer les villes de manière à les rendre plus écologiques. L'idée des éco-villes est apparue aux États-Unis dans les années 80, mais c'est surtout au Japon qu'elle a connu un succès depuis 1997. Les résultats en termes de réduction des émissions de carbone ont été obtenus grâce à la proximité géographique de ces éco-villes. En fait, depuis 1997, 26 éco-villes ont été créées (Ghisellini *et al.*, 2016). Des subventions gouvernementales ont été accordées pour investir dans des projets de recyclage. De plus, ces projets ont généré d'autres projets et des avantages tant pour le public que pour le privé. En d'autres termes, les éco-villes génèrent des externalités positives.

D'autres projets d'éco-villes sont également présents en Europe (Allemagne, Suède, etc.) ainsi qu'en Chine, comme les villes de Jilin, Panshi, Qinqyun, Jinqzhou et Foshan, selon la revue CSTB (2018), qui ont reçu le prix "Eco-cité" pilote franco-chinois lors de la Conférence Internationale sur le Bâtiment Durable en 2018. Selon les auteurs, les performances de ces villes sont attribuables à l'intervention publique dans les secteurs ayant un fort impact environnemental.

Concentrons-nous maintenant sur les modèles de consommation collaborative. Selon Ghisellini *et al.* (2016), ces modèles sont reconnus comme l'un des meilleurs leviers pour la

transition vers un système circulaire. Ces modèles sont fondamentalement liés au partage de la propriété. Selon Tukker (2015), la propriété est au cœur de l'économie linéaire, tandis que l'abandon de la propriété pourrait être un moyen potentiel de transition vers un modèle circulaire. Dans cette optique, une idée serait d'utiliser la location, où l'utilisation d'un bien par une personne ne lui confère pas un droit exclusif (elle n'en est pas propriétaire), mais est possible moyennant le paiement d'une redevance.

Le don, le prêt et le troc sont d'autres solutions en plus de la location. Par exemple, le covoiturage est un exemple de modèle basé sur la consommation collaborative, tout comme les sites internet de partage de ressources artistiques, intellectuelles, etc. On peut observer la croissance de ces modèles au fil du temps. Les auteurs mentionnent, par exemple, que les habitants de l'Amérique du Nord ont pu réduire leur temps de conduite de 30% grâce au covoiturage par rapport à l'époque où ils possédaient tous une voiture personnelle (Ghisellini *et al.*, 2016).

Enfin, les auteurs abordent le sujet de la gestion des déchets, ce qui est tout à fait pertinent étant donné que le problème des déchets doit être pris de plus en plus au sérieux, notamment dans un contexte de mondialisation qui aggrave la situation (Song *et al.*, 2015). Le Japon est un exemple de pays qui aborde sérieusement la question des déchets. Le cas de la ville japonaise de Kawasaki montre comment la gestion des déchets solides municipaux (Municipal Solid Waste Management - MSWM) permet à la fois de réduire la quantité de déchets et de se procurer des ressources naturelles (Geng *et al.*, 2010).

Idéalement, l'économie circulaire pourrait permettre de réduire entièrement les déchets, même si cela est impossible à réaliser complètement (nous verrons les inconvénients de l'économie circulaire par la suite). Néanmoins, elle peut se rapprocher autant que possible du concept de "zéro déchet". Certaines villes ont mis en place des programmes ambitieux visant à atteindre le "zéro déchet", comme Durban en Afrique du Sud (Matete et Trois, 2008). Cependant, des preuves empiriques montrent que le "zéro déchet" est difficile à atteindre, même si le projet avait du potentiel. Les auteurs de l'étude montrent également que plus les ménages sont impliqués, plus le recyclage est significatif. Dans cette même perspective, Zaman et Lehmann (2013) proposent l'indice "Zéro Déchet" pour les villes d'Adélaïde, Stockholm et San Francisco, afin de mesurer la qualité de la gestion des déchets. San Francisco a obtenu la meilleure valeur de l'indice "Zéro Déchet", avec 51% des déchets publics récupérés, tandis que Stockholm a obtenu la plus faible valeur (0,17) en raison de l'utilisation de l'incinération.

Au niveau européen, l'objectif de zéro déchet est également présent et est inscrit dans la politique de l'Union européenne. Le 7^e programme d'action pour l'environnement prévoit la quasi-élimination de la mise en décharge d'ici 2020 (UE, 2013). Certains pays membres ont déjà réussi à réduire leur quantité de déchets municipaux biodégradables à moins de 35% de la quantité produite en 1995, comme l'Allemagne, l'Autriche et la Belgique. Les Pays-Bas ont même réduit la quantité de déchets mis en décharge à seulement 3% du total des déchets produits.

1.3.4.2. Niveau mésoéconomique

Ce niveau fait référence aux parcs éco-industriels, qui sont organisés de manière que les entreprises concernées combinent leurs unités de production de manière appropriée afin de minimiser les déchets et les émissions de carbone pour l'ensemble du parc. L'objectif de ces parcs est d'atteindre à la fois une efficacité économique et environnementale accrue (Ghisellini *et al.*, 2016).

Dans le monde entier, depuis la fin des années 90, plusieurs cas de parcs éco-industriels ont été recensés, notamment en Amérique du Nord, en Asie de l'Est, en Australie, au Brésil et en Égypte. En Europe, on trouve des parcs éco-industriels au Royaume-Uni, aux Pays-Bas, en Finlande, en Autriche, en Allemagne, en Italie, ainsi qu'au Danemark avec le parc de Kalundborg, qui est l'un des cas les plus connus (Ghisellini *et al.*, 2016). Le parc se distingue par le partage de l'eau, de la vapeur, des produits dérivés et de la chaleur entre les entreprises présentes (Valenzuela-Venegas *et al.*, 2020). Les entreprises de ce parc ont rapporté des résultats environnementaux significatifs dix ans après sa création dans les années 80.

En Chine, le concept de parcs éco-industriels a été introduit à la fin des années 90, et entre 2001 et 2011, la Chine a développé le plus grand réseau national de parcs éco-industriels, avec 60 projets nationaux de parcs éco-industriels (Ghisellini *et al.*, 2016). Ces parcs offrent un potentiel à la fois économique, en réduisant les coûts d'approvisionnement en ressources et en augmentant les revenus issus de la vente des déchets, et environnemental, en réduisant la quantité de déchets et en diminuant l'utilisation de ressources énergétiques. Des avantages sociaux ont également émergé, tels que l'amélioration de la santé publique et une plus grande chance d'obtenir un emploi pour les travailleurs locaux de la gestion des déchets (Ghisellini *et al.*, 2016).

1.3.4.3. Niveau microéconomique

Au dernier niveau, celui de l'entreprise et du consommateur, plusieurs éléments entrent en jeu. Tout d'abord, pour une entreprise souhaitant passer à un système de production circulaire, l'écoconception et une production plus propre sont deux stratégies étroitement liées et fondamentales pour se préparer à une meilleure circularité (Ghisellini *et al.*, 2016). L'idée est d'agir sur l'ensemble du processus de production et d'avoir un impact sur le cycle de vie du produit, ce qui le rendra plus étendu. En Chine, la production plus propre a été largement adoptée par rapport à d'autres méthodes de gestion de l'environnement, notamment après l'adoption de la loi sur la promotion d'une production plus propre en 2002 (Ghisellini *et al.*, 2016). Selon Li *et al.* (2010), au moins 5 000 industries chinoises ont mis en place des pratiques de production plus propre.

Nous avons examiné l'aspect de la demande avec l'action des entreprises. Maintenant, nous devons nous concentrer sur l'aspect de l'offre avec le consommateur. Même si les entreprises s'engagent dans une production plus propre, si les consommateurs ne sont pas réceptifs, cela n'avance à rien. C'est l'une des raisons pour lesquelles la promotion de la responsabilité des consommateurs est importante, notamment par l'achat et l'utilisation de produits et services plus durables. L'étiquetage des produits est un outil pour susciter la responsabilité des consommateurs, car il est synonyme de confiance. De plus, il se développe beaucoup dans le monde entier. Le label écologique de l'Union européenne a délivré 1 300 licences depuis 1992 selon Ghisellini *et al.* (2016). Un autre instrument est la consommation dans le secteur public, qui revêt également une grande importance, car les marchés publics représentaient environ 20 % du PIB de l'Union européenne en 2009 (UE, 2012). Ainsi, des systèmes de marchés publics écologiques ont été mis en place dans certains pays asiatiques et américains (Resource, 2015). Dans l'UE27, le développement des marchés publics écologiques est encourageant, mais néanmoins insuffisant.

1.4. Avantages et inconvénients de cette innovation environnementale à partir d'une perspective d'économie écologique et d'économie de l'innovation

1.4.1. Les effets bénéfiques d'une économie circulaire

Selon la Fondation Ellen MacArthur, l'économie circulaire offre plusieurs opportunités découlant des avantages qu'elle peut créer, tant sur le plan économique que sur le plan environnemental, pour les entreprises et les ménages.

La première opportunité économique identifiée par la Fondation Ellen MacArthur est la croissance économique. Cette croissance est mesurée par le PIB, et pour observer une croissance économique, il faut que le PIB augmente. Cette croissance peut être le résultat de l'ouverture de nouveaux marchés caractérisés par des activités circulaires, ce qui génère des revenus supplémentaires. La Fondation établit un parallèle entre le modèle circulaire et le modèle linéaire en termes de croissance économique. Elle estime que si le modèle circulaire est globalement adopté, le PIB européen pourrait augmenter de 11% d'ici 2030, contre seulement 4% si le modèle linéaire est conservé. L'économie circulaire permet également une réduction significative des coûts liés aux matériaux, ce qui constitue un autre avantage économique. Par exemple, selon une analyse sectorielle, le Royaume-Uni pourrait économiser 1,1 milliard de dollars par an en réduisant les coûts liés à l'enfouissement des déchets.

En outre, selon la Fondation Ellen MacArthur, SUN et McKinsey, « les études existantes attestent des effets bénéfiques sur l'emploi en cas de passage à une économie de type circulaire »². Les emplois potentiellement créés ne se limitent pas au recyclage et à la remanufacturation des produits. Des emplois peuvent être créés grâce à l'esprit entrepreneurial et à l'innovation croissante, à un modèle économique axé sur les services (comme l'économie de la fonctionnalité) et au développement de la logistique inverse. Une étude menée par la Fondation au Danemark montre qu'entre 7 300 et 13 300 emplois pourraient être créés d'ici 2035 si le modèle circulaire est largement adopté. À long terme, la création d'emplois favorise la compétitivité et donc l'innovation, créant ainsi un cercle vertueux.

Face aux idées de circularité, les incitations se caractérisent par le remplacement du cycle de vie linéaire d'un produit par un cycle de vie intrinsèquement circulaire. Cela entraîne la création

² « L'économie circulaire : pour une Europe compétitive », Fondation Ellen MacArthur, SUN, McKinsey & Co. (juin 2015).

de plusieurs systèmes et réseaux, tels que les réseaux de logistique inverse qui permettent de ramener les produits du consommateur final à leur origine. Grâce à ces innovations, les matériaux utilisés dans la conception des produits deviendront de meilleure qualité, l'efficacité énergétique augmentera, la rentabilité de la main-d'œuvre sera améliorée, et les opportunités de profits pour les entreprises seront croissantes.

L'économie circulaire offre des avantages environnementaux significatifs, selon la Fondation Ellen MacArthur. Tout d'abord, elle permet de réduire les émissions de dioxyde de carbone (CO₂). La Fondation estime qu'en adoptant un modèle circulaire, les émissions de CO₂ pourraient être réduites de moitié d'ici 2030. Cette réduction découle d'une utilisation plus efficace des ressources primaires, et il est prévu qu'elle entraîne une diminution de 32% de l'utilisation de ces ressources d'ici 2030.

Un autre avantage environnemental de l'économie circulaire est l'amélioration de la productivité des terres et la limitation de la dégradation des sols. Grâce au recyclage, notamment, le modèle circulaire réduira sa dépendance aux terres. Cela permettra aux terres de se régénérer plus rapidement, sans avoir recours à l'utilisation d'engrais chimiques. Selon la Fondation, l'adoption d'un modèle circulaire en Europe pourrait entraîner une réduction de jusqu'à 80% de la consommation d'engrais chimiques d'ici 2050.

En ce qui concerne les avantages environnementaux, l'économie circulaire peut également réduire les externalités négatives liées à la pollution, telles que le bruit, la pollution de l'air, de l'eau, etc. La réduction de la congestion routière est l'un des effets attendus, et la Fondation estime qu'elle pourrait entraîner une réduction de 16% du temps perdu dans les embouteillages d'ici 2030.

L'économie circulaire peut également apporter des avantages aux entreprises. Elles peuvent réduire leurs coûts liés aux intrants en adoptant des pratiques circulaires. Par exemple, selon la Fondation, les fabricants de téléphones portables pourraient réduire leurs coûts de 50% par appareil s'ils conçoivent des smartphones avec des composants facilement récupérables et réutilisables. De plus, les entreprises peuvent trouver de nouvelles sources de profits en revendant des composants ou d'autres éléments issus du recyclage ou de la réutilisation de leurs produits. En adoptant un modèle circulaire, une entreprise peut également se protéger contre la volatilité des prix des matières premières vierges, notamment en cas d'inflation élevée. De plus,

elle est moins susceptible d'être perturbée par les déséquilibres externes qui peuvent affecter les chaînes d'approvisionnement traditionnelles.

Dans le contexte de l'économie circulaire, les entreprises peuvent améliorer la demande qui leur est adressée et créer de nouvelles opportunités, notamment par le biais de nouvelles activités de services. Selon la Fondation Ellen MacArthur, les étapes nécessaires à la réutilisation des produits requièrent un certain savoir-faire. Certaines entreprises peuvent se spécialiser dans des services offrant une main-d'œuvre spécialisée. Ainsi, si davantage d'entreprises adoptent le modèle circulaire, ces entreprises spécialisées pourront bénéficier d'une demande accrue émanant de ces entreprises. De plus, le modèle circulaire permet aux entreprises d'acquérir des connaissances sur les modes d'utilisation des produits dans le but d'améliorer ces derniers (et/ou les services associés) et ainsi mieux répondre à la demande des clients.

L'économie circulaire peut également apporter des avantages aux ménages, notamment en contribuant à un revenu moyen plus élevé. Cela est possible grâce à la baisse des prix des produits d'occasion et à une durée de vie prolongée de certains produits. De plus, les ménages peuvent bénéficier de produits de meilleure qualité et d'une plus grande diversité de choix. En effet, de nouveaux systèmes sont mis en place pour la personnalisation des produits, comme le souligne la Fondation. Enfin, les ménages peuvent acquérir des produits qui ont une durée de vie plus longue. Cela se traduit par des coûts réduits pour les consommateurs, ainsi que par une plus grande facilité de réparation des produits, car ils sont conçus pour être facilement réparables.

1.4.2. Les conséquences indésirables de l'économie circulaire

L'économie circulaire présente certaines limites liées à la thermodynamique. Georgescu-Roegen a introduit cette limite en l'appelant la « quatrième loi » (Georgescu-Roegen, 1971). Bien que le recyclage, l'utilisation minimale d'énergie et la réduction des déchets soient des piliers de l'économie circulaire, le recyclage lui-même nécessite l'utilisation de machines qui consomment de l'énergie et produisent des déchets. Par conséquent, il est impossible de recycler entièrement sans générer de nouveaux déchets. De plus, la construction de ces machines entraîne une perte irréversible de matières et de matériaux, ainsi qu'une certaine forme de pollution. Cette réalité soulève une certaine contradiction dans l'approche écologique de l'économie circulaire. En fin de compte, chaque projet d'économie circulaire doit être évalué au

cas par cas afin de mesurer sa contribution nette à la durabilité environnementale et déterminer sa viabilité écologique.

En ce qui concerne les limites spatiales et temporelles de l'économie circulaire, il convient de noter que ces projets sont généralement mis en œuvre dans un espace restreint (local ou régional) et à des stades ultérieurs. Les décideurs publics ne sont pas toujours encouragés à adopter une vision alignée avec l'économie circulaire, d'où l'absence d'une gouvernance mondiale en la matière (Korhonen *et al.*, 2018). Cela est dû en partie à une sous-évaluation qualitative des projets en termes de contribution nette à la durabilité environnementale. De plus, des observations ont mis en évidence des difficultés à réduire l'impact environnemental sans transférer le problème vers d'autres systèmes, souvent des pays moins développés (Korhonen, 2004). Bien que les résultats semblent positifs en termes d'efficacité économique et de gestion de la biomasse, les exportations de ces industries posent des problèmes importants en ce qui concerne le cycle de vie des produits. (Korhonen et Snäkin, 2005).

Si nous nous concentrons sur les limites temporelles, nous pouvons dire qu'il existe une incertitude quant à l'allongement de la durée de vie des produits, à leurs impacts négatifs potentiels et à leur ampleur. Dans ce cas, une durée plus courte des produits associée à des innovations continues seraient un avantage environnemental important. D'où la nécessité de trouver un équilibre entre la qualité (durée de vie plus longue) et le recyclage (Korhonen *et al.*, 2018). Autrement dit, un choix doit être fait entre système traditionnel linéaire et système circulaire. En outre, les décisions concernant les décennies à venir sont bloquées. Cela s'explique par des évaluations moins bonnes des futures innovations dans le cadre de l'économie circulaire, comparées aux évaluations des innovations dans le cadre de l'économie linéaire (Norton *et al.*, 1998).

Une autre limite tient à la croissance économique. L'idée est de dire que toute augmentation de l'efficacité économique est soumise à l'effet rebond (figure 9) (Berkhout *et al.*, 2000), au paradoxe de Jevons (Mayumi *et al.*, 1998) et à l'effet boomerang (Mayer *et al.*, 2005). En effet, quand l'efficacité environnementale de la production augmente, la consommation peut augmenter. Donc au lieu de réduire l'utilisation de matières et d'énergie, induit par une hausse de l'efficacité de la production, elle augmente. C'est ainsi qu'on observe un effet rebond, cela rejoint l'idée du paradoxe de Jevons mettant en avant qu'une utilisation plus efficace d'une matière entraîne une augmentation de sa consommation.

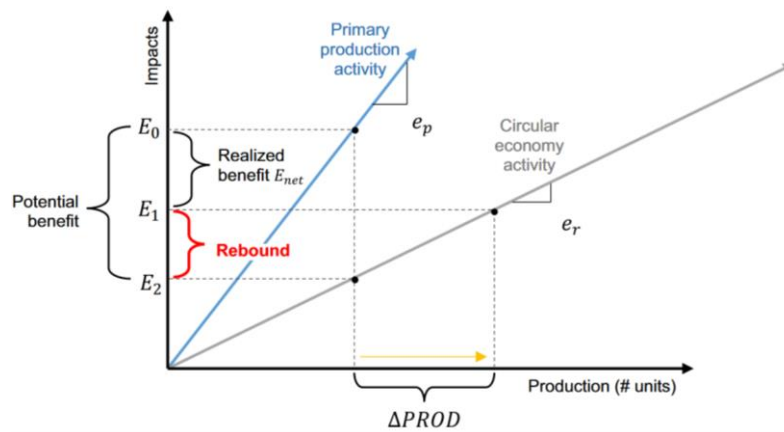


Figure 9 : Rebond de l'économie circulaire dû à l'augmentation de la production. **Lecture** : L'effet se produit lorsque la production s'accélère, les bénéfices nets sont réduits de $E_1 - E_2$. Si le rebond est trop important dû à une importante production, il annulera les bénéfices nets ($E_1 - E_2 = 0$), voire deviennent des pertes ($E_1 - E_2 < 0$). **Source** : Zink T. et Geyer R. Circular Economy Rebound. Journal of Industrial Ecology, 2017, 21(3), 593-602.

Graphiquement, nous voyons bien que les activités de type économie circulaire ont tout de même un impact non négligeable. Seulement, cet impact n'est pas constant, au contraire. C'est bien là une des limites de l'économie circulaire, car comme tout modèle économique, un impact environnemental sera toujours présent.

Quant à « l'effet boomerang » cela renvoi en partie aux limites spatiales dans le sens où les pays riches transfèrent leurs impacts environnementaux vers les pays pauvres, cela explique leurs résultats en termes d'éco-efficacité, d'où le fait que ce terme ne soit pas pertinent, surtout si on prend en compte la « quatrième loi » de thermodynamique. Donc étant donné que les pays pauvres subissent ces impacts, la biodiversité s'y détériore car réduit la migration de certains animaux, de plus les pays riches dépendent de ces migrations. C'est ainsi que l'on peut différencier, pour sûr, éco-efficacité et durabilité.

Il est vrai qu'actuellement et pour plusieurs raisons comme celles que l'on a mentionné précédemment, il existe empiriquement un arbitrage entre économie linéaire et économie circulaire. Le lock-in (associée à la dépendance au sentier) est une raison qui alimente cet arbitrage (Norton *et al.*, 1998) En effet, les innovations de type économie circulaire rencontrent des difficultés pour pénétrer le marché. La raison tient au fait que les technologies en place sur le marché depuis un certain temps s'y sont profondément ancrées et y sont donc dominantes, c'est le phénomène du « lock-in » (verrouillage technologique). D'un point de vue culturel, peu de personnes sont incitées à changer de technologie, même si elles sont économiquement et écologiquement viables, c'est la dépendance au sentier. En plus de ça, les innovations de type

économie circulaire nécessitent un nouveau mode de gestion et de comportement (Korhonen *et al.*, 2018).

En outre, comme toute économie, même circulaire a besoin d'être gérée et c'est en cela que la présence d'organisations est indispensable (Korhonen *et al.*, 2018). Cependant, toute implémentation d'acteurs amène des inconvénients, autrement dit, l'organisation autour de l'économie circulaire peut être défaillante. Il est d'abord nécessaire de rappeler quelque chose d'assez évident : les flux de matériaux et d'énergie n'ont pas de frontières. C'est pour cette raison qu'il est fondamental de développer une gestion de la durabilité inter-organisationnelle entre le client et le fournisseur. Cependant, la coopération entre les deux acteurs n'est pas toujours évidente et peut déboucher sur une impasse. En plus de cela, ce type d'organisation pose plusieurs problèmes, dont celui du leader du réseau, celui de la responsabilité, des gains, etc. (Korhonen *et al.*, 2018).

Pour conclure, l'économie circulaire présente bien des avantages aussi bien économiques qu'environnementaux mais également des inconvénients. Parmi eux se trouvent les problèmes liés à l'information : les projets d'économie circulaire peuvent être sous-évalués, d'où la nécessité d'appliquer une autre innovation qui permet une transparence des informations : la blockchain.

2. La blockchain : innovation systémique, moteur d'une transition majeure dans l'économie de l'information

Après avoir présenté l'économie circulaire et mentionné que la blockchain pouvait remédier à certains de ses effets-secondaire négatifs, cette section est consacrée au profil théorique de cette innovation. Par ce profil, nous mentionnerons son histoire et ses différentes facettes, nous établirons également un état des lieux de cette innovation et enfin nous énumérerons, comme pour l'économie circulaire, ses avantages et ses inconvénients.

2.1. Une histoire témoignant de la nature systémique de la blockchain

Fin 2008, une personne sous le pseudonyme de Satoshi Nakamoto, qui n'a toujours pas été identifiée, publie dans « The Cryptography Mailing List » un message selon lequel il a travaillé sur un système pair à pair de cash électronique sans tiers de confiance (Loignon, 2017). Il énumère ensuite les principales caractéristiques de ce système, dont l'impossibilité de la « double dépense »³, l'anonymat des utilisateurs (agissant sous un pseudonyme) et la décentralisation des transactions.

Le 9 janvier 2009, Satoshi Nakamoto annonce la première émission du système Bitcoin, le premier bloc est créé (Loignon, 2017). Cela a eu un impact important dans l'univers économique et numérique. L'univers numérique a été bouleversé dans le sens où les GAFAM ne pouvaient exercer aucune influence, car le Bitcoin fait partie de la sphère publique et non privée. L'univers économique a été transformé, car elle rendait possible des transactions instantanées, sécurisées et sans frais, sans passer par des intermédiaires tels que les banques ou les systèmes de paiement traditionnels, qui induisent des coûts supplémentaires. C'est à partir de là que la blockchain a commencé à gagner en notoriété.

Le projet de Satoshi Nakamoto était d'esprit libertarien, voulant couper court aux grandes puissances (les banques et les Etats notamment). De ce fait, il a fait en sorte de créer une crypto-monnaie décentralisée. Il a réussi, d'où le fait qu'il a permis la démocratisation du Bitcoin. Maintenant, comment il a réussi à maintenir le succès du Bitcoin ? Cela tient surtout grâce à l'algorithme en *proof-of-work* (PoW). Cet algorithme fonctionne comme incitation pour les

³ Un problème de « double dépense » surgit lorsqu'une même unité de monnaie numérique est dépensée deux fois au lieu d'une. C'est comme si une personne achète du pain à la boulangerie avec de la monnaie, qu'elle reprenne cette monnaie pour la redépenser dans un bureau de tabac pour acheter un jeu à gratter.

mineurs d'un bloc afin de sécuriser le réseau en échange d'une rémunération en crypto-monnaie. Donc plus le Bitcoin est prisé, plus il est sécurisé. Et c'est un des gros avantages du Bitcoin qui a également été attractif étant donné la confiance décroissante des individus en ces temps de crise.

En revanche, il serait faux d'établir un lien entre le Bitcoin (et le premier bloc) et la création de la crypto-monnaie. En effet, le Bitcoin n'était pas la première crypto-monnaie. Ce fut David Chaum, l'un des pionniers de la cryptographie, qui créa DigiCash en 1989, considéré plus tard comme un prototype de blockchain, avec sa crypto-monnaie, le « cyberbuck », selon le site Coin Academy. L'idée était de pouvoir envoyer anonymement des paiements sur la base de signatures électroniques, de manière centralisée mais en éloignant tout de même les grandes banques. Cependant, le projet DigiCash a fait faillite en 1998, mais il a été une source d'inspiration dans l'invention des blockchains et dans la création du Bitcoin.

Le terme officiel « blockchain » n'a vu le jour qu'en 2015 dans le whitepaper d'Ethereum, selon Coin Academy. Mais le processus d'élaboration a débuté lors de la seconde crise pétrolière des années 70 (figure 10), à une époque où la confiance des particuliers envers les institutions a commencé à s'estomper. La crise de 1979 n'est plus la seule raison justifiant une baisse de la confiance des individus envers les institutions. En effet, le Bitcoin a gagné en notoriété, notamment grâce (ou à cause) de la crise des *Subprimes*. En effet, le Bitcoin a été créé en 2009, en plein milieu de la crise financière où la confiance envers les institutions financières avait été violemment impactée. Ainsi, la nécessité des individus de se tourner vers la crypto-monnaie paraissait de moins en moins saugrenue. De plus, du côté de Satoshi, il était de plus en plus évident d'utiliser une monnaie alternative décentralisée, exempte de toute censure.

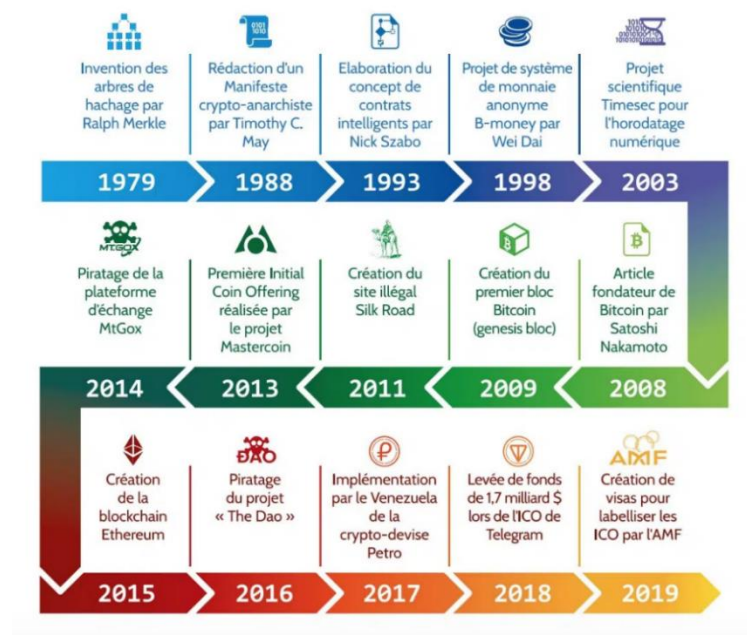


Figure 10 : Chronologie blockchain. **Source** : Coin Academy.

Qu'en est-il de la blockchain ? En réalité, sa notoriété et son développement suivent ceux du Bitcoin. Ce que les acteurs recherchent dans le Bitcoin, ils le trouvent en réalité dans la blockchain (anonymat, *peer-to-peer*, etc.). Par conséquent, de nombreux acteurs se sont emparés de cette technologie et ont décidé de l'utiliser à d'autres fins que le simple transfert de valeur. C'est pourquoi la blockchain s'est adaptée en fonction des besoins des créateurs de chaque projet.

Mais comment caractériser la blockchain du point de vue de l'économie de l'innovation ? Est-elle incrémentale, radicale ou systémique ? La réponse est : systémique. En effet, la blockchain est le fruit de la combinaison de plusieurs autres innovations, telles que l'Internet des objets (IoT) que nous aborderons plus loin. De plus, cette innovation a un impact systémique en modifiant la façon dont nous produisons, échangeons, nous informons, etc.

2.2. Les trois visages de la blockchain

À l'origine, la blockchain appartenait à la sphère publique, mais des blockchains privées existent également. Aujourd'hui, c'est la blockchain publique qui domine, avec Bitcoin et Ethereum qui figurent parmi les plus connus. Le choix de la nature de la blockchain dépend des concepteurs et de leurs objectifs. Si l'objectif est commercial, une blockchain privée sera privilégiée afin de préserver la confidentialité de certaines informations (Lasmoles et T. Diallo, 2022). En revanche, les administrations publiques n'ont pas de données très sensibles à

dissimuler. La caractéristique unique d'une blockchain publique, par rapport aux deux autres types, est qu'elle est ouverte à tous (un individu λ peut s'inscrire et participer à des transactions sur la blockchain Bitcoin, par exemple). Ainsi, il n'y a aucune restriction quant à la lecture des données, leur saisie et leur validation.

Une blockchain privée, par définition, n'est pas ouverte, donc seul un nombre limité d'utilisateurs peut y participer. De plus, parmi tous les membres d'une blockchain privée, tout le monde n'est pas autorisé à lire ou à saisir des données. En fait, seule une entité a le droit d'ajouter des données. De plus, les données ne sont pas validées (puisque seule une entité les ajoute), et aucun consensus n'est donc nécessaire. Ce type de blockchain est généralement utilisé par des entreprises (Lasmoles et T. Diallo, 2022). Par exemple, le site Cryptoast nous donne l'exemple de la blockchain privée utilisée par Facebook pour la circulation de sa monnaie Libra.

Il existe un dernier type de blockchain : la blockchain à consortium. Ce type de blockchain présente des caractéristiques que l'on retrouve à la fois dans une blockchain publique et une blockchain privée. En effet, l'accès en lecture peut être total ou restreint, et l'accès en écriture peut être gratuit ou réservé à certains individus (Lasmoles et T. Diallo, 2022). L'utilisation du terme "consortium" est justifiée par le fait qu'il ne s'agit pas d'une seule entreprise utilisant la blockchain, mais d'un consortium d'entreprises. Un exemple de ce type de blockchain est IBM Food Trust, un registre distribué permettant de retracer l'origine de certains produits alimentaires. Cette blockchain est utilisée par des entreprises telles que Walmart, Carrefour et Nestlé, selon Cryptoast.

2.3. Le déploiement de la blockchain aujourd'hui

Nous allons désormais faire l'état des lieux pour l'innovation blockchain à travers le cadre français, européen et mondial. Ensuite, nous mettrons en avant les différents défis que les utilisateurs et les concepteurs de blockchain devront faire face.

2.3.1. Au niveau français

Nous allons dresser dans un premier temps un état des lieux de la situation de la blockchain en France en caractérisant la phase dans laquelle elle se trouve. La filiale française du réseau

mondial de services professionnels PwC (PricewaterhouseCoopers) a mené une étude⁴ sur plus de 80 entreprises françaises sur leur adoption de la blockchain dans leur(s) activité(s). Parmi ces entreprises 43% sont des entreprises dites « traditionnelles » et le restant regroupe les « pure players de la blockchain⁵ ». L'échantillon d'entreprises regroupe tous les types d'entreprises : Start-ups, TPE, PME, ETI, grandes entreprises et entreprises cotées.

Cette étude montre dans un premier temps la datation du ou des projet(s) blockchain mené(s) par les entreprises (figure 11). Principalement, ce sont les années 2017 et 2018 qui ont été marqué par le lancement des recherches et de développement sur la blockchain, à la fois pour les entreprises dédiées à la blockchain et pour les entreprises non-dédiées, selon PwC.

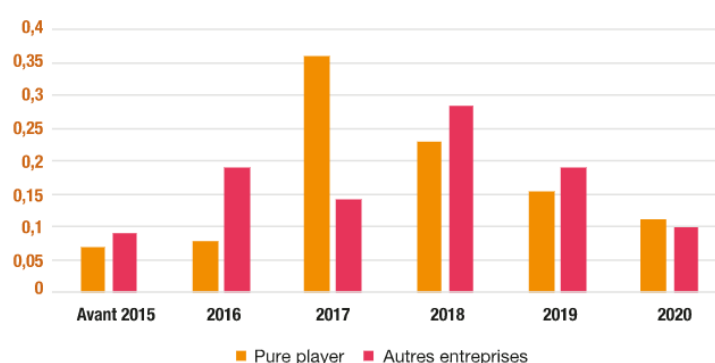


Figure 11 : Proportion d'entreprises lançant un projet blockchain selon l'année, en France (en pourcentage).

Lecture : 36% des pure players ont initié un projet blockchain en 2017, en France. **Source** : PwC France.

La technologie blockchain peut s'appliquer dans de nombreux secteurs d'activités. Reste à voir quel est le secteur d'activité le plus prisé par les utilisateurs et concepteurs de blockchain. La majorité (57%) des projets de blockchain des 80 entreprises françaises est axé sur le secteur de la finance (englobant les activités de banque, d'assurance et les fonds d'investissements), selon PwC. C'est le cas par exemple de Société Générale Forge, créée par Société Générale, qui est digitalise les actifs grâce à la blockchain. Selon PwC, Société Générale Forge a émis un emprunt obligataire d'environ 100 millions d'euros en 2019 sur Ethereum. Après le secteur financier, 24% des projets blockchains développés en France portent sur le secteur de la distribution et des biens de consommation. Les objectifs se tournent principalement autour de la traçabilité des produits et de l'optimisation des processus. C'est le cas de Walmart et

⁴ Voir ici pour plus de détails sur l'étude :

https://contenu.pwc.fr/download/2021/PwC_Etude_Blockchain_France_FR_2021.pdf

⁵ Une entreprise est dite « pure player de la blockchain » lorsque son ou ses activité(s) ne repose(nt) seulement que sur la blockchain. En général, ce sont des start-ups. Dans cette étude, 86% de ces entreprises ne sont composées que d'un maximum de 20 employés.

Carrefour qui utilise une blockchain à consortium pour retracer l'origine de certains de leurs produits.

D'ailleurs, en parlant de blockchain à consortium, il serait pertinent de se pencher vers la nature de blockchain privilégiée (figure 12). Selon PwC, les blockchains à consortium ont été souvent privilégiées de 2015 à 2018 car les entreprises voulaient un contrôle plus important sur l'information partagée et de limiter les coûts pour la création de projets conséquents. Mais depuis 2019, la blockchain publique a gagné en popularité. Chez les pure players, la blockchain privilégiée a toujours été la publique (75% des projets de 2015 à 2020), selon PwC. En 2020, les blockchains publiques sont majoritairement présentes dans les projets, toutes entreprises confondues.

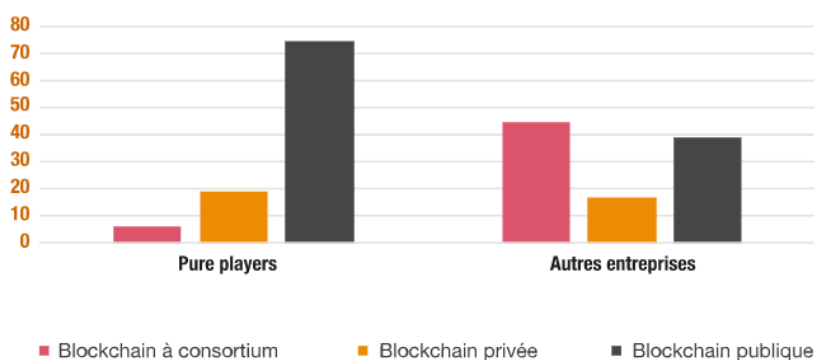


Figure 12 : Les types de blockchain privilégiés par les entreprises entre 2015 et 2020, en France (en pourcentage). **Lecture** : Entre 2015 et 2020, 19% des blockchains utilisées par les pure players étaient à consortium, en France. **Source** : PwC France.

L'étude s'est également interrogée sur le financement des projets blockchain, mais uniquement pour les entreprises non-dédiées à la blockchain. L'objectif est de faire une distinction entre les financements en fonction de la taille des entreprises (figure 13). Le niveau de financement détermine l'importance accordée à la blockchain au sein des entreprises. Les PME, TPE et ETI sont celles qui allouent le budget le plus faible aux projets blockchain : 50% des projets ont un budget inférieur à 50 000 euros entre 2015 et 2020, contrairement aux grandes entreprises et aux sociétés cotées qui allouent un budget environ 10 fois supérieur. En effet, les PME, TPE et ETI ont en moyenne fixé leur budget à plus de 1 million d'euros pour 47% de leurs projets, selon PwC. En moyenne, les PME, TPE et ETI ont alloué un budget de plus de 400 000 euros à leurs projets blockchain, tandis que les plus grandes entreprises l'ont fixé à moins de 645 000 euros entre 2015 et 2020 en France, ce qui représente une différence d'environ 60%. Du côté des pure players, 54% de leurs projets ont un budget d'au moins 500 000 euros, selon PwC.

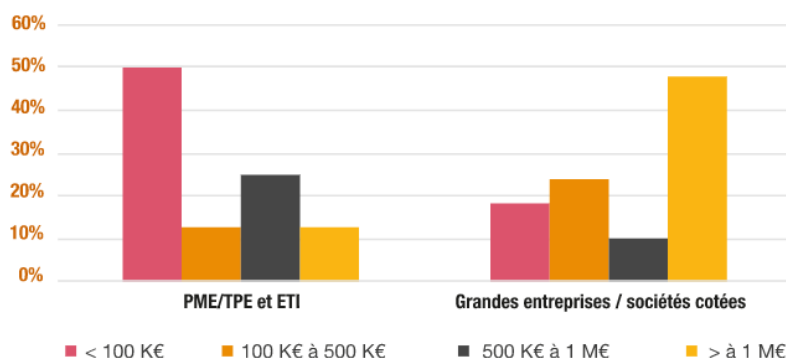


Figure 13 : Budget moyen des entreprises traditionnelles pour les projets blockchain selon la taille des entreprises, entre 2015 et 2020, en France. **Lecture :** Entre 2015 et 2020, les PME, les TPE et les ETI accordaient en moyenne un budget entre 100 000 € et 500 000 € pour 25% de leurs projets, en France. **Source :** PwC France.

La crise sanitaire de 2020 et 2021 a eu un impact sur les investissements dans de nombreux secteurs. Il est donc intéressant de voir si les plus de 80 entreprises interrogées ont également été affectées. Selon PwC, 63% des entreprises souhaitent maintenir leur budget pour leurs projets (dont 25% souhaitent l'augmenter) et seulement 19% veulent le réduire. Le développement et la réalisation d'un projet blockchain nécessitent une certaine formation sur les enjeux techniques liés à la blockchain. C'est pourquoi l'une des raisons de vouloir réduire le budget est le manque de connaissances en matière de blockchain. En effet, selon PwC, 56% des entreprises interrogées estiment que l'accès à la formation sur la blockchain est difficile. Cependant, parmi l'échantillon d'entreprises, 87% d'entre elles (91% des pure players et 77% des entreprises traditionnelles) anticipent positivement le développement de la technologie blockchain en France dans les années à venir, selon PwC.

De plus, il est également important de se poser la question de l'avancement des projets blockchain (figure 14). La transition vers la phase de commercialisation est plus rapide chez les pure players, dont moins de 70% des projets lancés entre 2015 et 2020 en France sont en phase de commercialisation. Les entreprises traditionnelles ont plus de difficultés à faire progresser leurs recherches, ce qui explique pourquoi leurs projets sont plus souvent abandonnés. De plus, seulement un petit nombre de projets ont été arrêtés, ce qui témoigne d'une nouvelle dynamique au sein des entreprises.

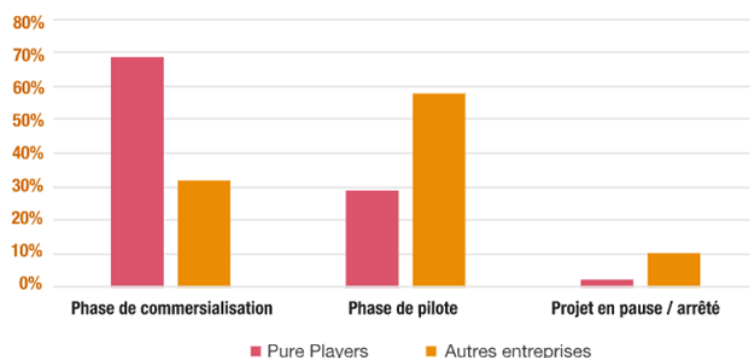


Figure 14 : Stade d'avancement des projets blockchain des 80 entreprises entre 2015 et 2020, en France.
Lecture : 10% des projets des entreprises françaises lancés entre 2015 et 2020 sont en pause ou à l'arrêt. **Source** : PwC France.

Pour conclure, l'étude, à travers l'échantillon d'entreprises, montre que la blockchain gagne en popularité en France et se développe de plus en plus, surtout dans le secteur de la finance où la blockchain publique est largement utilisée (Bitcoin, Ethereum). Le financement des projets blockchain est en phase avec la réalité numérique, étant donné que la plupart des entreprises souhaitent maintenir ou augmenter le financement déjà assez élevé de leurs projets, et la crise sanitaire n'a pas freiné leurs efforts de financement.

2.3.2. Un retard européen sur le monde en matière de blockchain

L'European Investment Bank (EIB) a mené une étude sur le déploiement de l'intelligence artificielle (IA) et de la blockchain en s'appuyant sur un échantillon de 6 570 PME réparties dans l'UE27 (1 232), les États-Unis (2 995), la Chine (1 418), le Royaume-Uni (495), le Canada (235) et le Japon (105).

L'étude montre que le plus grand nombre de PME utilisant la blockchain se trouve aux États-Unis, en Chine et dans l'UE, avec respectivement 542, 407 et 242 entreprises en avril 2020, selon l'EIB. Au sein de l'UE, on trouve le plus grand nombre de blockchains dans le sud de l'Europe et en Allemagne (et en Autriche).

Les investissements en capital-risque⁶ dans l'IA et la blockchain ont considérablement augmenté dans le monde depuis 2014, passant de 4 à 30 milliards de dollars en 2019, soit une augmentation de 650 %, selon l'EIB. Les États-Unis et la Chine ont toujours été en tête. L'UE est loin derrière, avec un investissement d'environ 2 milliards de dollars en 2019 (soit 7 % du

⁶ Un investissement en capital-risque consiste à placer des fonds dans une entreprise en échange d'une part de l'entreprise appartenant à l'investisseur. Cet investissement peut prendre la forme d'investissements en actions, d'obligations convertibles, de prêts participatifs et d'options d'achat d'actions.

total mondial), alors qu'en 2016, il était d'environ 300 millions de dollars (soit 3 % du total mondial), selon l'EIB.

Entre 2017 et 2018, l'investissement mondial a été principalement tiré par une multiplication par deux des investissements en Chine (6 milliards de dollars en 2017 et 12 milliards en 2018). Les États-Unis ont suivi la même tendance, mais sur la période 2016-2018. De 2018 à 2019, les investissements ont augmenté d'environ 45 % aux États-Unis et de 140 % dans l'UE (passant de 0,9 milliard de dollars à 2,16 milliards de dollars), selon l'EIB.

En 2019, environ 3 milliards de dollars ont été investis dans les PME de la blockchain dans les six régions cibles. Ces investissements dans la blockchain ont atteint leur maximum en 2018 (4 milliards de dollars) mais ont ensuite diminué en 2019 (3 milliards de dollars), ce qui peut s'expliquer par la baisse de la valeur des crypto-monnaies en 2018, selon l'EIB.

Les entreprises Circle et Kik sont les leaders dans le domaine de la blockchain, suivies de loin par Coinbase, en termes de financement accumulé par capital-risque privé. En effet, selon Statista, Coinbase a levé des fonds d'un montant de 2,12 milliards d'euros entre 2010 et 2017, tandis que Circle et Kik ont respectivement collecté 1,15 milliard et 1,02 milliard d'euros de financement. Ces entreprises sont américaines, à l'exception de Kik qui est canadienne.

Maintenant, il serait intéressant de voir à quelles étapes du cycle de financement intervient le financement (figure 15). Aux États-Unis et en Chine, environ 50 % des investissements étaient consacrés à l'étape de croissance et environ 47 % à l'étape de l'introduction. En revanche, c'est l'UE qui présente la proportion la plus élevée d'investissements au stade de développement, avec environ 10 % du total, selon l'EIB. Cela s'explique par le fait que l'UE compte une proportion plus élevée de PME en phase de développement par rapport aux autres pays. À l'inverse, les États-Unis et la Chine se concentrent davantage sur les entreprises plus matures.

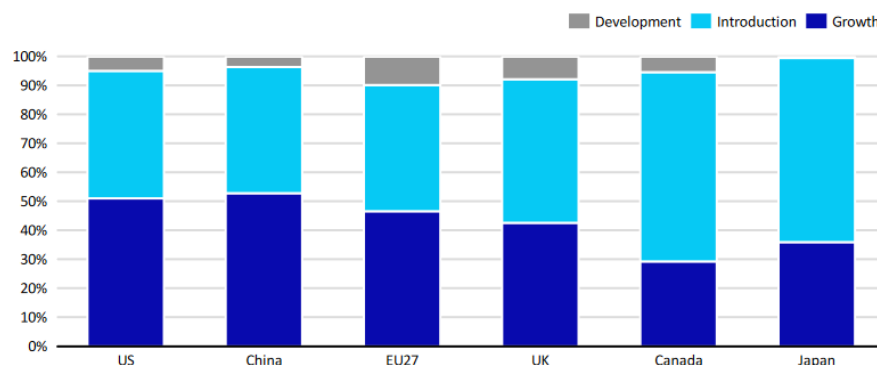


Figure 15 : Estimation des investissements en capital-risque dans les PME de l'IA et de la blockchain par étape du cycle de vie du financement, en 2019. **Lecture** : 50% des investissements en capital-risque des Etats-Unis étaient consacrés à l'étape de croissance, en 2019. **Source** : EIB.

Au sein de l'UE, ce sont l'Allemagne & l'Autriche et la France qui ont le plus massivement investi en capital-risque (plus de 70 % du total). Les investissements combinés du reste de l'UE s'équivalent à peu près aux investissements français (figure 16).

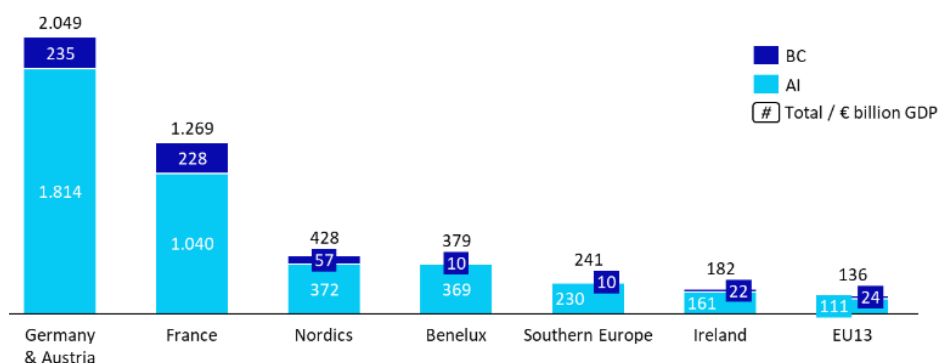


Figure 16 : Estimation des investissements en capital-risque dans les PME de l'IA et de la blockchain par région de l'UE, entre 2010 et 2019. **Lecture** : Entre 2010 et 2019, en France, 228 milliards d'euros ont été investis dans les PME de blockchain. **Source** : EIB.

Au niveau des politiques publiques, des programmes européens ont été planifiés pour l'IA et la blockchain. La Commission européenne prévoit de subventionner et de garantir les activités liées à l'IA et à la blockchain dans plusieurs programmes du prochain budget à long terme de l'UE (2021-2027). Nous pouvons donner 3 exemples de programmes grâce à l'étude de l'EIB. D'abord, le programme Europe Numérique qui vise à renforcer les capacités numériques stratégiques de l'UE, avec un budget prévu de 8,2 milliards d'euros selon l'EIB. Ensuite, le programme Horizon Europe qui succède à Horizon 2020 et qui mobilisera 95 milliards d'euros pour renforcer l'accent mis sur l'IA et la blockchain. Enfin, le programme InvestEU qui financera à hauteur de 75 milliards d'euros les projets d'investissement visant à soutenir les transitions numériques et vertes à long terme.

Cependant, l'UE prend du retard dans le déploiement d'innovations liées à l'IA et à la blockchain. Le développement de ces innovations joue un rôle fondamental dans la stratégie de transition numérique de l'UE et dans le renforcement de sa souveraineté. Selon l'EIB, l'UE doit investir 10 milliards d'euros pour conserver sa compétitivité aux côtés des superpuissances états-unienne et chinoise.

2.3.3. La course à l'innovation : un chemin semé d'embûches

D'abord, nous avons vu que les investissements européens sont fragiles face aux deux superpuissances. Il existerait une solution pour l'Europe : le Royaume-Uni, car c'est le pays où l'on trouverait plus facilement des fonds pour des projets blockchain (Loignon, 2017) grâce à une politique gouvernementale visant à attirer sur son territoire les projets blockchain.

Ensuite, la recherche constitue un pilier fondamental de la course à l'innovation. En effet, dès 2013 aux États-Unis, des cours ont été mis en ligne pour former sur la blockchain (Loignon, 2017), comme c'est le cas à l'université de Princeton. À Londres, un centre de recherche sur les cryptodevises a été ouvert à l'Imperial College et début 2016, le gouvernement anglais a appelé ses chercheurs à s'investir dans la blockchain pour prévoir son expansion, fournir des opérations hautement performantes avec de faibles délais de latence adaptés au domaine dans lequel la technologie est appliquée, tout en ayant un faible impact énergétique (Loignon, 2017).

Enfin, la réglementation est le dernier pilier de la course à l'innovation blockchain. Cependant, étant donné la jeunesse de cette technologie, la réglementation n'est pas forcément en mesure de bien encadrer toutes les activités. C'est l'un des défis auxquels les pays sont confrontés : établir un cadre réglementaire tout en veillant à ne pas freiner l'innovation. Les pays ne sont pas nécessairement incités à réglementer cette innovation, car d'un côté, il n'y a aucune raison pour que la blockchain ne soit pas réglementée, mais de l'autre, elle est source de création de valeur et il serait dommage de mettre des bâtons dans les roues avec une réglementation inadaptée. Pour l'instant, il n'y a pas de solution unique, il faut donc rester prudent et attentif au contexte. En attendant, le droit classique s'applique, mais reste flou quant aux moyens d'application (Loignon, 2017). En effet, faut-il considérer les cryptomonnaies comme des monnaies pouvant être taxées ? Quelle est la valeur des preuves enregistrées sur la blockchain ? Qui est responsable en cas de litige ? Quels contrôles mettre en place pour lutter contre la fraude ? La question de la réglementation internationale se pose également. Selon les experts du Government Office for Science anglais, une solution intéressante serait d'intervenir

non pas dans la loi, mais dans le code : le code et/ou les logiciels peuvent provenir et être supervisés par les pouvoirs publics (Loignon, 2017).

Ce n'est pas tout, les pays sont confrontés à d'autres défis techniques et environnementaux en matière de blockchain. Nous allons les présenter sommairement, car ces défis font référence aux inconvénients de la blockchain que nous aborderons un peu plus tard.

Le premier défi technique est d'améliorer la rapidité de la blockchain. La plus connue et la plus grande est celle du Bitcoin avec des blocs limités à 1 Mo et une latence élevée. Des solutions existent : faire des « sidechains » : des blockchains autonomes mais connectées à la blockchain principale et/ou adopter une méthode de validation des transactions plus facilement (Loignon, 2017).

Le deuxième défi technique est celui de l'arbitrage entre la confidentialité et la transparence. Pour beaucoup d'entreprises, l'usage de pseudonymes est insuffisant, car si un concurrent arrive à démasquer leur véritable identité, il pourrait retracer leur historique de transactions. Des solutions existent également pour corriger ce problème : changer de pseudonyme régulièrement ou déplacer certaines transactions vers des « sidechains » privées pour que les informations n'apparaissent pas dans la blockchain publique. Une autre solution plus radicale est d'utiliser une blockchain privée (Loignon, 2017).

Le dernier défi technique est celui de la sécurité. Puisque la blockchain est décentralisée, tout repose sur la confiance des utilisateurs. En effet, si une plateforme numérique enregistre leurs données, les utilisateurs s'exposent au risque que des hackers piratent la plateforme pour récupérer leurs données. Le Bitcoin, par exemple, est basé sur un code Turing complet qui offre des opportunités commerciales grâce à l'automatisation des transactions, mais cela ouvre la voie à d'éventuels piratages : écrire un smart contract pour détourner de l'argent à l'infini (Loignon, 2017).

Le défi environnemental consiste pour les concepteurs de blockchain à concevoir des blockchains plus économes en énergie. L'algorithme de consensus utilisé par Bitcoin, le PoW, est très énergivore. La raison en est que cet algorithme fonctionne sur le principe que les mineurs d'un réseau sont en concurrence pour résoudre un problème mathématique complexe afin de vérifier l'authenticité de la clé privée du signataire d'une transaction. L'intérêt est que le mineur qui parvient à résoudre le problème mathématique reçoit une récompense sous forme de Bitcoin. Cela nécessite du matériel informatique puissant qui consomme beaucoup d'énergie.

Il faut trouver une autre méthode de vérification plus économe. C'est le cas d'Ethereum, qui utilise le *proof-of-stake* (PoS) sur une partie de sa blockchain.

Pour conclure, la blockchain est de plus en plus adoptée dans le monde, dans différents secteurs (surtout la finance), mais pas partout de la même manière : les États-Unis et la Chine dominant largement depuis le début, avec des investissements massifs, tandis que l'UE peine à suivre. Pour rester dans la course à l'innovation, de nombreux défis doivent être pris en compte : l'investissement, la recherche, la réglementation, la technique et l'environnement. Malgré ces défis de taille, l'innovation poursuit son développement pas à pas.

2.4. Les forces et les faiblesses de la blockchain

La blockchain est une innovation qui possède ses atouts, qui attirent d'ailleurs l'œil est fait l'objet de nombreuses convoitises (qu'elles soient bienveillantes ou non). Mais, comme toute innovation, elle présente des nombreux inconvénients.

2.4.1. Son potentiel explicatif d'un engouement de grande ampleur

La blockchain jouit d'une bonne réputation, notamment grâce à ses caractéristiques. Ici, nous allons nous concentrer sur les blockchains publiques. Le principal avantage est la décentralisation. En effet, les transactions se font de pair à pair, sans intermédiaire et donc sans pouvoir central (Kazempour et Pinson, 2021). La validité des transactions est assurée par les membres d'un même réseau, et non par un seul individu chargé de tout vérifier lui-même. Un autre avantage technique de la décentralisation est sa résistance à un point de défaillance unique, c'est-à-dire que si une partie du système est défaillante, cela n'empêche pas le bon fonctionnement de la blockchain (Wang *et al.*, 2022). De plus, l'élimination d'un intermédiaire permet de réduire les coûts de transaction et d'améliorer l'efficacité des échanges.

Un autre avantage est la transparence, qui découle de la décentralisation. Toutes les données de la blockchain sont disponibles librement pour les membres d'un bloc. De même, en ce qui concerne les contrats intelligents, toutes les modifications, ajouts ou suppressions de règles à l'intérieur de ces contrats sont connues de tous. Cela contribue à prévenir les actes frauduleux de certains groupes lors des transactions (Parvizimosaed *et al.*, 2021).

Comme la décentralisation implique que les utilisateurs valident mutuellement les transactions, la confiance est un élément primordial pour que la blockchain atteigne un tel niveau de notoriété. La traçabilité et l'immutabilité des transactions peuvent contribuer à établir

cette confiance (Wen *et al.*, 2021). En effet, les données de la blockchain sont distribuées (sous forme de copies) à différents endroits. La structure correspond à une chaîne de données où les anciens blocs (avec les données associées) peuvent être retracés grâce à l'historique des données (Ma *et al.*, 2020). Dans les cas très rares de modification des données, ces modifications se propageraient à toutes les copies. Un autre avantage de la blockchain est donc l'authenticité des données (Wang *et al.*, 2022). Pour qu'une donnée soit modifiée, il faut obtenir un certain nombre de permissions qui ne sont pas toujours faciles à obtenir. Parenthèse fermée, mais néanmoins très importante, revenons à la transparence. Elle est un atout de la blockchain, car pour qu'une corruption soit possible, il faudrait avoir accès à toutes les copies. Étant donné que cela est très difficile, voire impossible, pour quelqu'un de modifier une donnée (et donc la donnée copiée à X endroits différents), une tentative de corruption serait théoriquement vaine. Cela crédibilise donc la sécurité de la blockchain et justifie la confiance qui lui est accordée (Evermann et Kim, 2021).

La blockchain assure la sécurité des données, mais assure également la sécurité des utilisateurs. Cela passe par le respect de leur confidentialité. En effet, ils ne sont pas représentés par leur nom, prénom, âge, etc., mais par leur adresse de compte (Béres *et al.*, 2020). Grâce à cela, ils sont protégés contre la divulgation de leur vie privée, ce qui renforce la fiabilité et donc la crédibilité de la blockchain.

Un dernier avantage de la blockchain est qu'elle permet d'automatiser les *smart contracts* et les transactions. C'est une bonne chose car cela prévient non seulement les erreurs lors des exécutions manuelles, mais aussi les tentatives malveillantes. De plus, l'automatisation permet de gagner du temps et d'augmenter l'efficacité des échanges (en réalisant davantage en moins de temps) grâce aux *smart contracts* (Wang *et al.*, 2022).

2.4.2. Les faces les plus sombres de la blockchain

D'abord, la décentralisation de la blockchain engendre des coûts énergétiques et de stockage non négligeables. Pour ce qui est des coûts énergétiques, nous en parlerons plus tard lorsque le sujet s'y prêtera davantage. En revanche, les coûts de stockage peuvent être abordés ici. Il est vrai qu'une des caractéristiques de la blockchain est la transparence, et cela implique que tous les membres d'un nœud possèdent la même copie du livre (ledger). Or, cela représente une quantité de données qui se multiplie avec le nombre de nœuds. Il faut donc stocker toutes ces données, ce qui constitue une limite de la blockchain : le stockage des données. En reprenant

l'exemple de Bitcoin, en juin 2020, plus de 285 Go de données ont été stockées dans la blockchain, selon Statista. Et la quantité de données qui devra être stockée augmentera d'autant plus que la blockchain Bitcoin sera utilisée (ce cas peut être généralisé à toutes les cryptomonnaies). Une solution serait de déployer des nœuds légers qui ne stockeraient pas la totalité des données, mais seulement une partie. Un avantage serait que les projets blockchain seraient plus faciles à réaliser. Mais cela poserait un problème en contrepartie : ces nœuds seraient plus vulnérables aux attaques (Abe, 2019).

Ensuite, la blockchain fait face à des problèmes de faible débit et de latence élevée. En effet, en comparant Bitcoin et Visa, le premier réalise 7 transactions par seconde et nécessite 10 minutes pour compléter une transaction (Croman *et al.*, 2016). Contrairement à Visa, qui est le plus grand système de paiement centralisé du monde et qui réalise 30 000 transactions par seconde (Wang *et al.*, 2022). Cela représente donc une limite par rapport à un système centralisé.

Ces problèmes ont plusieurs origines. Pour rappel, les transactions via la blockchain se font à partir d'un consensus. Or, les résultats de ces consensus peuvent être incohérents, car il suffit que des requêtes provenant d'ordinateurs différents soient contradictoires pour perturber le système dans d'autres nœuds. Pour résoudre cela, il existe le système de preuve de travail (PoW), qui prend à la fois beaucoup de temps (environ 10 minutes (Vukolić *et al.*, 2016)) et d'énergie. La vitesse des requêtes est également un problème. La comparaison entre Bitcoin et Visa est éloquente, et Ethereum n'est pas meilleur que son homologue dans ce domaine. Il est au moins 80 fois plus lent que le système de gestion de base de données MySQL (Wang *et al.*, 2022). La raison en est la structure de données en chaîne ordonnée de la blockchain : pour valider les enregistrements (transactions), il faut que les nœuds parcourent tous les enregistrements de la chaîne de blocs. Le coût en temps sera d'autant plus élevé que la blockchain s'agrandira.

Une des origines tient au fait que les blocs ont une taille limitée, et si la taille du système augmente (ce qui sera très probablement le cas plus tard), toutes les demandes (requêtes) ne pourront pas être traitées. Cela s'explique par le fait que la vitesse de soumission des requêtes est supérieure à la vitesse de création des blocs. Ainsi, du côté des individus qui soumettent une ou plusieurs requêtes, la latence est d'autant plus élevée. Cela peut générer des saturations au niveau des serveurs (trop de demandes par rapport aux capacités), voire un déni de service ou un crash (Saad *et al.*, 2019). La solution la plus logique à ce problème serait d'augmenter la

taille des blocs. Cependant, le problème réside dans la création des blocs ainsi que leur propagation. En réalité, le problème de temps ne ferait que se déplacer, car les blocs plus grands prennent plus de temps à se former et à se propager (Göbel et Krzesinski, 2017).

En outre, la blockchain peut manquer d'évolutivité. L'évolutivité d'une blockchain dépend de sa capacité à s'adapter à une augmentation de la charge de travail et de la quantité de données qu'elle doit gérer. Une blockchain est d'autant plus évolutive qu'elle parvient à s'adapter à l'augmentation de la quantité de données à traiter, du nombre d'utilisateurs et/ou des serveurs, tout en maintenant son niveau de performance et de sécurité (Weinstock et Goodenough, 2006).

Une autre limite très importante réside dans les risques liés à la sécurité des systèmes. Il est vrai que les avantages de la blockchain en font un système d'information très sécurisé, promettant notamment l'anonymat de ses membres et l'immutabilité des données, entre autres. Cependant, la possibilité de cyberattaques n'est pas exclue. Il existe plusieurs types de cyberattaques, tels que l'exploitation minière égoïste (Bai *et al.*, 2018), l'attaque par retenue (Quin *et al.*, 2020), l'attaque par l'équilibre ou encore l'attaque des 51%⁷ (Sayeed et Marco-Gisbert, 2019). En juillet 2022, Ethereum Classic (ETC) a d'ailleurs été victime d'une attaque des 51 %, au cours de laquelle l'attaquant a dépensé plus de 800 000 ETC, soit une valeur d'environ 5,5 millions de dollars, selon le site Decrypt. Le pirate n'a dépensé que 200 000 \$ pour obtenir la puissance de hachage⁸ suffisante (au moins 51%).

Il est également vrai que la blockchain repose sur la transparence, en plus de la confidentialité des membres. À première vue, ce sont d'excellents points, jusqu'au moment où une contradiction se forme entre les deux. Pour garantir la confidentialité des individus, leurs comptes sont protégés par des clés privées et des adresses, et non par des informations classiques telles que le nom, le prénom, l'adresse électronique, etc. (Béres *et al.*, 2020). Cependant, si ces informations nécessaires venaient à être oubliées, les individus perdraient définitivement tous leurs accès. En ce qui concerne la transparence, certains systèmes de blockchain, dans le but d'atteindre un très haut niveau de transparence pour attirer les

⁷ Une attaque des 51% signifie qu'un attaquant contrôle au moins 51% de la puissance de calcul du réseau. Dans ce cas, il peut invalider et modifier des transactions. Cela peut entraîner de lourdes conséquences sur l'intégrité de la blockchain et la confiance des utilisateurs.

⁸ La puissance de hachage décrit la mesure de la capacité d'un mineur à résoudre des problèmes mathématiques complexes pour ajouter de nouveaux blocs et valider les transactions. Pour augmenter cette puissance de hachage, les mineurs peuvent utiliser des ordinateurs spéciaux ou en louant de la puissance sur des plateformes de cloud mining.

utilisateurs, ne se soucient pas particulièrement d'offrir un niveau élevé de confidentialité (Wang *et al.*, 2022). Au contraire, le niveau de confidentialité le plus bas leur suffit. Par conséquent, si une personne corrèle les données d'un utilisateur, elle peut ainsi obtenir ses informations.

Enfin, la blockchain suscite la confiance chez les utilisateurs, notamment grâce à ces caractéristiques bien connues ici. Mais elle n'intervient pas dans le monde réel. Dans le cas de la traçabilité des produits, l'authenticité des données concernant le processus de production etc. avant leur enregistrement n'est pas garantie. La blockchain garantit ce que l'on enregistre, donc si l'on enregistre de mauvaises informations (intentionnellement ou non), ce sont ces informations qui seront « protégées » (Wang *et al.*, 2022). En plus de ça, étant donné la confidentialité des utilisateurs, ceux qui signes des *smart contracts* ne sont pas forcément responsable dans le monde réel (Wang *et al.*, 2022).

Ces limites font surgir plusieurs choses. D'abord, un paradoxe selon lequel la blockchain promet une amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'énergie, mais cette promesse est contrebalancée par l'algorithme de consensus de la *PoW* qui est très énergivore et qui est le plus populaire. En outre, les ressources et des calculs limités en termes de stockage sont un obstacle à la mise en place d'une blockchain énergétique. Si des nœuds légers sont utilisés, il sera nécessaire de déployer des sécurités supplémentaires. En fait, il faudra faire un arbitrage selon les besoins et le but du déploiement d'une blockchain. La blockchain est fondamentalement décentralisée, cependant, plus les systèmes sont décentralisés, plus leurs performances en seront impactées ne serait-ce qu'en temps et en énergie (avec le consensus en *PoW* se développe en même temps que les blockchains). Les blockchains énergétiques peuvent ne pas remplir les hauts critères en temps réel des contrôles et des diagnostics, car parfois, en cas d'urgence, il est nécessaire qu'elles apportent une réponse extrêmement rapide. Si la décentralisation vient à être très importante, cela ne pourrait pas se faire aisément. En fait, tout part de la décentralisation car si l'on veut améliorer l'extensibilité et la cohérence d'un système, cela ne peut que se faire qu'en réduisant sa décentralisation. Pourquoi ? En se concentrant sur l'extensibilité des blockchains, nous pouvons dire que cela provient de l'implication de la décentralisation : le consensus. Il se forme à partir des choix des individus concernés, mais cela révèle parfois d'un problème de synchronisation entre eux, problème difficilement solvable dans un système qui ne possède pas « d'unité de contrôle » (pouvoir centralisé). Choisir le mécanisme de consensus

le plus approprié et trouver un équilibre entre décentralisation, cohérence et évolutivité devient un sérieux défi pour les concepteurs de systèmes.

Ainsi, pour chaque système et objectif associé, il est essentiel de trouver un équilibre entre le degré de décentralisation nécessaire et les exigences nécessaires pour atteindre l'objectif souhaité. Ce compromis peut être complexe et doit être évalué pour s'assurer que les avantages de la décentralisation ne se font pas au détriment de l'efficacité du système.

2.5. Blockchain et Big Data : Bonnie and Cloud

Il est vrai que la blockchain présente des inconvénients, cependant, il est possible d'au moins atténuer certains d'entre eux si cette technologie était combinée à celle du Big Data. D'ailleurs les avantages de la blockchain peuvent combler certains inconvénients du Big Data. De plus, la blockchain est une technologie qui permet la transmission d'informations. Mais ces informations sont sous forme de données. De ce fait, combiner la puissance de cette technologie avec celle du Big Data semble correspondre à une complémentarité intelligente. Il ne suffit pas d'échanger des données (peu importe la forme), il faut aussi les sécuriser et les analyser de manière efficace (voire efficiente) et potentiellement générer des revenus supplémentaires.

Comme annoncé précédemment, les deux technologies peuvent fonctionner collectivement pour analyser les données. Le site d'actualité Lebigdata.fr énumère un certain nombre de complémentarités entre ces deux technologies.

D'abord, la blockchain facilite les transactions monétaires d'une part mais limite la potentielle fraude associée aux transactions classiques d'autre part. Le Big Data a un pouvoir c'est de détecter les transactions risquées par des analyses voire même détecter les fraudes en temps réel. De cette optique, la combinaison des deux technologies pourrait perfectionner la sécurité des transactions à un très haut niveau, voire au niveau maximum.

Ensuite, leur complémentarité tient également à des opportunités financières. Effectivement, de nombreux Data Analysts utilisent les données des blockchain monétaires (Bitcoin, etc.) pour à la fois prédire leurs cours mais aussi faire le lien entre ces cours et les événements réels. Du côté de l'apport de la blockchain au Big Data, les utilisateurs peuvent prendre le contrôle de leurs données personnels et ainsi possiblement les monétiser auprès des entreprises. Pour cela, les utilisateurs peuvent accorder l'accès à certaines (ou toutes) de leurs données personnelles en échange de réduction sur des produits ou des services. Ce genre d'échange pourrait potentiellement créer un marché dans lequel les particuliers utiliseront leurs données

personnelles comme monnaie d'échange pour les entreprises. La blockchain dans ce cas ne résout pas un inconvénient du Big Data, mais apporte plutôt quelque chose en supplément.

Voilà maintenant des aspects de ces deux technologies qui sont extrêmement important : la sécurité et la confidentialité des informations. Le Big Data traite d'une très grande quantité de données venant de sources variées. Ces données personnelles peuvent être à caractère personnel, d'où la nécessité d'une protection. La blockchain permet cette sécurité car une information enregistrée dans un bloc, des permissions sont requises pour y accéder. Ces permissions font que le transfert de données se fait avec d'autant plus de sécurité. En outre, le Big Data est confronté au problème de confidentialité des données. En effet, le Big Data conserve les données dans le cloud et c'est le cloud qui valide les données, ce qui en fait un système centralisé. La blockchain peut utiliser son pouvoir de décentralisation pour supprimer cette tierce personne de confiance. Ce sont des personnes anonymes qui valident les informations anonymement (ils ne savent pas pour qui ils les valident) et à faible coût. Le Big Data peut faire en sorte d'assurer la confidentialité des données, mais la blockchain peut le faire d'autant plus efficacement.

Pour conclure cette section, la blockchain est une innovation qui a beaucoup de potentiel mais également des failles. Ce qu'il reste à savoir maintenant c'est de replacer l'évolution de la blockchain ainsi que de l'économie circulaire dans le contexte actuel et, en cela, dresser un tableau théorique de ce que pourrait résulter de leur combinaison, tout en prendre en compte l'Environnement dans lequel ces innovations évoluent.

3. Blockchain et économie circulaire : analyse des avantages et défis d'une synergie innovante pour la transition écologique

Maintenant que les profils théoriques ont été dressé pour les deux innovations, il est temps d'analyser les bons comme les mauvais côtés de cette synergie. Mais avant cela, nous allons passer en revue les pressions auxquelles sont confrontées la l'économie circulaire et la blockchain.

3.1. Des innovations victimes de pressions

L'économie circulaire, bien que généralement de plus en plus acceptée, doit faire face à des pressions qui rend plus difficile son intégration dans le marché. Une première pression à laquelle l'économie circulaire est confrontée c'est la consommation des ressources naturelles et de leur utilisation en Europe (Tukker *et al.*, 2016). En effet, les auteurs ont analysé l'empreinte environnementale et les ressources de l'Europe par rapport à celles du reste du monde. Ils en ont conclu que l'Europe est confrontée à une insuffisance de ressources en termes de disponibilité et de qualité. Ainsi, elle est souvent contrainte d'importer des matières premières et des produits finis d'autres régions du monde : déficit structurel en ressources naturelles, car elle consomme plus de ressources qu'elle n'en produit et exporte. Ce déficit correspond à une pression venant de la nature même car l'économie circulaire repose sur l'utilisation de matières premières renouvelables et recyclées. C'est pour cela que les auteurs recommandent fortement la mise en place de politiques et de stratégies pour réduire la consommation des ressources dans le même temps que de faire un meilleur usage des ressources naturelles, malgré les efforts européens déjà observables.

Une autre pression que subit l'économie circulaire c'est la diversité des définitions et des conceptualisations et des approches théoriques adoptées, dans le monde (Kirchherr *et al.*, 2017). Les auteurs ont examiné 114 définitions différentes qui ne mentionnent pas toujours la même chose (tableau 1). De plus certains aspects de l'économie circulaire évoluent dans les sens contraire (c'est le cas par exemple de la réduction des déchets et de la réutilisation). En cela, des politiques et des stratégies cohérentes en matière d'économie circulaire dans un contexte international dans lequel les réglementations varient considérablement d'un pays à l'autre (via les différences de conceptualisations) sont difficilement mise en place. En plus de cela, si les définitions et conceptualisations modifient leur priorité (cadre instable), c'est d'autant plus

difficile de prendre des décisions fixes, voire impossible, à moins que les décisions soient revues régulièrement.

Mention dans l'échantillon (en%)	Avant 2012	A partir de 2012
Réduction des déchets	71	48-49
Réutilisation	71-74	75-76
Recyclage	90-94	73-75
Revalorisation	10	6-7

Tableau 1 : Mention des codes pour les 114 définitions pour la période d'avant 2012 et la période de 2012 et après. **Lecture :** Avant 2012, entre 90 et 94% des 114 définitions de l'économie circulaire mentionnait le recyclage des déchets. **Source :** Kirchherret J. *et al.* Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 127, 221-232.

Avec l'émergence de l'économie circulaire, le modèle de production et de gestion des déchets traditionnel est remis en cause : modèle circulaire *versus* modèle linéaire : produire-consommer-éliminer (Geissdoerfer *et al.*, 2017). Les auteurs expliquent que c'est une pression venant des entreprises car elles doivent revoir les processus dont elles conçoivent, produisent et distribuent les produits, ainsi que dans la manière dont les consommateurs achètent et utilisent ces produits. La transition vers un modèle circulaire nécessite des méthodes différentes de coordination et de collaboration entre les différents acteurs de la chaîne de valeur, ce qui constitue un vrai défi. Les auteurs mentionnent également qu'un manque de connaissance et de compréhension se font ressentir quant à l'économie circulaire. De plus, les barrières réglementaires et économiques n'incitent pas forcément les entreprises revoir leur modèle : trop de contrainte (cf. 4.1. du chapitre 1^{er}) et d'investissements à prévoir.

En effet, à court terme, le passage du modèle linéaire au modèle circulaire pour une entreprise implique de lourds investissements. Parmi ces investissements, nous pouvons compter les investissements dans de nouvelles technologies et infrastructures, les coûts de formation des employés et la recherche/recrutement de profils intéressants pour ce modèle, les coûts de conformité réglementaire, les coûts de conception de produits pour les rendre plus durables, recyclables ou réutilisables, et enfin les coûts de communication et de marketing.

Les lobbies également sont une source de pression. Ils tentent d'influencer les débats lors des constructions de loi en faveur de l'économie circulaire. Une des raisons tient aux taxes que subissent les entreprises si elles affichent des résultats médiocres en termes de recyclage. Mais

une solution proposée est de faire passer les projets de loi par ordonnancement⁹, pour éviter que les lobbies n'influencent les débats parlementaires, selon Banque des Territoires.

La blockchain subit elle aussi de nombreuses pressions qui sont de nature réglementaire, techniques et sociales. En effet, comme nous le préciserons plus tard (cf. 4.1.2 du chapitre 1^{er}), la blockchain baigne dans un flou juridique. Elle est en phase d'assimilation par les pouvoirs publics. Autrement dit, ils cherchent encore à comprendre la blockchain pour pouvoir ensuite la réglementer, ce qui peut être un frein à son développement. D'ailleurs, plusieurs pays ont réglementé la blockchain en limitant, voire en interdisant la circulation de cryptomonnaie. C'est le cas de l'Algérie, du Maroc ou de la Tunisie qui ont banni l'utilisation de cryptomonnaie au sein de leur territoire, selon le site Cryptoast.

Une autre pression tient à la technique. Nous avons mentionné dans la partie 2.4.2 de ce chapitre que la blockchain devait faire face à des problèmes d'évolutivité. Cela peut limiter l'application de la blockchain et surtout de son développement, dans le sens où une augmentation du nombre d'utilisateurs peut entraîner des temps de traitement plus longs et des coûts de transaction plus élevés (Weinstock et Goodenough, 2006).

Enfin, deux pressions mélangent la technique et l'acceptation sociale. Certes, la blockchain est connue pour sa grande sécurité, mais comme toute technologie, elle n'est pas totalement infaillible et il existe des risques de cyberattaques. Wang *et al.* (2022) ont d'ailleurs dressé un tableau avec les principales cyberattaques ainsi que des cas répertoriés pour chacun d'entre elles. C'est en cela que les potentiels utilisateurs et/ou concepteurs de blockchain peuvent justifier leurs craintes. La réputation de la blockchain tient donc à sa sécurité, mais également à la compréhension de ses avantages et inconvénients qui n'est pas encore claire.

3.2. Un couple permettant d'améliorer l'efficacité de l'économie circulaire...

La blockchain facilite le transfert d'informations avec notamment une sécurité non-négligeable. Cela se révèle être une source d'opportunités numériques pour l'économie circulaire. Ainsi, la blockchain génère un système circulaire de collaboration économique et

⁹ L'ordonnancement permet au gouvernement de contourner le processus législatif normal en présentant un projet de loi qui sera adopté directement par le Conseil des ministres sans être débattu ni amendé par les parlementaires.

environnementale, créant une économie en boucle fermée. Ainsi, la blockchain est un outil de coordination et de coopération pour l'économie circulaire (Schulte, 2013).

D'une part, elle rend possible la connexion et donc la coordination de plusieurs réseaux et bases de données mises à jour en même temps irréversiblement (Swan, 2015), dont l'accès n'est pas restreint et en se protégeant des potentielles falsifications. De ce fait, une possibilité pour une entreprise est prendre en compte un réseau des parties prenantes plus large pour assurer le cycle de vie des produits et des services. D'autre part, comme dans toute économie, une coopération et une concurrence peut stimuler l'activité (innovation, etc.). La blockchain apporte cette dimension positive à l'économie circulaire, notamment grâce au « principe décentralisé de création de valeur et de circulation par opposition à la création de valeur et à l'appropriation de valeur » (Upadhyay *et al.*, 2022). C'est fondamental pour la technologie blockchain si elle veut aider l'économie circulaire à atteindre ses objectifs. Grâce à cette technologie, aucune tierce personne ne s'approprie la valeur créée mais se distribue entre les acteurs directement impliqués dans la création de cette valeur.

En outre, en reliant les bases des données des parties prenantes des chaînes d'approvisionnement, la blockchain permet d'obtenir des gains de productivité supplémentaire qui permettent d'économiser des coûts et du temps. Et comme ces chaînes ambitionnent à la fois à réduire les déchets et à améliorer leur efficacité, la blockchain peut être un véritable atout pour l'économie circulaire. Les chaînes d'approvisionnement sont en effet souvent longues et il est difficile de les surveiller efficacement. La blockchain peut enregistrer les données importantes pendant l'entièreté du cheminement du produit, ce qui rend beaucoup plus facile la surveillance des chaînes (Xu *et al.*, 2019). De ce fait, cela assure la qualité des produits et une production assez propre et les frontières n'ont aucun effet. De manière plus particulières, les *smart contract* automatisent des transactions monétaires plus facilement grâce à la fonctionnalité du GPS qui met à jour les activités par endroits (Iansiti et Lakhani, 2017). Cela contribue à la responsabilité en s'affranchissant des transactions frauduleuses et donc participe aux transformations informationnelles des transactions. Un exemple serait celui de l'industrie automobile, notamment le cas de l'entreprise BMW¹⁰. Elle utilise cette technologie pour retracer la propriété et pour développer une technologie de conduite automatisée sécurisée

¹⁰ Page web de BMW consacrée à la blockchain : <https://www.bmw.com/fr/innovation/blockchain-automobile.html>

(préoccupation concernant les voitures autonomes). Le lien avec l'économie circulaire est l'encouragement de l'assurance sécurité à l'utilisation de ces véhicules, ce qui contribuera à la réduction des émissions *via* la baisse de la consommation de carburant (puisque les véhicules autonomes sont électriques), tout en protégeant les voitures des piratages (Dierksmeier and Seele, 2020).

La blockchain peut introduire de nouveaux modèles financiers basés sur des investissements plus responsables mais qui contribuent tout de même à l'économie. Par le financement participatif, la blockchain peut soutenir la levée du capital-risque (participer au financement d'une entreprise innovante, notamment dans l'économie circulaire) de manière plus équitable pour toutes les classes sociales.

Un avantage de la blockchain est la transparence donc les chaînes d'approvisionnement peuvent s'appuyer dessus pour obtenir une traçabilité des produits. Sur le long terme, cela assure donc la durabilité de l'économie circulaire, du fait d'une forte réduction dans l'utilisation de papier, la consommation énergétique, la production de déchets dans ces chaînes.

Un aspect éthique et moral induit l'utilisation de la blockchain. Les enregistrements jouent à la fois le rôle d'outil de surveillance mais aussi le rôle de preuve auprès de la population, notamment sur la responsabilité environnementale des produits et sur le respect des droits de l'Homme (Dierksmeier and Seele, 2020).

La technologie blockchain est d'une aide précieuse pour les entreprises et les organisations dans leur globalité. Effectivement, elles peuvent contribuer à la responsabilité sociale grâce à la détection de la fraude par la blockchain en temps réel (elles seront plus amenées à aller dans le sens de la responsabilité sociale). Mais aussi, les *smart contract*, malgré des coûts initiaux importants (expertise, logiciels, changement de modèles commerciaux, etc.), permettent de bénéficier d'une protection sociale plus durable (Iansiti et Lakhani, 2017).

Globalement, la technologie blockchain permet de répondre aux attentes de l'économie circulaire, notamment concernant la durabilité des produits et la responsabilité sociale des entreprises. Dans ce sens, des investissements dans la recherche et l'expansion de la blockchain seront un allié crucial pour l'économie circulaire. Cela offrira d'énormes opportunités dans l'atteinte d'une croissance économique responsable socialement et écologiquement.

3.3. ...mais engendre des conséquences non-souhaitables

Comme annoncé dans la sous-section consacrée aux inconvénients de la blockchain, les coûts énergétiques ont été très rapidement abordé. En effet, les deux plus grandes plateformes blockchain, Bitcoin et Ethereum, utilisent principalement la PoW comme mécanisme de vérification. Or, ce mécanisme requiert des nœuds très coûteux en calcul et donc en énergie, pour résoudre les énigmes de hachage. Pour illustrer, la consommation électrique annuelle de Bitcoin est comprise entre 60 et 150 TWh (Wang *et al.*, 2022). En 2021, la consommation aurait atteint les 121,36 TWh, selon le journal L'unil. La consommation d'électricité d'un ménage moyen allemand pendant plusieurs mois peut atteindre le niveau de consommation qu'engendre une seule transaction Bitcoin. C'est pour cette raison que l'algorithme de consensus alternatif, la PoS a été lancé, notamment par Ethereum. Certes, cela réduit le coût énergétique, mais en contrepartie, cela augmente d'autant plus les coûts monétaires (Wang *et al.*, 2022).

Ensuite, la blockchain génère beaucoup de déchets électroniques, car les équipements miniers doivent généralement être remplacés après quelques mois d'utilisation. Le problème environnemental est que le traitement et l'élimination des déchets électroniques sont également associées à des impacts négatifs, notamment la pollution des sols et de l'eau et les émissions de gaz à effet de serre. Un exemple possible est celui de Bitcoin. Le développement de cette plateforme blockchain s'est traduit par une notoriété croissante, cela induit par un nombre d'utilisateurs qui suit une tendance à la hausse et donc qui dit plus d'utilisateurs, dit plus de mineurs (figure 17). La moyenne hebdomadaire du taux de hachage a augmenté de manière exponentielle entre 2017 et 2020. Cela est corrélé avec l'équipement de minage actif qui augmente tendanciellement de la même manière, car il faut logiquement avoir des équipements pour miner. Et le nombre d'équipement est lui-même corrélé avec la quantité de déchet électronique, car pour jeter un équipement de minage il faut d'abord l'utiliser (normalement). Indirectement, plus l'activité de minage se développe, plus grande est la quantité de déchets électronique associée au minage (ce qui est également logique). Rien que pour la plateforme Bitcoin, on passe d'environ 1500 tonnes de déchets mi-2014 à environ 3 100 tonnes mi-2020, soit une multiplication d'environ 20,5 en 6 ans et donc une multiplication de 3,4 en moyenne par an de la quantité de déchets électroniques (Stoll et de Vries, 2021).

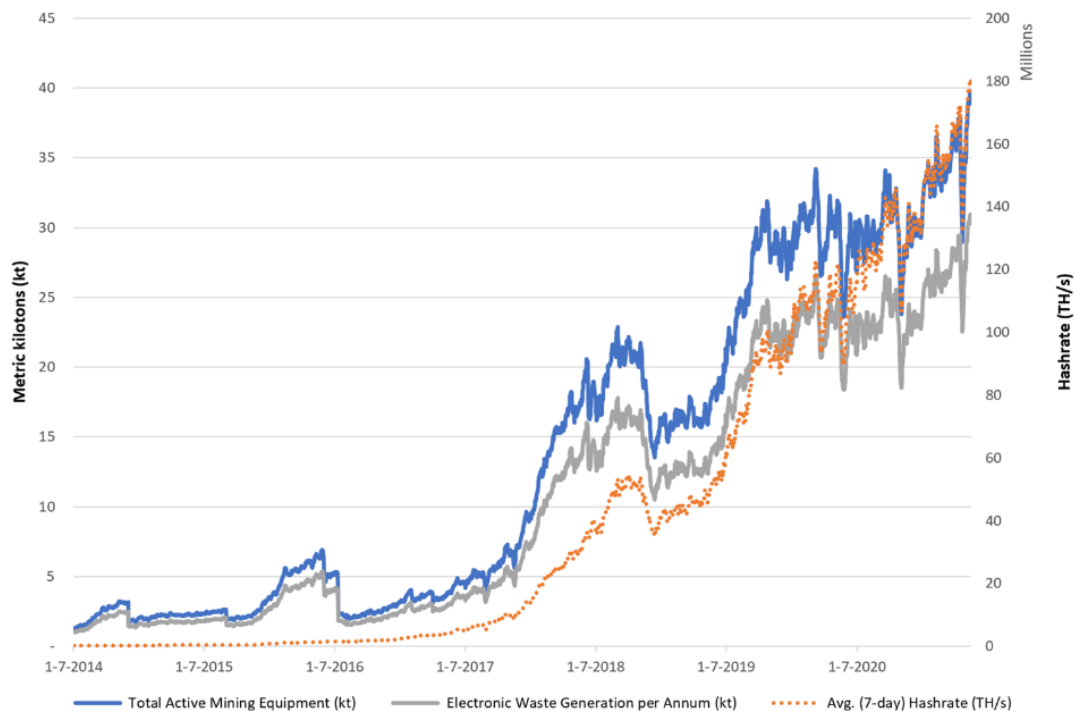


Figure 17 : Production totale d'équipements miniers actifs et de déchets électroniques dans le réseau Bitcoin au fil du temps. Estimation de l'équipement minier actif et de la production de déchets électroniques (en kilotonnes métriques) dans le réseau Bitcoin depuis juillet 2014. **Lecture** : Le 1^{er} juillet 2016, le réseau Bitcoin a produit environ 5 kilotonnes d'équipement de minage. A cette même date, le réseau Bitcoin a généré environ 4,4 kilotonnes de déchets électronique et le taux moyen hebdomadaire de hachage s'élevait à 0,5 TH/seconde environ. **Source** : Stoll C. et de Vries A. Bitcoin's growing e-waste problem. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 175, 7.

Enfin, il est insensé d'omettre la pollution numérique qui gagne en ampleur depuis le début des années 2000. La blockchain, étant totalement numérique, n'est pas en reste. L'ADEME et l'Autorité de régulation des communications (Arcep) ont publié une étude pour mesurer l'empreinte environnementale du numérique en France en avril 2022 pour l'année 2021. Selon cette étude, 2,5% de l'émission de carbone française provient du numérique. Mais le plus significatif dans l'émission de gaz à effet de serre c'est la phase de fabrication (dont les matériels utilisés pour le minage), d'où la nécessité de fabriquer des équipements numériques avec une plus longue durée de vie (réemploi, réparation, etc.). Des chiffres qui concernent plus précisément la blockchain, les centres des données représentent 4% à 22% de l'impact environnemental et les réseaux entre 2% et 14% parmi tous les équipements numériques, selon l'étude de l'ADEME et l'Arcep. Le palmarès revient aux utilisateurs terminaux comme les ordinateurs, smartphones, tablettes, etc. où ils représentent 65% à 90% de l'impact environnemental.

Si la blockchain venait à se développer (ce qui sera très sûrement le cas), la quantité de déchets électroniques augmenterait d'autant plus, ainsi que la consommation d'énergie et donc la pollution atmosphérique, des sols, des eaux, etc. La blockchain fait donc face à un réel défi écologique qu'elle doit résoudre pour qu'il soit l'outil idéal pour le développement optimal de l'économie circulaire.

Pour conclure cette section, la synergie écologique et technologique est confrontée à de multiples pressions, ce qui rend l'émergence de ses avantages et inconvénients difficile. Cependant, d'autres facteurs interviennent également dans l'intégration de ces deux innovations sur le marché.

4. Les déterminants de la blockchain déployée pour l'économie circulaire : analyse des trajectoires d'innovation

Pour finir ce chapitre, nous allons examiner les différents déterminants qui jouent un rôle dans l'adoption des deux innovations. Par cette examen, nous passerons en revue le rôle que jouent les politiques publiques et la demande, dans un premier temps pour l'économie circulaire et dans un deuxième temps, pour la blockchain. Nous verrons également comment la blockchain évolue techniquement : facteur important dans son adoption. Enfin, nous concluons avec une synthèse de ce que nous avons vu tout au long de ce premier chapitre avant d'avancer quelques hypothèses.

4.1. Influence des politiques publiques

L'analyse de l'influence des politiques publiques est fondamentale car elles peuvent donner un cadre légal pour l'utilisation des innovations. De plus, c'est grâce aux politiques publiques que les innovations sont protégées et donc leur permettent de se développer stablement, grâce au cadre légal fixé. Nous allons voir comme les innovations de l'économie circulaires et de la blockchain sont régulés et comment elles sont régulées.

4.1.1. Une législation stricte et clair pour l'économie circulaire...

Au sein de l'UE, la question juridique de l'économie circulaire est discutée dès le 19 novembre 2008, voulant montrer l'exemple relatant de la transition vers une économie plus respectueuse de l'environnement. L'UE adopte directive 2008/98/CE relative à une meilleure des déchets.

C'est en 2015 que la Commission européenne a adopté le premier plan d'action pour l'économie circulaire pour le concrétiser en 2018 par 54 directives. L'objectif était d'offrir cadre réglementaire favorable pour le développement de l'économie circulaire. Les mesures devaient stimuler à la fois la transition du modèle économique de l'Europe vers un modèle circulaire, la compétitivité mondiale et une croissance économique soutenable en générant également de l'emploi. A ce moment-là, les deux objectifs phares en termes de déchets étaient de recycler 65% des déchets municipaux ¹¹ d'ici 2023 et 70% des déchets d'emballages d'ici

¹¹ Selon l'article 3 de la directive européenne (UE) 2018/851, les déchets municipaux englobent « les déchets en mélange et les déchets collectés séparément provenant des ménages, en ce compris le papier et le carton, le verre, les métaux, les matières plastiques, les biodéchets, le bois, les textiles, les emballages, les déchets

2015, selon le site de la Commission européenne. En 2019, est adopté le « Green Deal européen » qui intègre les 54 directives dans ses objectifs clés (Collard, 2020). Pour soutenir ce plan, une politique de financement a été également lancée via les fonds ESI (structurels et d'investissements européens) atteignant un montant de 5,5 milliards d'euros (Collard, 2020).

En mars 2020, la Commission européenne, a adopté le nouveau plan d'action pour l'économie circulaire (PAEC)¹². Ce plan est composé de 35 mesures annonçant des initiatives de conception des produits plus durables, de réduction des déchets et à donner plus de responsabilités et de pouvoir aux consommateurs (comme le droit de réparer). En fin d'année 2020, la Commission européenne a adopté un nouveau règlement sur le cycle de vie des batteries (approvisionnement, recyclage, réutilisation) et les rendre durables.

Début 2021, l'Alliance mondiale pour l'économie circulaire et l'utilisation efficace des ressources (GACERE) est lancée. Les objectifs du Green deal européen ne peuvent être accomplis si l'UE n'obtient pas d'aide au niveau international. C'est pour cette raison que l'UE a coopéré avec d'autres organisations (Nations Unies, G7, G20, OCDE) et d'autres pays (pays voisins comme les pays de l'Europe centrale, de l'Afrique du Nord, etc. et des pays industrialisés comme la Chine et la Russie)¹³. Fin 2021, d'autres directives traitaient de la question des déchets (pollutions organiques dans les déchets le 28 octobre et le transferts des déchets le 17 novembre).

En mars 2022, le nouveau plan d'action pour l'économie circulaire (PAEC) a été par la Commission européenne. Il regroupe plusieurs choses. D'abord, des mesures pour que les produits durables soient la norme au sein de l'UE. Ensuite, une stratégie visant à créer un secteur plus vert et plus compétitif : repenser entièrement le cycle de vie des produits textiles. Enfin, la Commission a pour projet d'automatiser la consommation en lui donnant toutes les informations possibles pour qu'il consomme de manière plus responsable et durable. Le 5 avril 2022, la Commission a adopté des propositions de mesures révisées par l'UE pour lutter contre la pollution venant des grandes structures industrielles, selon le site de la Commission

d'équipements électriques et électroniques, les déchets de piles et d'accumulateurs, ainsi que les déchets encombrants, y compris les matelas et les meubles ».

¹² Voir le calendrier des actions passées sur le site de la Commission européenne :

https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_fr?ettrans=fr

¹³ Site de la Commission européenne listant tous les pays qui se coordonnent avec l'UE pour atteindre les

objectifs du Green Deal européen : https://environment.ec.europa.eu/international-cooperation/environmental-cooperation-other-countries_en

européenne. Le 30 novembre 2022, La Commission européenne a adopté quelques mesures du plan d'action pour l'économie circulaire. En plus claire, elle a révisé les règles européennes concernant les emballages et les déchets d'emballages et à communiquer sur les plastiques biosourcés, biodégradables et compostables pour guider les consommateurs de plastiques dans leurs achats en leur apportant une information la plus compréhensible possible.

En 2023, la Commission a adopté une proposition selon laquelle les entreprises doivent soutenir leurs allégations relatant des aspects environnementaux et/ou les performances de leurs produits et de leurs organisations grâce à des méthodes scientifiques et vérifiables. Une autre proposition a été adoptée visant à faciliter la réparation et la réparation et ainsi introduire le « droit à réparer », selon le site de la Commission européenne.

Pour ce qui est de la France, la législation encadre presque aussi bien l'économie. D'abord, ce concept a été officiellement intégrée en août 2015 dans la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte ¹⁴, selon le site du Ministère de la transition écologique. Cette loi définit plusieurs objectifs autour de la croissance et des déchets. D'abord, elle doit permettre de produire tout en utilisant moins de ressources naturelles : séparation entre croissance et consommation de matières premières. Ensuite, la quantité des déchets ménagers doit être réduite de 10% en 2020, par rapport à 2010 et de réintégrer les déchets dans le processus de production. Aussi, 65% des déchets non dangereux doivent être recyclés d'ici 2025. Enfin, réduire la mise en décharge de 50% en 2025 depuis 2010.

Mais c'est bien avant 2015 que des lois vont dans le sens de la vision de l'économie circulaire (du côté français et même européen). En effet, en 2008, les articles R543-57 à R543-62 ont été introduits dans le Code de l'Environnement. Ces articles n'étaient que la transposition de la directive européenne 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 dans le droit français. Cette directive prévoyait un cadre pour une politique de l'eau dans le but de protéger les ressources hydrauliques et de les gérer durablement. Les articles R543-66 à R543-72 du Code de l'Environnement précisent les règles relatives à la gestion des déchets provenant de soins à risques infectieux.

En complément et dans le prolongement la loi de 2015 et des articles de 2008, le tri à la source et à la valorisation de certains déchets (papier/carton, métal, plastique, verre et bois) est

¹⁴ LOI n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte (1) : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000031044385>

obligatoire par les articles D .543.278 et les suivants du code de l'Environnement du 11 août 2016, selon le site de la Direction Régionale de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement de Bretagne.

La production de déchets tient sa source de plusieurs choses. Une des sources est le gaspillage. C'est pour ça qu'une loi anti-gaspillage a été voté le 10 février 2020¹⁵ pour l'économie circulaire. Selon le site du Ministère de la transition écologique, elle promeut l'insertion du modèle plus efficient, qui s'éloigne du modèle « tout jetable », en réduisant le gaspillage et en luttant contre l'obsolescence programmée et ce, tout en informant au mieux les consommateurs (facilitation le geste du tri). En outre, cette loi fixe d'autres objectifs comme la fin du plastique jetable d'ici 2040 (interdire l'usage du plastique à usage unique).

4.1.2. ... mais une législation floue pour la blockchain

Le droit et la réalité n'évoluent pas en même temps, lorsqu'une innovation se développe sur le marché, il faut toujours que le droit s'approprie le sujet pour ensuite lui donner un cadre légal. Le problème étant que cette appropriation peut durer plusieurs années et puisque la blockchain est une innovation relativement récente, le droit (français ou international) n'est pas encore en mesure de cerner encore totalement. Surtout que cette innovation requiert des connaissances techniques que le monde juridique n'a pas (en théorie). Pour préciser, il existe plusieurs raisons pour lesquelles le droit n'a pas encore la main sur tous les aspects de la blockchain.

Le premier problème pour le droit c'est la désintermédiation. Le rôle du tiers de confiance (banquiers, l'Etat, notaires, etc.) sera « distribué » à plusieurs personnes, mais certains pensent que cela conduirait à leur restructuration, voire à leur disparition (Lasmoles, 2018). En effet, la blockchain peut fournir des services similaires que ceux proposés par un tiers de confiance (dater les informations par exemple). En revanche, la blockchain n'intervient pas dans la distinction entre *instrumentum* et *negotium*¹⁶ (Aubert, 2007), ce qui est du ressort du notaire par exemple. La blockchain n'a pas la main sur les capacités des parties, de leur consentement (éclairé) et des caractéristiques de l'acte (*negotium*). C'est pour cela que le notaire est

¹⁵ LOI n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire (1) : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000041553759>

¹⁶ La notion d'*Instrumentum* fait référence à la matérialisation d'un acte juridique, alors que le *negotium* concerne les éléments de fonds de cet acte (les déterminants de la nature et l'étendue des obligations des parties).

indispensable dans le cas de transactions immobilières. En outre, les parties doivent être obligatoirement clairement identifiées (nom, prénom, etc.), or la blockchain anonymise les utilisateurs avec un pseudonyme. Donc pour ces raisons, une blockchain ne peut se substituer totalement à un tiers de confiance (Lasmoles, 2018).

Un autre problème ce sont les smart contracts, des programmes exécutant automatiquement des conditions prédéfinies par un ou plusieurs utilisateurs. Certes, des avantages sont à retenir comme la réduction des coûts et de la fraude et une plus grande efficacité et confiance. Mais la programmation d'un *smart contract* et sa conclusion ne sont pas la même chose, programmer un *smart contract* c'est seulement créer un cadre d'un éventuel contrat (Croze, 2018). Donc seules les clauses de ces contrats sont de nature juridique (Lasmoles, 2018). De plus, l'article 1104 du Code civil stipule que « Les contrats doivent être négociés, formés et exécutés de bonne foi.¹⁷ » et l'automatisation des contrats ne donne pas la place à la bonne foi en cas de sanction de non-exécution (Lasmoles, 2018). L'auteur met en lumière un autre élément important : la responsabilité de la personne dans la blockchain en cas d'acte illégal. La réponse diffère selon la nature de la blockchain. Dans le cas d'une blockchain privée, l'identité de la personne responsable dépendra des règles déterminées par le gestionnaire du système (il joue un rôle similaire à celui que jouerait un tiers de confiance). Dans le cas d'une blockchain publique, c'est beaucoup plus compliqué car il n'y a personne qui gère le système, donc se posent plusieurs questions comme celle de la juridiction compétente ou alors l'arrêt d'une (ou plusieurs) transaction contestée.

Le dernier problème juridique que pose la blockchain c'est la protection des données. Ce problème est d'ordre technique comme nous l'avons déjà soulevé mais aussi d'ordre juridique car l'Etat se doit de protéger les citoyens, cela passe par la protection de leurs données. De nombreux pays font respecter le Règlement Général sur la Protection Des Données (RGPD)¹⁸, y compris la France. La blockchain ne doit donc pas échapper à ce règlement. Il est vrai que d'un côté, avec l'utilisation de pseudonyme, la blockchain respecte les données à caractère personnel, mais d'un autre côté elle demande des informations pour prouver du sérieux des

¹⁷ Article 1104 du Code civil : https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000032040772/2021-10-07

¹⁸ Site de CNIL sur le RGPD : <https://www.cnil.fr/fr/reglement-europeen-protection-donnees>

utilisateurs. Or, selon la Cour de cassation¹⁹ une adresse IP suffit pour l'identification (indirecte) d'un utilisateur sans à avoir à récolter ses informations personnelles. Dans la même idée, le droit à l'oubli des données personnelles (une des règles du RGPD) ne semble pas bien respecté dans la blockchain étant donné que les données sont immuables et difficilement effaçables ou modifiables (Lasmoles, 2018).

Pour toutes ces raisons, le cadre légal de la blockchain ne peut être encore déterminé car elle reste assez incompatible avec des dispositions juridiques normatives françaises.

Néanmoins, nous pouvons nous interroger sur la valeur de la preuve qu'apporte la blockchain. Hervé Croze met en avant l'ordonnance n°2017-1674 du 8 décembre 2017²⁰ qui stipule qu'une émission ou cession de titres financiers dans une blockchain est juridiquement similaire que si ça avait été inscrit dans un compte de titres financiers. En outre, selon l'auteur, la blockchain est une nouvelle technique de preuve et comme l'article 1358 du Code civil prévoit que « la preuve peut être apportée par tout moyen », il n'est pas nécessaire de légiférer pour que la preuve juridique et judiciaire par blockchain soit reconnue. Cependant, la question de la valeur décisive de la preuve n'est pas beaucoup abordée (Quiniou, 2019). Dans le cas d'une transaction immobilière, pour prouver que l'on est propriétaire du bien, l'acte de vente est la preuve naturelle. Cependant il faut prouver que l'ancien propriétaire était lui-même bel et bien le propriétaire : procédé récursif et infini. Hervé Croze avance une solution qui est le mécanisme de l'usucapion : si l'on parvient à démontrer l'existence d'une possession paisible trentenaire (en additionnant les possessions des propriétaires successifs), la propriété est prouvée par la prescription acquisitive. Dans le cas de la preuve de biens mobiliers et corporels, il n'y a aucunement besoin de prouver l'origine de la propriété, il suffit d'acquérir le bien de bonne foi, selon l'article 2276 alinéa 1 du Code Civil²¹ : « en fait de meubles, la possession vaut titre ».

Au niveau international, c'est plus compliqué. Selon Edouard Treppoz, il existe un mythe de la régulation de la blockchain du fait que le fonctionnement doit être maîtrisé au préalable.

¹⁹ Décision de la Cour de cassation le 3 novembre 2016 : <https://www.courdecassation.fr/decision/5fd91ab5eb0eedb6c7f7b75b>

²⁰ Ordonnance n° 2017-1674 du 8 décembre 2017 : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000036171908>

²¹ Article 2276 du Code Civil : https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000019017163/2022-04-04

Selon l'auteur, la théorie dit que la blockchain est régulable (ses activités surtout) car elle correspond à un outil et non pas à un lieu. Cependant, la crise du multilatéralisme²² empêcherait une régulation internationale efficace de la blockchain. Une solution avancée par Edouard Treppoz serait d'instaurer des normes locales qui possèdent des applications qui n'en sont pas soumis à au droit national.

La Commission européenne a constitué un groupe de travail en 2017 pour adapter le droit international privé au sein de l'UE, mais la question était trop complexe pour une partie de ce groupe et donc a été mise de côté. Cette difficulté tient d'abord à son inexistence physique et donc, son rattachement à un territoire donné est rendu plus complexe et sa décentralisation ne permet d'identifier une personne (morale ou physique) précise et donc une localisation géographique (Audit, 2020).

Pour conclure, la réglementation pour la blockchain est pour le moment une question en suspens, la technologie n'est pas encore maîtrisée et destinée à se développer dans les prochaines années, tout comme le droit lui-même. Pour l'instant, aucune solution juridique en matière de blockchain n'est apportée de manière stricte (comme c'est le cas pour l'économie circulaire). Il faudra attendre les prochaines évolutions du droit de la blockchain pour qu'une législation puisse avoir le temps de s'adapter et avoir l'opportunité d'apporter un cadre favorable sans à avoir à freiner les activités pour autant.

4.2. Les technologies de la blockchain : des innovations qui s'accumulent

Comme nous expliqué très rapidement lorsque l'histoire a été déroulé, la blockchain est la combinaison de plusieurs autres technologies (innovations), c'est en cela qu'elle est systémique. L'objectif de cette sous-section n'est pas t'établir une liste exhaustive des technologies composants la blockchain, cela mériterait bien plus que quelques pages.

Les premières technologies à citer sont celles qui composent la structure même de la blockchain, nous avons décidé de les considérer comme des technologies dites « primaires », liste par le site GeeksforGeeks. La première d'entre elles est celle qui correspond aux nœuds. Et selon qu'ils soient complet ou partiel, ils peuvent conserver une copie complète des transactions ou qu'une partie.

²² La crise du multilatéralisme est la période dans laquelle les institutions internationales s'affaiblissent et dans laquelle la coopération internationale entre les Etats est remise en cause.

Ensuite, le ledger (ou « grand livre ») qui est une base de données. Il peut être ouvert à tous (un individu du même réseau blockchain peut lire et écrire quelque chose) quand il est public. Quand il est distribué, les nœuds ont une copie locale du ledger, un groupe de nœuds vérifie les transactions et ajoute des blocs dans la blockchain. Puis, quand le ledger est décentralisé, ce n'est pas un groupe de nœuds qui vérifie les transactions mais tous les nœuds.

Un autre composant est le Wallet qui est, dans le cas de la crypto-monnaie, un portefeuille numérique permettant à un utilisateur de stocker sa crypto-monnaie. Les nœuds du réseau blockchain ont chacun un portefeuille, protégé par une paire de clé publique et privée. Le Wallet se décompose en « Hot Wallet » et « Cold Wallet ». Le premier est utilisé pour les transactions en ligne quotidiennes et c'est lui qui peut être attaqué par les pirates. Contrairement à lui, le « Cold Wallet » ne peut être visés par des pirates car il est très sûr puisqu'il n'est pas connecté à Internet.

L'avant dernière technologie primaire est le NONCE (abréviation pour « nombre utilisé une seule fois »), c'est un nombre déterminé arbitrairement et destiné à être utilisé une seule fois. Ce nombre est ajouté à un bloc haché ou crypté dans une blockchain pour aider à créer un bloc ou valider une transaction. Il est également utilisé pour faire d'une transaction davantage sécurisée.

Pour finir, la technologie du hachage permet de mapper les données à une taille fixe. Dans un réseau blockchain, le hachage d'une transaction est l'entrée d'une autre transaction.

Hormis ces technologies « primaires », d'autres sont utilisés comme l'important IoT (Internet of Thing). Il « décrit le réseau de terminaux physiques, les « objets », qui intègrent des capteurs, des softwares et d'autres technologies en vue de se connecter à d'autres terminaux et systèmes sur Internet et d'échanger des données avec eux. » Cette technologie est elle-même un système de plusieurs technologies : plateformes cloud, intelligence artificielle, etc. Ces technologies font en réalité partie de l'industrie 4.0. Cette industrie optimise les processus de production en connectant des usines intelligentes dans lesquelles les machines et les humains communiquent entre eux de manière transparente et en temps réel. L'avantage de l'industrie 4.0 c'est sa flexibilité dans le processus de production, ses opportunités de réduction de coûts et d'amélioration de la qualité de la production. Cela permet aux entreprises de rester compétitive dans un contexte dans laquelle la numérique gagne de l'ampleur : rester dans l'ère du temps.

La raison de cette importance est que la blockchain peut extraire les données venant de l'IoT et ce dernier a besoin de la blockchain pour sécuriser toutes ces données. Cette complémentarité est importante (comme celle avec le Big Data) dans la mesure où la protection des données est de plus en plus importante. L'IA et le cloud peuvent également bénéficier de la blockchain si elle est adoptée.

Mais le tout est de savoir ce qui permet vraiment d'assurer la sécurité mais aussi la confidentialité, tout en assurant une certaine efficacité. Cela passe par les systèmes de gestion d'identité (IdMS) qui est une technologie qui peut être programmée au préalable pour gérer et commander les identités numériques des utilisateurs (Ouaili *et al.*, 2022). Par ces systèmes, les interactions sont facilitées. Du fait qu'Internet est de plus en plus prisé, le processus est un des systèmes qui a été numérisé. En cela, n'importe qui peut se créer un compte à plusieurs services. La gestion manuelle de ces informations peut devenir impossible à réaliser, cela relève donc d'un défi. Une nouvelle forme de IdMS est l'Identité Auto-Souveraine (self-sovereign identity : SSI) qui permet à la blockchain de surpasser ce défi. Cette technologie reflète bien la nature décentralisée de la blockchain : l'utilisateur garde le contrôle de ses données tout en restant anonyme grâce à un identifiant décentralisé (DID).

En outre que l'identité des utilisateurs, les transactions doivent être authentifiées. Une technologie très utilisée est celle des smart contract. C'est un programme qui permet de rendre les conditions d'exécution les termes d'un contrat infalsifiables mit en place sur la blockchain avec un langage Turing-complete contractuel. Lorsque le contrat reçoit les données, il évalue si les conditions sont remplies et effectue alors la transaction, sinon un message d'erreur s'affiche. Les conditions du smart contract (et des potentiels messages d'erreurs) sont visibles par tous les nœuds de la blockchain du smart contract.

En plus des technologies déjà effectives, d'autres peuvent apparaître et ainsi améliorer la blockchain. Une d'entre elles est le DAG (directed acyclic graph), proposée par Abdulqadder *et al.* en 2023. Elle permet de contrer les inconvénients de la consommation d'énergie élevée ainsi qu'un temps de traitement parfois long. La blockchain classique est basée sur une chaîne linéaire ne traitant qu'un seul bloc à la fois, le DAG permet de traiter les transactions sur plusieurs blocs en même temps grâce à un consensus de preuve de temps écoulé (PoET).

Une autre technologie proposée par Ren *et al.* en 2023 qui repose sur la sécurité des données : la blockchain de partitionnement LCR (LRC-SB). Le LRC peut garantir la fiabilité des

données dans la blockchain et réparer les mauvaises données dans un nœud, grâce à un encodage des blocs de données dans chaque nœud de partition.

4.3. Influence de la demande

Pour une innovation, la demande est un facteur clé dans le succès qu'elle aura dans le marché. L'influence qu'elle subit de la part de la demande qui lui est adressée est déterminante dans son développement et son extension à la fois sur d'autres marchés et au niveau géographique. C'est pourquoi nous allons caractériser la demande adressée à l'économie circulaire et à la blockchain.

Geissdoerfer *et al.* (2017) caractérisent la demande adressée à l'économie circulaire en plusieurs points. Les auteurs relèvent que la demande pour des produits durables et recyclés augmente, notamment grâce à la sensibilisation croissante pour la protection de l'environnement. En effet, la population (mondiale) prend de plus en plus conscience des enjeux environnementaux, ce qui pousse les entreprises à revoir leur modèle de production et à adopter des pratiques circulaires. Ghisellini *et al.* (2016) mentionnent d'ailleurs la nécessité de changer les mentalités via la sensibilisation, la formation et la communication sur les avantages de l'économie circulaire.

Du côté des entreprises, elles peuvent profiter des nouvelles opportunités qu'offre l'économie circulaire en créant de nouveaux marchés, selon Geissdoerfer *et al.* (2017). Enfin, ils soulèvent une nécessité importante de collaboration et de partenariat entre les différentes parties prenantes (entreprises, gouvernements, consommateurs, etc.) pour créer un environnement propice à la transition vers l'économie circulaire. Ghisellini *et al.* (2016) rajoutent le fait que ces parties prenantes doivent trouver ensemble des solutions durables pour réduire l'impact environnemental et préserver les ressources naturelles après avoir mentionné que la demande en faveur de l'économie circulaire est motivée par une prise de conscience croissante des problèmes environnementaux. Ghisellini *et al.* (2016) soulignent également l'importance des politiques publiques dans la demande : mise en place d'incitations, des réglementations, des objectifs, etc. pour encourager les entreprises et les consommateurs à modifier leurs comportements.

Donc, la demande pour l'économie circulaire est en croissante soutenue grâce notamment aux changements dans les mentalités et les comportements des consommateurs et des

entreprises. Les politiques publiques et la formation soutiennent également cette hausse de la demande. Maintenant, regardons ce qu'il en est pour la blockchain.

Malgré la jeunesse de cette technologie, son grand potentiel a séduit de nombreux secteurs. Celui du commerce en est un exemple, les avantages de la blockchain dans l'amélioration dans les chaînes d'approvisionnement explique sa bonne réputation dans ce secteur. Un autre exemple est le secteur de l'automobile qui utilise la blockchain pour la transmission des données de localisation et de circulation de manière sécurisée au réseau des producteurs. L'utilisation de blockchain peut également se trouver dans le secteur du divertissement : vente de billets aux consommateurs de manière sécurisée et aussi suivre le cycle de vie des contenus pour limiter la fraude. Enfin, trois autres grands secteurs utilisent la blockchain pour certaines de leurs activités : le secteur public (les puissances publiques), de la finance et de la santé.

Le secteur de la finance utilise la blockchain pour éliminer les inefficacités et aux coûts que rencontrent les processus financiers traditionnels et fournir de meilleurs résultats commerciaux. L'application de la blockchain dans le monde de la finance permet un suivi et une gestion en temps réel des opérations financières, la génération de rapport plus rapide s'appuyant sur des données immuables et l'accélération des règlements. En 2018, 91% des institutions bancaires avaient investi dans la blockchain, selon IBM et 66% des institutions ont pour projet de fonctionner avec la blockchain à grande échelle. Pour elles, les retours sur investissements sont non-négligeable : réduction des coûts, réduction de risques de fraudes, meilleures performances et augmentation de la confiance auprès des clients, selon IBM.

Le secteur de la santé fait face depuis des années, à des problèmes d'interopérabilité²³, de confidentialité et de traçabilité de la chaîne d'approvisionnement (surtout depuis la crise de la COVID-19). Les solutions offertes par la blockchain permettent de corriger ces problèmes. Selon IBM, cette technologie permet la traçabilité des vaccins et des médicaments sur ordonnance. Le projet pilote de la Food and Drug a été lancé dans cette optique par IBM, KPMG, Merck, et Walmart, en 2019. Ce projet a confirmé l'efficacité de la blockchain pour une meilleure traçabilité, selon IBM. Cette technologie permettrait également d'agir plus efficacement contre la contrefaçon²⁴. Enfin, la blockchain permettrait d'obtenir des gains de

²³ Un problème d'interopérabilité apparaît lorsque plusieurs systèmes n'arrivent pas à agir ensemble du fait de l'incompatibilité de leurs équipements, leurs procédures et/ou de leurs organisations.

²⁴ Selon IBM, en 2018 en Amérique du Nord, 1 750 incidents de contrefaçon de produits pharmaceutique ont été

confiance et de transparence des patients envers les essais cliniques. Boehringer Ingelheim et IBM ont collaboré pour évaluer cette utilisation de la technologie blockchain pour les essais cliniques décentralisés, selon IBM. Le but était de surpasser le problème selon lequel les dossiers d'essais cliniques pouvaient contenir des erreurs ou être incomplets, ce qui compromettait la sécurité et l'efficacité des patients. Grâce à une blockchain autorisée, les patients peuvent contrôler leur consentement, en n'autorisant l'accès qu'aux parties prenantes autorisées. De plus, les *smart contracts* peuvent garantir la validité du consentement, réduire les erreurs administratives et assurer la transparence, ce qui augmentera la confiance des patients et contribuera à améliorer la sécurité des patients. En fin de compte, l'objectif du projet est de tester l'efficacité de la technologie blockchain pour améliorer la qualité des essais cliniques et la sécurité des patients tout en réduisant les coûts organisationnels.

Certaines entités gouvernementales comme les Etats-Unis mènent des activités de blockchain comme c'est le cas dans le secteur privé. L'utilisation de cette technologie est notamment utile dans le partage des données entre les institutions et les citoyens de manière sécuriser, en cela, la confiance envers le gouvernement n'en est que renforcée, selon IBM. Elle permet également d'avoir un suivi en temps réel du courrier : automatisation de la gouvernance des contrats et réduction des efforts manuels dans les paiements et la gestion du courrier (permet aussi d'éviter les erreurs), selon IBM. Enfin, la blockchain peut être également utilisée dans le renforcement de la chaîne d'approvisionnement du ministère de la défense : contrôle de la qualité et des fournisseurs, rapidité et sécurisation des transactions.

Il reste à savoir s'il est facile de se procurer. Autrement dit, si on y a accès facilement. Cela se traduit par les ressources mobilisées dans le cas où une entreprise ou un individu veulent en créer une. Pour estimer les coûts de création d'une blockchain, plusieurs facteurs sont à prendre en compte : l'algorithme de consensus utilisé, le niveau de sécurité, les nœuds du réseau etc. Mais en général, peu importe la configuration choisie, les coûts sont surtout liés en grande partie aux besoins informatiques (infrastructure, développement, maintenance) et en énergie.

Les coûts de développement d'une blockchain dépendent tout d'abord de la taille de l'organisation : les coûts augmentent d'autant plus que la taille de l'organisation qui veut la développer est grande. En outre, ce qui est fondamental pour une technologie comme celle-ci c'est l'usage d'une application et les coûts pour le développement d'une application dépend

eux-mêmes de plusieurs facteurs. D'abord toutes les applications ne se valent pas : globalement certaines sont plus appropriées pour des blockchains autorisées (privées ou d'entreprise) que pour des blockchain distribuées (publics). Ensuite, il faut prendre en compte le nombre de personnes concernées dans le développement de l'application (les experts en la matière entraînent un versement d'un salaire assez élevé : au minimum 52 000€ par an selon Le monde informatique). La complexité même de l'application influence les coûts de son développement. Selon CIS, une application blockchain peut complexe coûterait entre 15 et 40 mille dollars ; pour une application distribuée, plus complexe, le développement pourrait coûter entre 30 et 90 mille dollars. Pour une application autorisée, les coûts peuvent grimper au-delà de 130 mille dollars.

La blockchain est désormais assez populaire dans de nombreux secteurs (tant privés que publics) mais pour en créer une, des grosses ressources financières (et énergétiques) doivent être mobilisées.

4.4. Conclusion et synthèse – Tableau récapitulatif des avantages et des inconvénients

Economie circulaire	Blockchain
Innovations systémiques	
Modèle économique visant à amoindrir les impacts environnementaux	Système dans lequel les informations sont décentralisés, transparentes, immuables et sécurisées
Un effet de mode important associée à une forte adoption mondiale	Une méconnaissance globale mais utilisation croissante mondiale
Juridiction claire	Juridiction floue
Forte demande de la part des consommateurs, des entreprises et des puissances publiques	Jeunesse de l'innovation mais forte demande dans tous les secteurs (dont la finance, la santé et le gouvernement)
Pressions liées : <ul style="list-style-type: none"> - A un déficit structurel européen de ressources en termes de disponibilité et en qualité ; - A une impossibilité de cohérence entre les politiques et stratégies dû à des définitions de l'économie circulaire différentes ; 	Pressions liées : <ul style="list-style-type: none"> - A la méconnaissance de la technologie ; - Au fait que la blockchain soit source de menace ; - A la conformité réglementaire.

- A la remise en cause du modèle de production et de gestion des déchets traditionnel ;
- A une faible incitation au passage au modèle circulaire du fait d'investissements importants ;
- Aux lobbies qui tentent d'influencer les débats parlementaires dans la définition d'un cadre juridique à l'économie circulaire.

Avantages :

- Croissance économique et création d'emploi ;
 - Captation de bénéfices supplémentaire, réduction des coûts liés aux intrants et amélioration de la demande adressée aux entreprises ;
- Revenu moyen plus important pour les ménages ;
- Réduction des émissions de CO₂ et des externalités négatives liées à la pollution ;
- Productivité améliorée des terres.

Avantages :

- Décentralisation (aucun intermédiaire dans les échanges) ;
 - Transparence ;
 - Traçabilité ;
 - Immuabilité ;
- Sécurité des données ;
- Possibilité d'automatiser les transactions (*smart contracts*).

Limites :

- Spatiales et temporelles ;
 - Impacts négatifs de la thermodynamique ;
- Effet-rebond (paradoxe de Jevons) ;
 - Dépendance au sentier ;
- Nécessité de développer une gestion de la durabilité inter-organisationnelle (mais qui peuvent déboucher une impasse).

Limites :

- Coûts énergétiques importants ;
- Faible début et haute latence (faible rapidité) ;
 - Faible évolutivité ;
- Risque de piratage et/ou de cyberattaque ;
- N'intervient pas dans le monde réel.

Avantages de l'application de la blockchain dans l'économie circulaire :

- La blockchain comme outils de coordination et de coopération pour l'économie circulaire ;
- Rend possible la connexion entre plusieurs réseaux et de base de données mises à jour en même temps ;
- Principe de décentralisation de valeur (la valeur créée est distribuée entre les acteurs concernés) ;

<ul style="list-style-type: none"> - Gains de productivité supplémentaires grâce à la blockchain ; - La blockchain peut faciliter la surveillance et la transparence des chaînes d'approvisionnement ; - Introduction de nouveaux modèles financiers basés sur des investissements plus responsables ; - Blockchain comme preuve auprès de la population : intégration de l'éthique et de la morale avec le respect des droits de l'Homme ; - Contribution dans la responsabilité sociale des entreprises grâce à la détection de la fraude en temps réel ; - Les entreprises peuvent bénéficier d'une protection sociale plus durable.
<p>Inconvénients de l'application de la blockchain dans l'économie circulaire :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Consommation importante d'énergie - Production de déchets électroniques - Pollution numérique

Tableau 2 : Tableau de synthèse récapitulatif du chapitre 1^{er}.

Par cette synthèse, nous posons donc plusieurs hypothèses quant à l'application de la blockchain dans l'économie circulaire.

- La complémentarité des deux innovations ne déplace-t-elle pas les problèmes de l'économie circulaire au lieu de les traiter ?
- Est-ce que l'alliance entre l'économie circulaire et la blockchain sont actuellement dans une phase d'émergence ?
- Le couple produit-il des résultats satisfaisants en termes d'écologie malgré les défis qui se posaient ?
- Comment la question environnementale est-elle prise en compte par la blockchain ?
- Comment les utilisateurs s'approprient cette technologie ? Comment les politiques encouragent cette trajectoire prometteuse ? Techniquement, est-ce qu'on est au point ?

CHAPITRE 2 -
UNE ANALYSE EMPIRIQUE ET CRITIQUE DE L'APPLICATION DE LA
TECHNOLOGIE BLOCKCHAIN DANS L'ECONOMIE CIRCULAIRE

1. La blockchain pour l'économie circulaire : rappel des hypothèses de la partie 1 et méthodologie de la comparaison

Dans un premier temps, listons la liste des hypothèses que nous avons posé dans le premier chapitre :

- La complémentarité des deux innovations ne déplace-t-elle pas les problèmes de l'économie circulaire au lieu de les traiter ?
- Est-ce que l'alliance entre l'économie circulaire et la blockchain sont actuellement dans une phase d'émergence ?
- Le couple produit-il des résultats satisfaisants en termes d'écologie malgré les défis qui se posaient ?
- Comment la question environnementale est-elle prise en compte par la blockchain ?
- Comment les utilisateurs s'approprient cette technologie ? Comment les politiques encouragent cette trajectoire prometteuse ? Techniquement, est-ce qu'on est au point ?

Pour répondre à ces hypothèses, nous aurons besoin de mener plusieurs études de cas en suivant toujours la même trame afin de faciliter la comparaison : histoire, identité et objectifs du projet ou de l'entreprise utilisant la blockchain étudiée, ensuite le fonctionnement en insistant bien sur l'algorithme de consensus utilisée, viens ensuite l'analyse de l'état actuel de la technologie (son expansion). Enfin, nous en déduirons si la blockchain un outil efficace pour faciliter le passage à une économie circulaire.

2. Des cas témoins d'une réelle possibilité d'alliance entre deux innovations systématiques différentes

Cette section constitue le socle du second chapitre de notre démonstration. À l'intérieur de celle-ci, nous procéderons à une analyse approfondie de plusieurs études de cas portant sur l'application de la blockchain dans le domaine de l'économie circulaire. Pour chaque cas étudié, nous examinerons leur histoire, leur relation avec la blockchain, le fonctionnement de leur système blockchain ainsi que les limites techniques qui y sont associées. Enfin, nous évaluerons si ces initiatives prennent en compte les limites de la biosphère, afin de déterminer leur impact sur la durabilité environnementale.

2.1. Une cryptomonnaie pour la production d'énergie solaire : le SolarCoin

2.1.1. Une communauté agissant pour le bien de la planète grâce à de la cryptomonnaie

Le SolarCoin est une cryptomonnaie récompensant les volontaires du projet pour leur production solaire. Autrement dit, pour chaque MWh d'énergie solaire produite, le producteur reçoit un SolarCoin. Le SolarCoin est basé sur une blockchain publique de la fondation qui utilise un système de vérification de la production solaire individuelle.

La monnaie cryptographique SolarCoin a été conçue en 2014 par deux volontaires engagés dans la protection de l'environnement. A la tête de ce projet se trouve dans un premier temps, l'entrepreneur et investisseur américain Nick Gogerty, étant très expérimenté dans la finance. Dans un deuxième temps, se trouve l'ingénieur et entrepreneur de l'industrie de l'énergie solaire belge, François Sonnet.

A la base, l'idée d'une monnaie numérique vient d'un article académique datant du début des années 2010 qui traitait du sujet d'une cryptomonnaie qui fonctionnait à l'énergie renouvelable (Coin Report, 2018). Le projet est maintenant géré comme un projet communautaire ouvert dans lequel des volontaires peuvent travailler ensemble dans une « communauté SolarCoin » qui est soutenue par la fondation SolarCoin.

L'objectif de SolarCoin est d'accélérer la transition énergétique. Pour cela, les fondateurs voulaient favoriser le développement et la production, au niveau mondial, de l'énergie solaire (d'où « Solar »). Ils ont pour ambition de livrer 97,5 milliards de SolarCoins (97 500 TWh d'électricité solaire) sur 40 ans (Sciences et Avenir, 2017).

En 2018, plus de 38 millions de SolarCoins en circulation (augmentation d'un million par mois). Il y a environ 13 500 portefeuilles SolarCoin téléchargés et plus de 3 millions de SolarCoins ont été accordés aux propriétaires de panneaux solaires dans 51 pays aux États-Unis, en Europe et en Asie. Mais les pays qui sont le plus actifs dans la promotion de l'énergie solaire et SolarCoin sont les États-Unis, Israël, la Belgique et le Japon (Beddiar et Imbault, 2018).

Malgré sa jeunesse, le SolarCoin collabore avec quelques entreprises. C'est le cas de l'entreprise française EkWateur lancée en septembre 2016, qui est un fournisseur d'énergie totalement verte. C'est le premier commerçant au monde qui peut échanger des SolarCoins contre de l'énergie. EkWateur a établi un partenariat avec la Fondation SolarCoin, ainsi les clients d'EkWateur peuvent recevoir des SolarCoins en récompense pour leur production d'énergie. La condition est qu'ils doivent installer un système de production d'énergie solaire et le connecter au réseau électrique. EkWateur vérifie la production d'énergie solaire du client et demande l'émission de SolarCoins à la Fondation SolarCoin selon la production d'énergie du client (Sciences et Avenir, 2017).

2.1.2. SolarCoin : analyse complète du fonctionnement et de la valeur de cette cryptomonnaie et des coûts qu'elle engendre

2.1.2.1. Une technologie originale

Parlons maintenant de manière beaucoup plus précise, comment fonctionne le SolarCoin. Nous avons mentionné un système de récompense par MWh produit et un système de vérification (figure 18).

En fait, lorsqu'un des producteurs produit un MWh d'électricité solaire, il peut réclamer un SolarCoin. La rémunération des détenteurs d'installations photovoltaïques et des producteurs d'énergie solaire est fixé à § 1 SLR pour 1 MWh produit. Pour justifier la réclamation, il doit prouver qu'il a réellement produit 1 MWh ou prouver qu'il a la propriété du système de production. C'est ici que la technologie blockchain entre en jeu. Le producteur fait la réclamation au sein d'un réseau blockchain, composé de lui et d'autres utilisateurs (les membres de la communauté), la preuve leur est apportée puis examinée. Si la preuve est authentifiée, le producteur reçoit un SolarCoin et cet octroi est enregistré dans un registre public. Mais avant tout cela, il doit inscrire son installation. Il doit constituer un dossier contenant les informations nécessaires et ce dossier est vérifié de la même façon qu'une preuve : par un réseau d'utilisateurs blockchain. Quand la demande est approuvée, le futur producteur doit télécharger

un portefeuille compatible, comme MetaMask²⁵ pour créer une adresse de réception agissant comme un compte bancaire.

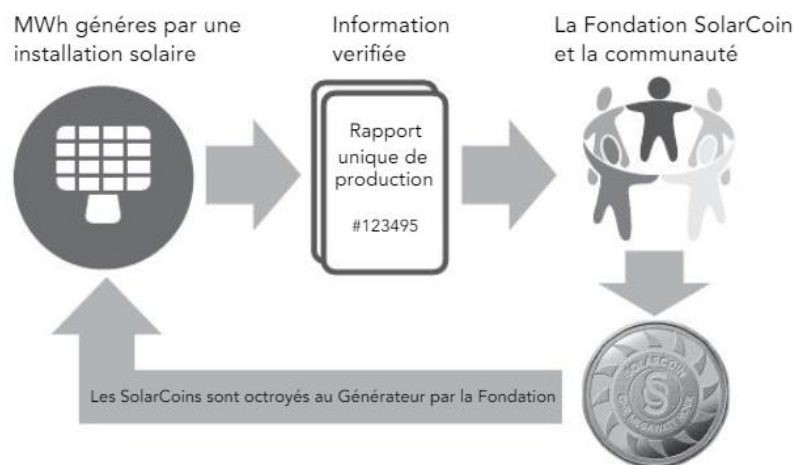


Figure 18 : Processus de rémunération par SolarCoin. **Source** : Beddiar et Imbault. Blockchain pour l'énergie, 2018.

La technologie blockchain utilisée pour le fonctionnement du SolarCoin est similaire à celle utilisée pour le Bitcoin, ce qui est relativement logique puisque ce sont toutes les deux des cryptomonnaies. Cependant, la finalité est financière pour le Bitcoin et environnementale pour le SolarCoin et que Bitcoin récompense les mineurs qui engagent de la puissance de traitement informatique. Dans le cas du SolarCoin, il récompense la production d'électricité.

Etant donné que le SolarCoin est basée sur une blockchain publique, cela veut dire que le contrôle n'est pas centralisé et la création de SolarCoin se fait automatiquement, grâce à la blockchain, lorsqu'un certain montant d'électricité est produit et vérifié. Cela veut également dire que la blockchain possède toutes les transactions effectuées de manière publique (donc si une personne veut consulter la date exacte d'une transaction à laquelle elle a participé (le jour et l'heure par exemple), elle peut aller consulter la blockchain pour vérifier ces informations. En outre, c'est la Fondation qui est responsable de la certification et de la gestion des SolarCoins et qui octroie la monnaie aux producteurs (figure 18).

Les données de la blockchain sont obtenues grâce à des capteurs sur les panneaux photovoltaïques des producteurs (Beddiar et Imbault, 2018). C'est grâce à cela que les données

²⁵ MetaMask est une extension web fonctionnant comme un portefeuille numérique pour la blockchain d'Ethereum et donnant accès aux applications décentralisées basées sur cette blockchain.

sont certifiées. Les capteurs envoient les données (la quantité d'électricité produite, l'identifiant du producteur et le moment auquel l'électricité a été produite) dans la blockchain publiquement.

Le SolarCoin peut se négocier et être échangé sur des plateformes d'échange de cryptomonnaies contre des devises (dont le Bitcoin) ou alors utilisé pour acheter des produits ou services auprès des vendeurs qui acceptent cette monnaie. On voit ici que le SolarCoin peut se substituer aux monnaies traditionnelles concernant les transactions d'électricité solaire tout en encourageant sa production.

Le SolarCoin peut aussi être combiné à d'autres technologies, comme moniteur d'énergie Smappee (figure 19). C'est un système de surveillance énergétique qui permet de mesurer la consommation d'énergie en temps réel. Il est par exemple capable de mesurer la consommation d'énergie de chaque appareil d'une maison de manière individuel, ainsi que la consommation énergétique globale de la maison. Il est non seulement capable de mesurer la consommation mais aussi de l'enregistrer. Pour les utilisateurs de ce moniteur, s'ils disposent de panneaux photovoltaïques, il peut enregistrer la quantité d'énergie solaire produite par ces panneaux. La première fonctionnalité de Smappee est de mesurer la consommation électrique, le fait d'intégrer le SolarCoin dans son interface de programmation d'applications (son ensemble de fonction), profite aux deux dans le sens où Smappee présente un avantage supplémentaire aux utilisateurs et offre au SolarCoin un moyen de se faire connaître davantage. De plus, les utilisateurs du moniteur qui ont des panneaux photovoltaïques n'ont pas besoin de créer un portefeuille car c'est Smappee qui fait tout à leur place.



Figure 19 : Moniteur d'énergie Smappee. **Source :** elektrozine.be.

Une autre évolution mais qui tient cette fois-ci à la blockchain même. Au début de son lancement, le SolarCoin utilisait le système de PoW jusqu'en septembre 2014 qui est très énergivore, ce qui était en contradiction avec l'objectif de production d'énergie (à quoi sert de produire de l'énergie pour la dépenser pour « rien » ?). A partir de là, l'algorithme de la *proof-of-Stake Time* (PoST) a été adopté. En plus de la réduction de la quantité d'énergie utilisée, ce changement de méthode de vérification implique d'autres avantages. D'abord, la PoST est une variante du PoS qui vise à améliorer l'efficacité énergétique de la PoS en introduisant un élément de temps. En effet, dans un protocole PoST, les validateurs sont sélectionnés en fonction de leur participation dans le réseau, comme dans la PoS classique. Cependant, ils doivent également prouver qu'ils ont été en possession de leurs jetons pendant une période déterminée avant de pouvoir valider des transactions. L'objectif de l'intégration de la condition de temps dans un système de vérification vise à encourager les détenteurs de jetons à s'engager dans le réseau sur le long terme, en incitant à une stabilité de l'écosystème. En d'autres termes, la PoST concilie sécurité, décentralisation, et réduction de la consommation d'énergie.

Pour rappel, si une blockchain utilise l'algorithme de consensus de la PoW²⁶, cela signifie que les mineurs (les participants du réseau) vont utiliser leur puissance de calcul (informatique) pour résoudre des problèmes mathématiques complexes et ainsi valider une transaction et l'ajouter dans un bloc de la blockchain. Le premier mineur qui réussit à résoudre le problème mathématique reçoit une récompense sous forme de cryptomonnaie²⁷. Plus rapidement, la PoW c'est dépenser de l'argent (investissement dans des fermes : ensemble d'ordinateurs qui se coordonnent pour résoudre le problème mathématique) et de l'énergie (pour faire fonctionner ces fermes) pour trouver un Nonce (un chiffre arbitraire pour sécuriser la blockchain).

En revanche, la PoS est aussi un algorithme de consensus mais au lieu de mettre en jeu une puissance de calcul très énergivore, les membres du réseau qui valident les transaction (les « validateurs », et non pas mineurs car il n'y a pas d'activité de minage) mettent en jeu des

²⁶ Voir explication plus précise de la *proof-of-work* dans cette vidéo YouTube : <https://www.youtube.com/watch?v=aUMhhvrvWqY>

²⁷ Nous pouvons noter quelque chose d'important : la PoW ne serait jamais utilisée dans une blockchain qui ne traite pas de cryptomonnaie, la raison est que s'il n'y a pas de cryptomonnaie, il n'y a aucune récompense en cryptomonnaie. Donc, la PoW peut être utilisé pour la blockchain de Bitcoin, de l'Ethereum ou encore du SolarCoin mais pas pour la blockchain de CircularChain que nous verrons plus loin, car elle n'est pas basée sur de la cryptomonnaie.

cryptomonnaies (dans notre cas, des SolarCoins) et son choisit pour valider une transaction en fonction de la quantité mise en jeu : la chance d'être sélectionné est d'autant plus grande qu'un potentiel validateur met en jeu de cryptomonnaie. Lorsqu'un ou plusieurs validateurs sont sélectionnés, ils valident (ou non) la transaction pour laquelle les validateurs ont souhaité participer, puis l'ajoute à la blockchain. Dans ce cas, il n'y a pas la résolution d'un problème mathématique complexe qui survient.

Cette technologie qu'utilise le SolarCoin est assez originale dans le sens où elle incite financièrement les membres de la communauté. Cela passe donc par l'utilisation d'un système de récompense par de la cryptomonnaie et contrairement à Bitcoin ou à Ethereum, cette cryptomonnaie n'est que très peu énergivore et tient son alimentation de l'énergie produite par les membres de la communauté grâce à leurs installations solaires. La raison de sa faible consommation en électricité c'est l'utilisation de la PoST, une version plus économe de la PoS d'Ethereum.

Pour terminer sur la technologie, penchons-nous de sa prise en compte des enjeux et limites techniques présentées dans le chapitre 1 : est-ce que la blockchain surmonte les inconvénients techniques d'une blockchain publique utilisant une cryptomonnaie, comme celle de Bitcoin ?

Une limite dont nous avons déjà discuter, c'est celle du faible débit des données et de la forte latence des transactions. Pour rappel, la (très) grande blockchain publique de Bitcoin est confrontée à ces problèmes car elle doit supporter un très grand nombre de données, ce qui ralentit tout le fonctionnement. SolarCoin n'est pas vraiment confronté à ce problème car la taille du système n'est pas aussi grande que celui du Bitcoin, pour l'instant. Cela peut se démontrer avec les quantités échangées entre les deux monnaies (figure 20 et 21).

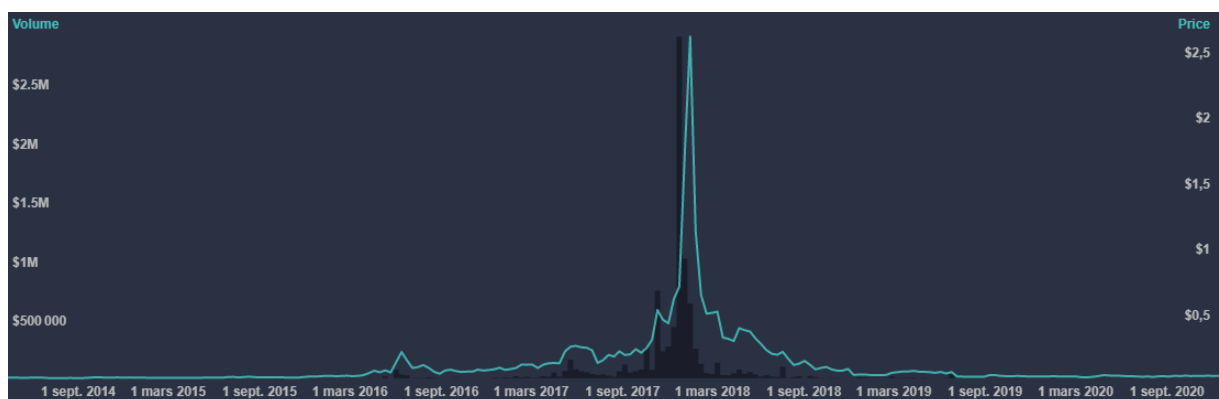


Figure 20 : Evolution du cours du Bitcoin (courbe cyan) et de sa quantité échangée (histogramme en noir) depuis début 2014, dans le monde. **Lecture :** Le 13 mars 2020, à 05h25, un Bitcoin valait 5 256,653\$ et un

volume de 25 035 267 835\$ de Bitcoin a été échangé sur le marché à un prix unitaire de 5 256,653\$. **Source :** Live Coin Watch.

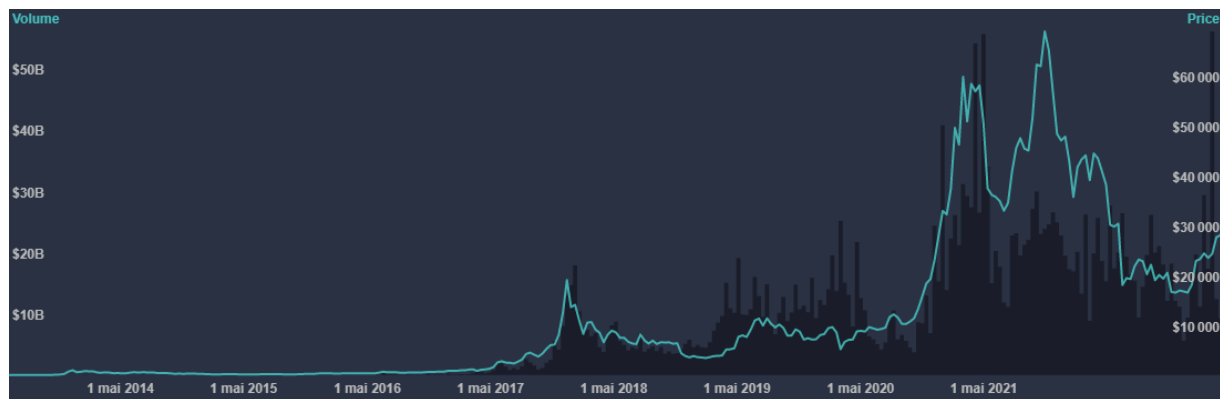


Figure 21 : Evolution du cours du Bitcoin (courbe cyan) et de sa quantité échangée (histogramme en noir) depuis début 2014, dans le monde. **Lecture :** Le 13 mars 2020, à 05h25, un Bitcoin valait 5 256,653\$ et un volume de 25 035 267 835\$ de Bitcoin a été échangé sur le marché à un prix unitaire de 5 256,653\$. **Source :** Live Coin Watch.

Une autre limite de la blockchain tient à sa sécurité, surtout concernant les cyberattaques. Plus une blockchain est grande, plus il y a d'argent en jeu, plus le risque de cyberattaque est important. Donc pour l'instant, sa notoriété assez faible dispense (en théorie) la blockchain du SolarCoin à s'en faire. Néanmoins, c'est un risque à ne pas non plus à prendre à la légère. D'ailleurs, la PoST réduit ce risque car le pirate qui tente d'attaquer le système doit avoir des jetons (de la cryptomonnaie) pendant un certain temps. En cela, ce n'est pas un pirate nouveau dans le système qui pourrait tenter quelque chose car il ne pourrait pas participer aux vérifications. Mais cette protection est facilement contournable, surtout si le réseau s'agrandit. L'enjeu de la sécurité n'est alors que temporairement prit en compte.

Dans la même idée, une autre limite (ou autre enjeu) est celle de la transparence et de la confidentialité. La blockchain de SolarCoin ne prend pas compte cette limite car mis à part quelques différences notables avec d'autres blockchain comme celle de Bitcoin, elles partagent de nombreux points communs comme le fait que chaque utilisateur possède un pseudonyme protégé par une clé publique et clé privée, le fait qu'une blockchain publique cherche beaucoup de transparence, la confidentialité des utilisateurs n'est pas forcément très bien respectée. La blockchain de SolarCoin étant publique, ne déroge pas à cette volonté de transparence.

Enfin, puisque le SolarCoin ne faisant pas beaucoup d'intéressés (en tout cas, moins que le Bitcoin ou l'Ethereum), les coûts de stockage ne sont pas très importants. Mais si le réseau grandit, la quantité de données à stocker grandira d'autant plus, c'est un enjeu auquel la blockchain du SolarCoin devra faire face.

2.1.2.2. Valeur du SolarCoin et coûts qu'il engendre

Pour ce qui sont des coûts qu'engendre SolarCoin, il est utile de distinguer coûts de production et coûts initiaux. Ces premiers coûts ne sont pas élevés car le SolarCoin est distribuée gratuitement lorsqu'un utilisateur produit de l'électricité. Ce sont les coûts initiaux qui sont les plus élevés pour les producteurs car les investissements initiaux comprennent à la fois, l'achat, l'installation et l'entretien des panneaux photovoltaïques. Ces coûts varient en fonction de la puissance, le type et la taille du système solaire, de la région géographique, réglementations locales (par exemple TVA à taux réduit). En 2023, pour une installation entre 3 et 9 kWc (tout type de panneau confondus), l'investissement est estimé entre 8 000 et 23 000 € (Hello Watt, 2023).

La fiscalité entre en jeu également. Selon Engie, un particulier possédant un panneau photovoltaïque d'une puissance inférieure à 3kWc, il sera exonéré d'impôt. Dans le cas où l'installation dépasse la puissance de 3kWc, il y a 2 situations possibles (en plus du fait que les revenus doivent être déclarés au régime microentreprise). Si le revenu du particulier est inférieur à 70 000€, la somme des revenus du particulier sera d'abord réduite de 305% avant le calcul des impôts (1^{er} abattement), après 71% de ses revenus restants seront déduits avant le calcul des impôts (2nd abattement), ensuite 29% de ses revenus seront imposables (avec le taux habituel du particulier), enfin un 15,5% de prélèvements sociaux se fera sur les revenus après abattement (à la condition qu'ils soient supérieurs à 61€), selon Engie. En revanche, si les revenus dépassent 70 000€, ils devront être déclarés dans le cadre du régime RSS dans lequel il n'y a pas d'abattement. Ce régime contraint à respecter des obligations comptables propre à chacun.

Autre que les impôts, la TVA peut également s'adapter. En effet, selon Engie, la TVA peut être réduit de 20 à 10% dans le cas d'achat de panneaux photovoltaïques, à la condition que leur puissance ne dépasse pas 3kWc, qu'ils soient destinés à l'autoconsommation intégrale (et potentiellement à la revente en cas de surplus) et que la fin de la construction du logement date d'il y a au moins 2 ans. La TVA peut être également réduite (à 5,5%) en cas de rénovation énergétique, selon Engie.

En outre, il peut y avoir des coûts associés aux les frais de transaction en cas d'échange contre d'autres devises ou les utiliser pour des achats en ligne. Cependant, ces coûts sont

généralement inférieurs à ceux des méthodes de paiement traditionnelles, comme les cartes de crédit.

Pour le gérant de la blockchain (la Fondation SolarCoin), pour se donner un ordre de valeur, faisons un parallèle avec Bitcoin. Selon Marke (2018), pour que Bitcoin maintienne son réseau, il doit mobiliser 1,6 milliards de dollars par an. Pour SolarCoin, ces mêmes coûts ne sont que de l'ordre de 100 à 200 000 dollars par an, c'est-à-dire 8 à 16 fois moins que Bitcoin. De plus, le fait que la blockchain soit publique, les coûts de transaction associée ne sont pas très élevés. Si la blockchain avait été privée, le coût de la maintenance serait à prendre en compte en plus (entre autres). Donc, les coûts directement liés à la blockchain (sans prendre en compte les coûts d'installations) sont fiables (en tout cas, relativement à ceux qu'engendrent le Bitcoin).

Comme toute monnaie, qu'elle soit physique ou non, le SolarCoin est assujettie à des variations de valeur dans le temps (figure 3). L'objectif fixé par les fondateurs c'est est que la quantité en circulation doit atteindre 98 milliards d'unités, cet objectif devrait être atteint dans 40 ans (Beddiar et Imbault, 2018). Selon CoinMarketCap, moins de 64 millions de SolarCoins sont en circulation. On constate néanmoins que cette cryptomonnaie ne possède pas une notoriété importante sur le marché, peu d'échange ont lieu, hormis fin 2017 où le SolarCoin a atteint son point culminant en termes d'échange et de prix unitaire.

2.1.2.3. Valeur de la cryptomonnaie comme moyen d'incitation efficace ?

Le SolarCoin est donc une cryptomonnaie mais dont la valeur de sa demande. Selon Keynes, toute l'épargne n'est pas investie (contrairement à ce que je pouvais penser les néoclassiques) et il existe un arbitrage entre titres et liquidités (monnaie). La monnaie peut être demandée pour elle-même (préférence pour la liquidité). Il existe trois raisons à cette préférence : le motif de transaction (posséder des actifs liquides pour effectuer des transactions courantes) et le motif de précaution (dépenses imprévues, opportunités avantageuses) qui dépendent tous les deux du revenu, puis le motif de spéculation (pour acheter des titres et bénéficier de plus-values) qui dépend du taux d'intérêt. Cet arbitrage se fait sur le taux d'intérêt (prix de la préférence pour la liquidité). En l'occurrence, ce qui apparait le plus important pour les détenteurs de SolarCoins c'est l'utilité transactionnelle. Autrement dit, les détenteurs de la monnaie veulent pouvoir l'utiliser pour acheter des biens et services librement.

En outre, pour que le SolarCoin soit un moyen d'incitation efficace, il est nécessaire que la demande soit importante. En réalité, toutes les monnaies doivent connaître un effet de réseau

pour que la demande augmente. Autrement dit, le niveau d'intérêt d'une monnaie que portent les individus est d'autant plus grand que son nombre de détenteur croît : personne ne voudra d'une monnaie qui n'est utilisée que par un très nombre de personnes dans le monde, il n'y a aucun intérêt. L'effet de réseau du Bitcoin, par exemple, est très important, d'où le fait que cette monnaie soit très demandée et très chère (figure 22). Mais étant donné sa jeunesse, SolarCoin n'est pas utilisé par beaucoup d'utilisateurs qui l'accepte comme moyen de paiement, d'où le fait que son cours est très faible (figure 22).

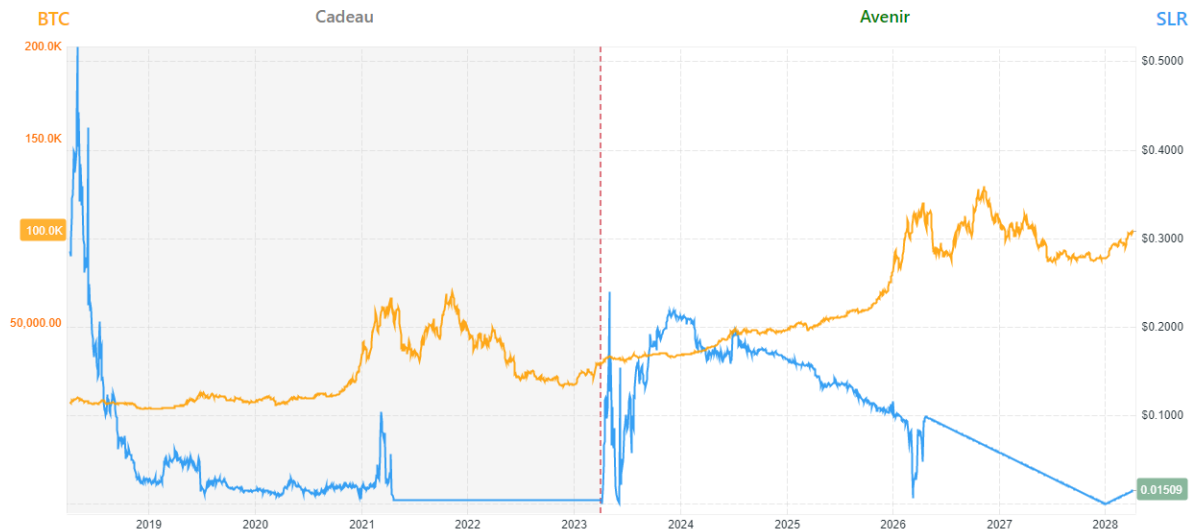


Figure 22 : Comparatif du cours du SolarCoin (en bleu) et du Bitcoin (en jaune) depuis 2018 et de leur prévision depuis début 2023 (pointillés rouge). **Lecture :** En mars 2021, un SolarCoin a pu valoir environ 0,1\$, tandis que le Bitcoin a pu valoir environ 50 000\$ à la même date. **Source :** Bitscreener.

La valeur sociale de cette monnaie est un atout fondamental pour gonfler sa notoriété : les détenteurs de cryptomonnaies risquent de préférer une monnaie associée à une meilleure responsabilité écologique à une autre, dans le futur. Surtout dans un contexte où le changement climatique inquiète de plus en plus. Son principal défi en termes de notoriété c'est la confiance associée à cette monnaie. Etant donné qu'elle ne soit qu'en phase de lancement, les utilisateurs n'ont peut-être pas assez confiance en elle. De plus, ils ne veulent possiblement pas l'utiliser parce qu'il n'y a pas beaucoup de vendeur qui l'accepte et donc, il est inutile de la posséder : le réseau est encore très petit.

Néanmoins, le SolarCoin peut remédier à cette faible notoriété en encourageant sa diffusion qui peut se faire avec plusieurs leviers. D'abord, le SolarCoin peut travailler et collaborer avec d'autres entreprises. C'est le cas d'EkWateur dont nous en avons parlé précédemment, qui peut recevoir des paiements en SolarCoin. Fin 2017, Lumo, la plateforme de financement participatif de projets d'énergie verte s'est notamment alliée à SolarCoin pour encourager son usage et,

plus généralement, celui de la blockchain, auprès des producteurs d'énergies renouvelables, selon le maGAZine. SMA²⁸ a également collaboré avec SolarCoin pour étudier le potentiel de cette cryptomonnaie pour elle-même et pour les utilisateurs de cette monnaie, selon le site de SMA.

Ensuite, SolarCoin peut mener des stratégies de marketing en ligne : création de son propre site²⁹ qui fournit des informations sur son fonctionnement et ses avantages, des FAQ et un onglet spécifique pour les partenaires actuels et futurs. SolarCoin est également présent sur quelques réseaux sociaux comme Facebook et Twitter dans lesquels ils partagent des actualités. Puis, certains sites et certaines personnes (sur YouTube³⁰ ou sur des pages de blog par exemple) sans liens avec l'entreprise, peuvent expliquer le fonctionnement du SolarCoin très simplement et ainsi atteindre un public plus large.

Enfin, SolarCoin est intégré dans quelques plateformes d'échange de cryptomonnaies dans lesquels les détenteurs de SolarCoins peuvent en échanger entre eux. Comme plateforme, nous pouvons citer Bittrex³¹ et CoinExchange³².

Le SolarCoin a été assujettie à des évolutions depuis sa création. La première qui peut venir à l'idée c'est la variation de sa valeur. Comme toutes les cryptomonnaies, la valeur du SolarCoin valeur a énormément fluctué. A titre d'exemple, selon Bitscreener, au premier janvier 2019 un SolarCoin équivalait à 0,027\$, un an plus tard il valait 0,015\$. Ces chiffres peuvent faire penser à une décroissance monotone de sa valeur, cependant, nous pouvons tout de même noter que le SolarCoin a connu des pics de valeur, notamment le 2 mai 2018 où la valeur a atteint son meilleur niveau (0,52\$) ou comme le 9 mars 2021(0,1\$).

Ensuite, il permet de faire augmenter la rareté du SolarCoin et ainsi faire grimper son prix. Etant donné que les détenteurs de jetons doivent prouver qu'ils possèdent des jetons pendant une certaine période, participer au processus de validation et gagner des jetons supplémentaires,

²⁸ SMA Solar Technology AG est une entreprise d'origine allemande spécialisée dans la production de systèmes de conversion d'énergie solaire. Cette entreprise offre des solutions de gestion d'énergie à n'importe qui (particuliers, entreprises, Etats)

²⁹ Site officiel de SolarCoin : <https://solarcoin.org/>

³⁰ « What is SolarCoin? SolarCoin for Absolute Beginners » sur YouTube : <https://www.youtube.com/watch?v=4ML1sfKWivQ>

³¹ Site de Bittrex : <https://global.bittrex.com/>

³² Site de CoinExchange : <https://www.coinex.com/>

certaines sont en quelque sorte désinciter à vendre leurs jetons. Cela peut entraîner une offre limitée sur le marché, ce qui peut conduire à une plus grande rareté et potentiellement débouché sur une augmentation de la rareté et donc à une augmentation de sa valeur (et donc la valeur du SolarCoin par extension).

En fait, le problème auquel est confronté le SolarCoin est sa notoriété encore insuffisante, il est encore dans sa phase de validation auprès de la société. Ce qui lui monterait la voie du salut serait que d'autres personnes réclament cette monnaie. Grâce à cela, le SolarCoin gagnerait en valeur et pourrait atteindre à la fois l'objectif fixé par les fondateurs (cf. produire 98 TWh d'électricité solaire) et atteindre le niveau de Bitcoin, à savoir utiliser le SolarCoin dans de nombreuses transactions quotidiennes. Mais pour l'instant, cette cryptomonnaie ne génère pas beaucoup d'incitation, étant donné sa très faible demande.

2.1.3. Enjeux écologiques de la blockchain de SolarCoin dans une production électrique plus respectueuse de l'environnement

Pour clôturer cette étude du SolarCoin, observons si les limites et enjeux de l'économie circulaire sont pris en compte par la blockchain de SolarCoin. Comme nous avons expliqué dans le premier chapitre que la blockchain engendrait des coûts énergétiques relativement important. Cependant, étant donné le passage de la méthode de la PoW à la méthode de la PoST, les coûts énergétiques ont été considérablement réduit car elle consomme 99,99999 % moins d'énergie que le Bitcoin (Beddiar et Imbault, 2018). La blockchain de SolarCoin a donc permis de réduire son impact énergétique.

En outre, comme elle se base uniquement sur la production et la consommation d'énergie solaire, la blockchain utilisée pour le SolarCoin n'est pas affectée par des impacts négatifs de thermodynamique, même si le réseau ne grandit. Si le réseau s'agrandit, cela implique certes que l'énergie utilisée s'accroîtra, mais cela implique d'abord que le nombre de participants de ce réseau blockchain augmente et donc la production d'énergie renouvelable également. Comme la PoST un algorithme qui consomme très peu d'énergie, l'augmentation de production d'énergie induite par un plus grand réseau sera plus importante que l'accroissement de la consommation d'énergie utile pour faire fonctionner le réseau. Cependant, il est nécessaire de garder en tête que l'agrandissement du réseau implique fatalement l'utilisation croissante de matériel informatique et de panneaux photovoltaïques qui nécessitent des composants qui peuvent avoir un impact environnemental. Pour les ordinateurs, le lithium est utilisé pour la fabrication de composants (batteries, transistors, diodes, etc.) mais son extraction perturbe et

endommage les écosystèmes locaux (habitats naturels, sols, eaux...) du fait de l'utilisation de produits chimiques nocifs et contribue à l'émission de CO₂ dans l'atmosphère à cause de l'utilisation d'énergie non-renouvelable. Pour les panneaux photovoltaïques, l'extraction de silicium pose des problèmes similaires que ceux engendrés par l'extraction de lithium (utilisation de produits chimiques et consommation d'énergie importante). Un autre matériau utilisé pour la fabrication de panneaux photovoltaïques c'est le cadmium qui cause le rejet de métal toxique dans les écosystèmes.

Autrement, même dans l'optique qu'elle s'agrandisse, la blockchain de SolarCoin ne sera pas assujettie à l'effet rebond. Pour rappel, il y a effet rebond lorsque la consommation d'énergie et/ou de matières premières évolue positivement avec l'efficacité environnementale, contrairement aux attentes (effet causé par un changement des comportements). Or, le SolarCoin est destinée à être performante énergétiquement (grâce à l'utilisation de la PoST), donc des économies d'énergies sont réalisées. Et la seule façon d'augmenter la consommation d'énergie est d'utiliser la PoST mais cette utilisation induit forcément une production énergétique en premier lieu. Donc peu importe si les comportements changent, la consommation énergétique suivra la production.

En conclusion, la blockchain de SolarCoin (et SolarCoin directement), un paradoxe temporel surgit. D'un côté, le SolarCoin est conçu pour prendre en compte les enjeux environnementaux en encourageant la production d'énergie solaire et en récompensant les propriétaires de panneaux solaires pour leur contribution à la transition vers une économie plus verte et durable. Son système de vérification fait que son fonctionnement nécessite moins d'énergie que d'autres cryptomonnaies, qui sont connues pour leur empreinte carbone élevée. Mais d'un autre côté ses objectifs se heurte à l'enjeu de réussir à s'adapter face à une potentielle future demande en constante augmentation. Mais cette augmentation réduira l'efficacité environnementale du SolarCoin, notamment à cause des effets négatifs de la thermodynamique et l'effet rebond. Même au niveau technique, une notoriété plus grande accentuera les limites associées à la blockchain, notamment sur la sécurité, la rapidité des transactions et la confidentialité des utilisateurs. Donc plus le SolarCoin sera proche de son objectif, plus les difficultés environnementales et techniques, faiblement présents à ce jour, s'accroîtront.

2.2. Le Microgrid : une blockchain pour l'indépendance énergétique

2.2.1. Des catastrophes naturelles qui incitent à prendre conscience des enjeux énergétiques

Selon Le Monde de l'Energie, tout a commencé en 2012 avec un projet d'autoconsommation collective dans lequel quelques maisons d'un quartier de Brooklyn, équipées de panneaux photovoltaïques, produisaient leur propre électricité. Les propriétaires de ces panneaux pouvaient stocker et consommer leur production grâce à de puissantes batteries, sans à contracter avec des fournisseurs (Beddiar et Imbault, 2018).

Le projet s'est développé en intégrant la technologie blockchain pour devenir un marché de l'énergie à part entière. Le financement de ce projet est de nature à la fois privée et public. Nous n'avons pas les chiffres exacts mais au niveau public, par exemple, le gouvernement de l'Etat New York a lancé le programme « Reforming the Energy Vision initiative³³ », géré par la New York State Energy Research and Development Authority (NYSERDA) et subventionner les projets de Microgrid de 40 millions de dollars dans tout l'Etat (mais on ne se sait pas le montant attribué au Microgrid de Brooklyn), selon Scientific American. Au niveau privée, LO3 Energy (dont Lawrence Orsini³⁴ en est le fondateur et le PDG, figure 23) a collaboré avec Siemens³⁵ Digital Grid et le fonds d'investissement next47 de Siemens. Selon le site de Siemens, la plateforme blockchain appartient à LO3 Energy, Siemens Digital Grid apporterait des solutions techniques destinés aux Microgrids et next47 finance soutient ces solutions en plus de fournir des expertises de projets et des conseils. A partir de là, le Microgrid de Brooklyn est défini comme un projet de système d'énergie distribuée qui a été inauguré dans le quartier de Gowanus et de Park Slope à Brooklyn, New York en 2016 (Beddiar et Imbault, 2018).

³³ Programme « Reforming the Energy Vision initiative » :
<https://www3.dps.ny.gov/W/PSCWeb.nsf/All/CC4F2EFA3A23551585257DEA007DCFE2?OpenDocument>

³⁴ Lawrence Orsini est un entrepreneur et défenseur de la technologie énergétique et durable. Selon lui, la technologie est la clé dans la transition vers une économie plus durable. En cela, le moyen d'y parvenir c'est la décentralisation de l'énergie.

³⁵ Site de Siemens sur le projet du Microgrid de Brooklyn :
<https://www.siemens.com/global/en/company/stories/research-technologies/energytransition/a-microgrid-grows-in-brooklyn.html>



Figure 23 : Lawrence Orsini sur le toit d'une maison à Brooklyn connectée au Microgrid. **Source** : siemens.com Global Website.

L'idée est apparue lorsque l'ouragan Sandy s'est abattu sur plusieurs Etats des Etats-Unis dont celui de New York en 2012. Les réseaux électriques (centralisés) se sont heurtés à des pannes à répétition. A partir de là, la vulnérabilité aux perturbations de ces réseaux centralisés est devenue une évidence pour les créateurs du Microgrid. En plus de cette fragilité, les créateurs ont voulu répondre au fait que ces réseaux n'étaient pas fiables. Pour ces raisons que qu'ils ont créé le Microgrid de Brooklyn, en particulier en cas de perturbations du réseau électrique principal. D'ailleurs, il a été testé avec succès plusieurs fois, notamment pendant la tempête de neige de janvier 2016, lorsque des pannes d'électricité ont touché une grande partie de la ville de New York. Le Microgrid a pu continuer à fournir de l'énergie aux structures à proximité. En outre, les créateurs du Microgrid avaient en tête plusieurs objectifs (figure 24).

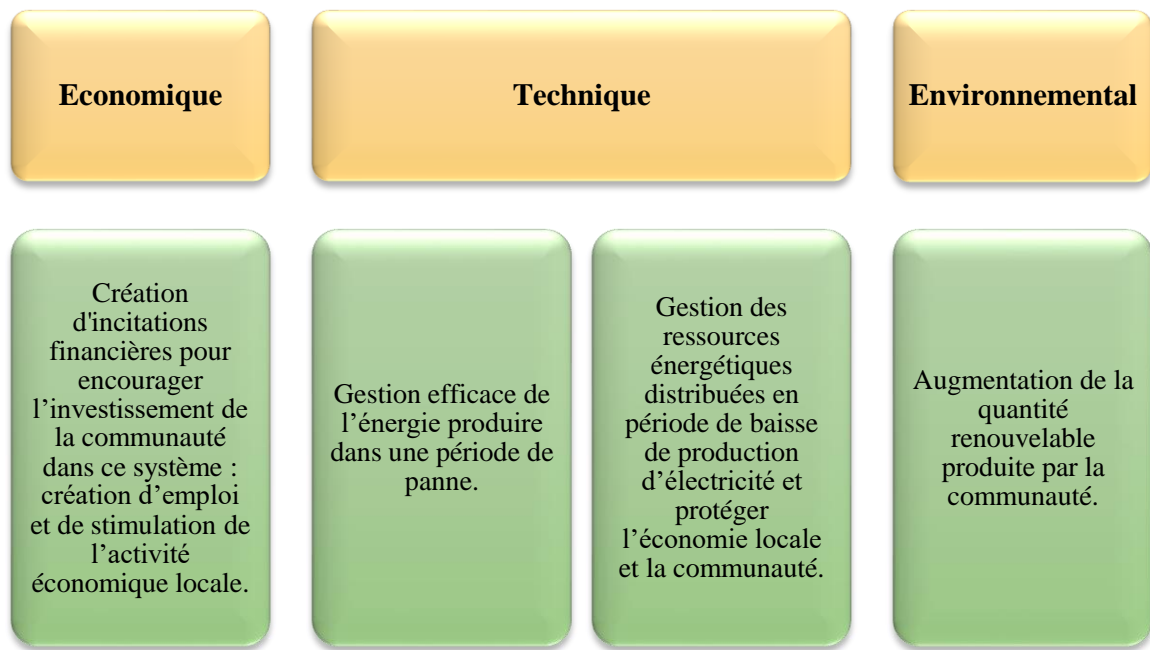


Figure 24 : Les objectifs fixés par les créateurs du Microgrid de Brooklyn d'ordre économique, technique et environnemental. **Source** : Beddiar et Imbault. Blockchain pour l'énergie, 2018.

2.2.2. Une blockchain privée sous Ethereum

Le Microgrid utilise une blockchain privée basé sur la plateforme Ethereum. Elle permet aux producteurs d'électricité de vendre leur excédent d'énergie aux consommateurs du même réseau. Ce système décentralisé combine transparence et sécurité permis par les *smart contracts* et les transactions de cryptomonnaies. Grâce aux *smart contracts*, les consommateurs et producteurs peuvent s'échanger l'excédent d'énergie (stockée dans des batteries, comme en 2012) qu'ils produisent en s'engageant sur des contrats qui ne peuvent pas être falsifiés.

Le Microgrid utilise le réseau d'énergie TransActive Grid (TAG), géré par LO3 Energy, comme nous l'avons expliqué précédemment (Beddiar et Imbault, 2018). Le TAG est un système de gestion de réseau électrique basé sur la blockchain qui permet aux participants de se connecter directement et de négocier des contrats d'électricité. Il stock et gère les transactions entre les producteurs et consommateurs sans passer par un intermédiaire (figure 25).

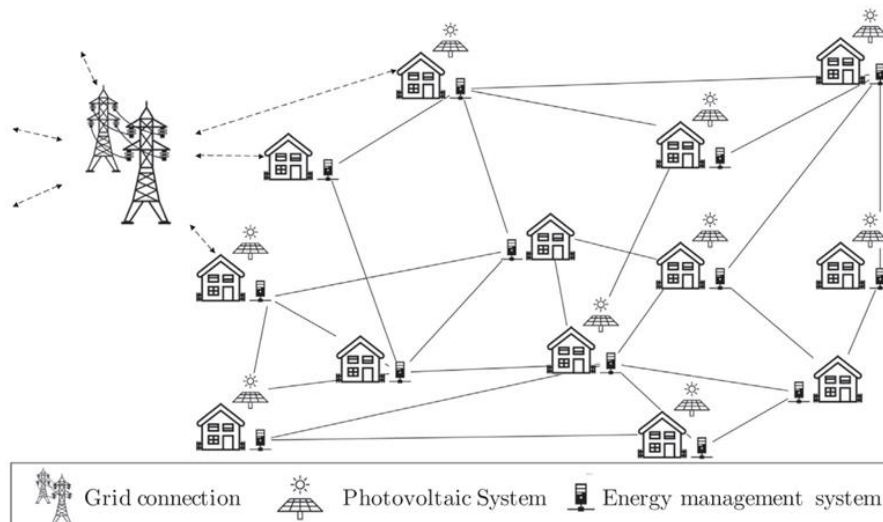


Figure 25 : Exemple de configuration d'un marché des Microgrids. **Source** : Mengelkamp *et al.* Designing Microgrid energy markets, 2018.

Pour valider les transactions, le TGA utilise l'algorithme de consensus *Proof-of-Authority* (PoA)³⁶. Contrairement à la PoW, il utilise un système de nœuds autorisés qui est géré par les responsables de la gestion de la blockchain. Plus précisément, cet algorithme est basé sur la réputation, c'est-à-dire que la personne qui valide les données met en jeu sa réputation et non pas de la cryptomonnaie, comme la PoW. Les personnes qui participent à la validation sont des modérateurs présélectionnés, notamment par un examen (absence de casier judiciaire, bonne réputation morale et engagement dans la tâche).

Grâce à la blockchain, la consommation et les échanges d'énergies sont systématiquement et automatiquement mis à jour et les consommateurs peuvent avoir plus d'informations sur leur(s) source(s) d'électricité. Pour fonctionner, le Microgrid utilise des sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne, ainsi que des générateurs de secours alimentés par du gaz naturel. Le Microgrid contribue à l'amélioration de la résilience de la communauté en leur permettant d'être moins dépendant des solutions centralisées et de faire face efficacement et de manière fiable à des perturbations.

Les coût d'un Microgrid dépend de sa taille, le nombre de personne concernée, l'identité de la ou des personnes qui financent ce projet, l'objectif à atteindre, etc. Et comme dans le cas précédent, les coûts initiaux sont les plus conséquent, ce qui va se confirmer avec notre état des

³⁶ Vidéo YouTube (en anglais) expliquant le fonctionnement du mécanisme de la proof-of-authority : <https://www.youtube.com/watch?v=rjsaa0tJ8Cw>

lieux : le coût du financement d'un Microgrid peut vite atteindre le million voire la dizaine (et plus) de million d'euros ou de dollars.

2.2.3. Le déploiement du Microgrid

2.2.3.1. Dans le monde

Cette technologie est en train de se développer partout dans le monde, en plus des Etats-Unis, de nombreux pays ont développé des projets de Microgrid, notamment le Japon, l'Inde et la France.

Du côté des Etats-Unis, le magazine Techniques de l'Ingénieur cite trois projets de Microgrid. Le premier est la construction sur 2 ans d'un système de production d'énergie électrique et thermique pour le contrôle de la température du campus de l'université de Howard à Washington DC. Ce projet est permis grâce à l'investissement de la compagnie Pareto Energy de 15 à 20 millions de dollars. Le deuxième projet de Microgrid nord-américain a été fondé par California Energy Commission pour tester si le campus de l'université de San Diego allait intégrer avec succès une production locale d'énergie (dont une partie provenant d'énergie renouvelable). Le projet RESCO fournit les 450 hectares du campus en électricité pour réguler la température. Le dernier projet a été lancé par l'armée étasunienne pour fournir l'US Army Garrison Fort Hunter Liggett en Californie en électricité. Le coût de ce projet est estimé entre 5 et 10 millions de dollars.

Du côté du Japon, la ville de Higashi Matsushima, a eu pour projet de reconstruire l'infrastructure énergétique en utilisant des Microgrid et une électricité décentralisée après le tremblement de terre (de magnitude 9), trois ans auparavant. Selon, le blog Power technology, ce projet a été inauguré en juin 2016. Le projet a été financé par le ministère de l'Environnement dans le cadre du Programme National de Résilience. La ville est composée de 70 maisons et 15 immeubles et grâce au Microgrid, elle peut continuer à fournir la ville en énergie pendant quelques heures suivant une panne du réseau principal. Il peut également rediriger le courant des résidences vers les hôpitaux et la salle communautaire pendant plusieurs jours.

En 2020, en plein épidémie de COVID-19, le cycle Amphan s'abat sur le Bengale occidental et le Bangladesh, plongeant ainsi une grande partie des Sundarbans dans le noir. L'île de Satjelia dans les Sundarbans a surpasser cette difficulté grâce aux Microgrids solaire mis en place par le World Wide Fund (WWF) Inde. Ce Microgrid a été conçu pour fournir de l'électricité propre aux installations importantes dans la zone. Il peut électrifier les habitations d'environ 3 000

habitants ménages selon WWF dont la majorité se situent en dessous du seuil de pauvreté. Le projet a également permis d'installer 90 lampadaires à énergie propre. Maintenant ce sont Gram Panchayats locaux qui sont propriétaires des systèmes énergétiques (et donc de la blockchain).

Du côté de la France, nous allons étudier un cas précis de Microgrid. Il s'agit du cas du quartier de Confluence, dans la ville de Lyon.

2.2.3.2. Cas de l'écoquartier Confluence

En juin 2016, Bouygues Immobilier a lancé le projet d'écoquartier Confluence, en plein cœur de Lyon, gardant en tête l'opportunité de produire à moindre coût. Les objectifs sont d'assimiler la technologie blockchain et dans le même temps, sensibiliser les « consomm'acteurs » d'un bâtiment à usage mixte de Lyon de prendre en considération et à améliorer leur utilisation de l'énergie localement produite. Le but à long terme est d'atteindre la neutralité énergétique d'ici à 2030 et de devenir un territoire à énergie positive (Beddiar et Imbault, 2018).

Ce projet concerne plus de 12 000 habitants dans une surface de 3,3 hectares de bâtiments à usage mixte. Cet ensemble de bâtiments se nomme « Hikari » qui produit de l'électricité solaire grâce à des panneaux photovoltaïques. Tout ceci est financé, principalement par l'union européenne (dans le cadre du programme Concerto³⁷) à hauteur de 4 millions d'euros, selon le site de Lyon Confluence, par l'Etat (via le Programme d'investissements d'avenir) et le WWF.

Ce projet est piloté par la Société Publique Locale (SPL) de Lyon Confluence et le Groupe Bouygues. En 2016, un consortium de partenaires (publics, privés et issus du comité éthique) a été signé. En plus de la SPL de Lyon Confluence et Bouygues Immobilier, ce consortium réunit par exemple la métropole de Lyon, Bouygues Énergies & Services, Enedis, Schneider Electric et WWF.

Le projet de Lyon Confluence utilise à la fois un *smart grid* et un Microgrid. La raison de cette double utilisation est simple : un des objectifs du projet c'est d'informer les habitants sur leur consommation d'énergie, d'où l'utilisation d'un *smart grid*. Le Microgrid est connecté au *smart grid* pour optimiser sa gestion et son intégration dans le réseau électrique global car le *smart grid* collecte les données en temps réel sur la production et la consommation d'énergie.

³⁷ Détails du financement du projet européen Concerto ici : <https://www.lyon-confluence.fr/fr/concerto-une-premiere-reconnaissance-europeenne>

La blockchain est l'outil qui permet de répondre à ces enjeux et ces objectifs. De plus, cette technologie permet d'apporter des informations de manière décentralisée et donc synonyme de, ce qui donne aux informations une certaine valeur. Avec cette combinaison des trois technologies, c'est toute la chaîne d'information qui fonctionne à l'énergie localement produite.

2.2.3.3. Analyse technologique du Microgrid de Confluence et de ses limites techniques

Beddiar et Imbault (2018) expliquent que le fonctionnement du dispositif (reposant sur la blockchain) dans le cas de l'écoquartier est structurée sur quatre couches (figure 26). La première représente un dispositif de mesure de consommation ou de production (par exemple : Enedis) relié à un oracle matériel pour garantir l'intégrité des données. La seconde est un agent blockchain qui sécurise les données de production et de consommation d'un abonné et les rend invisibles pour les autres abonnés. Autrement dit, l'agent génère des preuves cryptographiques et les lie puis les communique avec la couche suivante. Cette couche (qui est la couche blockchain) enregistre les preuves de manière distribuée et infalsifiable. Cette couche fonctionne selon un système de droits d'accès, elle est donc « permissionnée ». La dernière couche est une application smartphone qui permet aux personnes de visualiser ses informations.

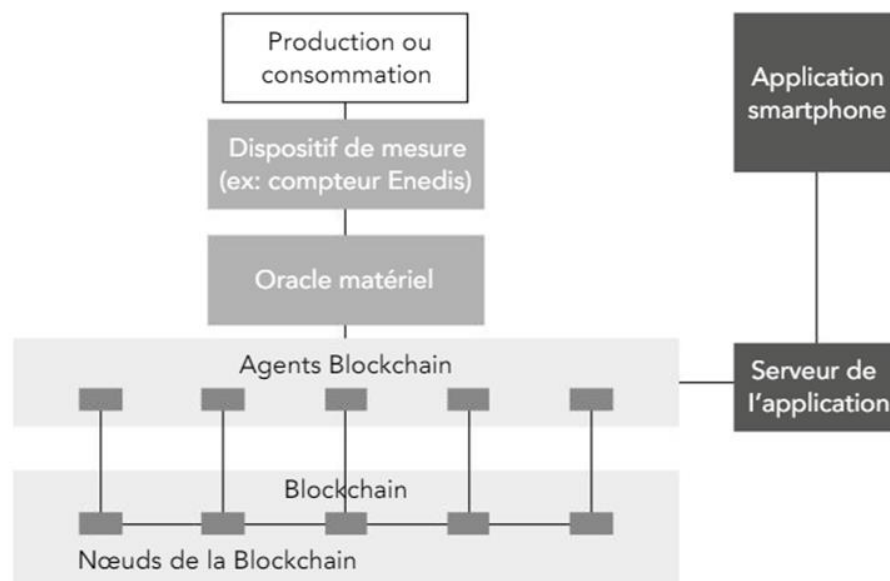


Figure 26 : Schéma de l'architecture du dispositif utilisant la blockchain. **Source** : Beddiar et Imbault. Blockchain pour l'énergie, 2018.

L'écoquartier Confluence affiche à la fois de très bonnes performances énergétiques et prône également la mixité sociale. En effet, selon le site de Lyon Confluence, 80% de la consommation d'énergie à partir de sources renouvelables produite sur place permettrait à la

fois de couvrir les besoins en eau chaude et en chauffage et de répondre à 50% de la demande en électricité du quartier. Ensuite, le projet concerne 600 logements dont des logements de haut de gamme (44%), standards (33%) et sociaux (23%).

Une blockchain de cette nature et un algorithme de consensus de ce type offre de nombreux avantages techniques qu'une blockchain publique. D'abord, une blockchain privée n'a pas vocation à grandir de la même façon qu'une blockchain publique, elle se cantonne à l'organisation qui l'a créée et les données ne sont pas aussi facilement manipulables. Du point de vue du stockage des données pour la blockchain d'un Microgrid, le problème ne se pose pas trop, elles sont relativement faciles à stocker sans se soucier d'un potentiel surplus massif.

Ensuite, vient à se demander si la blockchain d'un Microgrid n'est pas affecté par un faible débit et haute latence, autrement dit, si la quantité de données n'est pas assez importante pour ralentir le fonctionnement de la blockchain. Nous l'avons déjà dit mais la caractéristique principale de la méthode de consensus par la PoA c'est que les validateurs doivent être approuvés en amont, d'où le fait que le groupe de « modérateurs » sera finalement plus petit que dans le cas de la PoW. En cela, en un temps donné, le nombre de transactions sera plus important sous la PoA que sous la PoW. De plus, la blockchain d'un Microgrid doit gérer une quantité de données bien moindre que la blockchain de Bitcoin ou d'Ethereum par exemple.

En termes de sécurité, la blockchain d'un Microgrid est beaucoup plus avantageuse qu'une blockchain publique, notamment parce que les validateurs sont sélectionnés. C'est le cas par exemple de l'attaque des 51% que nous avons donné dans une sous-partie consacrée aux inconvénients de la blockchain. En effet, c'est pratiquement impossible de prendre le contrôle de 51% des autorités. La raison est simple, il est nécessaire que la majorité des validateurs (donc 51% ou plus) collaborent activement pour compromettre le réseau. Cependant, la PoA fait jouer la réputation des validateurs qu'ils ont intérêt à maintenir pour continuer à jouer un rôle dans le réseau. En outre, s'il n'est pas possible pour un validateur d'approuver une transaction, le réseau peut supprimer le processus de validation.

Nous avons également vu que dans une blockchain, il était nécessaire de faire un arbitrage entre transparence et confidentialité, surtout dans le cas d'une blockchain publique (donc décentralisée). Dans le cas d'une blockchain privée comme celle d'un Microgrid, le fond du problème est à peu près le même, mais pas pour les mêmes raisons. En effet, les validateurs (auxquels les utilisateurs accordent leur confiance) ont un pouvoir significatif sur le réseau et

peuvent potentiellement exercer une influence sur la validation des transactions. Dans une blockchain publique, cela peut être considéré comme un risque pour la transparence car il peut y avoir des préoccupations quant à la partialité ou aux éventuelles manipulations malveillantes. En outre, les validateurs ont généralement un certain niveau d'information sur les utilisateurs et leurs transactions. Cela peut potentiellement compromettre la confidentialité des utilisateurs.

2.2.4. Une efficacité environnementale ?

Maintenant nous allons faire le point sur cette étude de cas, c'est-à-dire voir si un Microgrid prend en compte les limites et enjeux environnementaux. Dans cette optique, on s'interrogerait en priorité sur l'algorithme de consensus et son impact énergétique. Contrairement à la PoW, la PoA n'a aucun rapport avec la résolution de calcul complexe nécessitant du matériel puissant, contrairement à son homologue énergivore. De ce fait, la PoA consomme énormément moins d'énergie que la PoW, selon le site Archipels. Cependant, il faut noter que l'énergie utilisée par la blockchain peut dépendre si elle est hébergée sur des serveurs alimentés par le Microgrid. Mais en général, les ordinateurs des utilisateurs sont alimentés par d'autres sources énergétiques.

Ensuite, la blockchain d'un Microgrid utilise des sources d'énergie renouvelables (énergie produite par les membres de la communauté) pour produire de l'électricité, notamment grâce aux panneaux solaires et stocke cette production grâce à des batteries de stockage d'énergie. Cela permet de réduire l'impact énergétique associée à la production d'électricité à partir de combustibles fossiles. Cependant, comme nous l'avons annoncé pour le SolarCoin, l'extraction de matières premières est nécessaire pour construire des panneaux solaires, des batteries et des ordinateurs, ce qui consomme beaucoup d'énergie (et qui ne proviennent pas forcément de sources renouvelables), mais la production d'énergie par un Microgrid peut largement compenser cet inconvénient. De ce fait, la blockchain d'un Microgrid des impacts négatifs de thermodynamique, mais sont largement compensés par ses avantages en termes de production d'électricité verte. De plus, les Microgrids sont également conçus pour améliorer la résilience des systèmes électriques locaux en cas de catastrophe naturelle, ce qui peut aider à minimiser les dommages environnementaux causés par les perturbations du réseau principal.

Pour conclure, cette analyse nous a montré que l'utilisation d'une blockchain privée Microgrid permettait d'obtenir des résultats énergétiques plus que satisfaisants. En effet, elle produit elle-même l'énergie à partir de sources renouvelables, sans engendrer d'impact

environnementaux assez conséquent pour contre balancer les avantages liés à cette production verte (faibles impacts négatifs de thermodynamique). C'est notamment grâce à l'algorithme de consensus PoA qui permet de produire de l'énergie sans à en beaucoup consommer en contrepartie. En somme, la blockchain d'un Microgrid est prometteuse puisqu'elle encourage la consommation locale d'énergie renouvelable en facilitant la gestion de la production et de la distribution de l'énergie, sans engendrer une impact environnementale significative.

2.3. CircularChain : pour une meilleure traçabilité et transparence des déchets

2.3.1. Qu'est-ce que CircularChain ?

Suez tente de répondre à un enjeu fondamental pour notre futur, celui de nourrir un nombre croissant d'individu. De plus, la loi n° 2020-105 du 10 février 2020 sur l'économie circulaire impose, entre autres, le principe selon lequel les déchets sont une ressource renouvelable, selon Légifrance. C'est pour ces raisons que le projet CircularChain³⁸ a été développé et lancé en 2020 par le groupe Suez et par Crystalchain, selon leur site web. C'est est projet nouveau en phase de test, dont les informations concernant le lancement final n'ont pas été dévoilé. Ce projet a pour objectif d'enregistrer et suivre les informations relatives à la production, à la collecte, au transport, au traitement et au recyclage des déchets (au cycle de vie), de manière à fournir une vue d'ensemble complète de leur cycle de vie. En bref, le projet vise à valoriser les déchets pour conférer à la production une certaine durabilité. Pour répondre à cet objectif le groupe Suez doit apporter plus de visibilité dans le flux des matières et doit attiser la confiance des acteurs. La blockchain est donc utilisée puisqu'elle est capable de fournir des informations fiables rapidement pour chaque étape du cycle de vie.

2.3.2. Un fonctionnement indépendant du cours des cryptomonnaies

Le dispositif fonctionne tout simplement (figure 27) et repose sur une blockchain permissionnée (donc privée). Sylvain Carlou, Président de Crystalchain et de la Commission blockchain affirme que cette blockchain l'algorithme de consensus PoA, que nous avons déjà détaillé dans l'étude cas précédente.

³⁸ Page web du Groupe Suez dédiée au projet de CircularChain : <https://www.suez.com/fr/actualites/accellerer-la-transition-vers-economie-circulaire-aide-blockchain>

A présent nous allons détailler toutes les étapes du dispositif que prévoit CircularChain. D'abord, les producteurs de déchets et les transporteurs peuvent ajouter des informations sur la blockchain relatant des caractéristiques des déchets (quantité, localisation, état, etc.). Ces déchets sont en réalité des eaux usées et boues d'épuration qui proviennent des stations d'épuration. Ensuite, les informations ajoutées sont vérifiées par un groupe de validateurs approuvés par Suez en utilisant donc la PoA pour s'assurer que toutes les informations sont valides et conformes aux règles du réseau. Une fois que les informations sont validées, elles sont enregistrées dans des blocs de la blockchain, qui sont connectés les uns aux autres de manière chronologique et sécurisée. Enfin, les informations sont consultables en temps réel par les acteurs via le portail SludgeAdvanced de SUEZ, ce qui leur permet de suivre les déchets tout au long de leur cycle de vie.

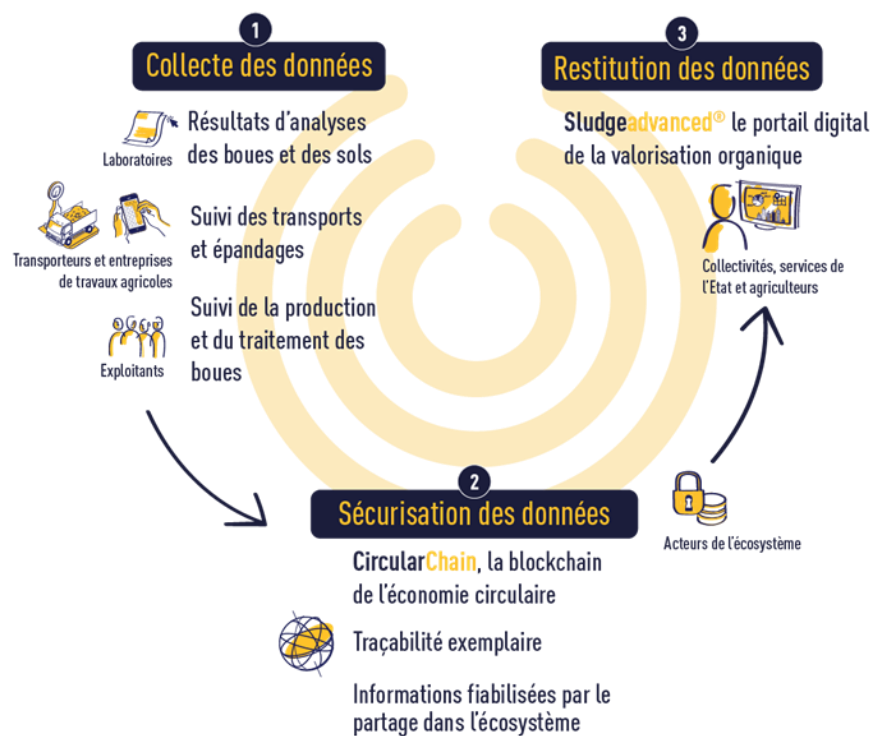


Figure 27 : Architecture schématique du dispositif prévu par le projet CircularChain. **Source** : Groupe Suez.

En fait, la blockchain du projet CircularChain n'est pas publique car ne concerne qu'un nombre restreint d'individus, sans compter le groupe Suez lui-même. En effet, en amont du dispositif il y a les producteurs de déchets (stations d'épuration), les entrepreneurs agricoles, les transporteurs et les laboratoires (pour les analyses). Et en aval nous avons les collectivités aux alentours, l'Etat et les agriculteurs qui souhaitent avoir les informations concernant les déchets. De plus, cette blockchain n'utilise absolument pas de cryptomonnaie, contrairement

aux cas précédents. Ce projet se concentre uniquement sur les des informations non-monétaires, par conséquent, cette blockchain n'est pas connectée au marché des cryptomonnaies.

Il y aurait plusieurs avantages à ce projet. D'abord selon Suez, la production de 35 000 tonnes d'azote de synthèse et l'extraction minière de 30 000 tonnes de phosphore peuvent être évités grâce à la valorisation des déchets des stations d'épuration si on les réutilise comme engrais. D'ailleurs cet engrais respectueux de la nature soutient l'activité des agriculteurs en réduisant les coûts liés aux transports et à l'utilisation de l'eau. Finalement, le traitement de l'eau et l'agriculture génèrent moins de carbone et les sols sont approvisionner en matière organique. La traçabilité en elle-même permet par exemple aux agriculteurs d'avoir une plus grande confiance quant à l'origine de ces engrais biologiques.

Cependant, comme toute technologie, celle-ci comporte à la fois des avantages et des limites techniques. Nous avons explicité que la blockchain de CircularChain est une blockchain privée utilisant la PoA. Grâce à cet algorithme de consensus, cette blockchain n'est pas victime d'un faible débit ainsi qu'une haute latence des flux d'informations. En effet, étant donné qu'elle ne nécessite pas de calcul pour valider les transactions, celles-ci sont valider beaucoup plus rapidement. Par exemple, si les agriculteurs veulent s'informer sur les engrais dont ils ont le projet d'en utiliser, ils peuvent le faire plus rapidement. Cet avantage tient à la quantité de donné qui est considérablement réduite car les données sont multipliées seulement aux nœuds autorisés. En outre, la PoA renforce également la sécurité de la blockchain car ce sont des validateurs sélectionnés et qui ont été au préalable formé et dont le casier judiciaire était vierge, qui valident les transactions. La PoW est par exemple très efficace contre l'attaque des 51% : il est difficile que plus de la moitié des validateurs soient corrompus. De plus dans le cas où il n'est pas possible de vérifier une transaction, du fait de l'indisponibilité des validateurs, elle sera automatiquement refusée.

Néanmoins, la PoA induit forcément une diminution de la centralisation. En effet, seul un petit nombre d'individu est autorisé à valider les informations, contrairement à la PoW où l'identité des mineurs importe peu. Ce manque de décentralisation peut conduire à des préoccupations en matière de gouvernance, car une blockchain est, par définition décentralisée où personne n'a vraiment la main sur la validation des données. Cela pose également des problèmes de confiance. En théorie, les utilisateurs de la blockchain peuvent accorder leur confiance envers les validateurs étant donné leur certification préalable, mais ils peuvent également se poser la question sur les vrais intentions des validateurs.

2.3.3. Un algorithme de consensus faite pour une blockchain verte

Pour finir, passons en revue si la blockchain de CircularChain prend en compte les limites environnementales. Malgré le manque d'information au sujet de ce projet et ainsi que sa jeunesse, peu d'informations peuvent être récoltées à ce jour. Néanmoins, nous savons que cette blockchain utilise la PoA comme mécanisme de consensus. De ce fait, cela induit un double avantage : peu d'énergie est nécessaire pour vérifier les informations du fait de l'inexistence de calcul mathématiques à résoudre (comme avec la PoW) mais aussi une plus faible émission de carbone du fait d'une plus faible consommation énergétique. De plus, la PoW nécessite du matériel informatique très spécifique qui s'use à mesure que les mineurs l'utilisent (donc plus il y a de mineurs plus la quantité de matériel informatique dans le réseau augmente), ce qui engendre une quantité de déchets (pas forcément recyclable et revalorisée plus tard) très importante (figure 17). La PoA ne nécessite pas de matériel informatique particulier et donc génère beaucoup moins de déchets que la PoW.

2.4. Plastic Bank : vers une transition écologique et une intégration sociale

2.4.1. Une blockchain au service des populations pauvres

Selon le journal 20 minutes, Plastic Bank est une start-up sociale et solidaire fondée par David Katz et Shaun Frankson en 2013. L'objectif de cette start-up est triple et correspond avec la vision du développement durable (figure 28) : atteindre la durabilité. Plus précisément, l'organisation veut agir dans les pays où se concentrent les populations les plus pauvres. En général, dans ces pays, les infrastructures publiques de collecte et de recyclage des déchets sont très inefficaces. Plastic Bank compte faire ça en réduisant la pollution plastique dans les océans tout en offrant aux communautés des avantages économiques pour les aider à sortir de la pauvreté. Pour cela, c'est de faire des déchets plastiques une monnaie dans les communautés où l'organisation agit. C'est rendu possible grâce à la blockchain.

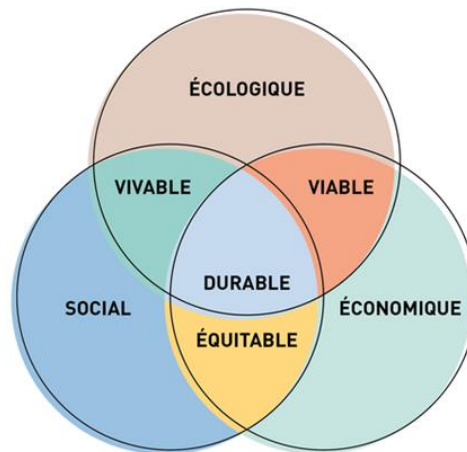


Figure 28 : Les trois piliers du développement durable. **Lecture :** Pour qu’une activité soit qualifiée de « durable », elle doit permettre une croissance des marchés, tout en préservant les ressources naturelles, en répartissant bien les richesses produites et en respectant les droits, les libertés et les besoins de l’Homme.

Source : Atelierpopulaire.fr.

Selon le site web de Plastic Bank³⁹, cette organisation à but non lucratif entretient des partenariats avec 150 autres organisations pour atteindre ses objectifs. Ces partenariats se divisent en deux groupes distincts.

D’abord, nous avons les « Impact Guarantee Partner » qui comptent la part majorité de la totalité des partenaires. Ils soutiennent Plastic Bank dans leur lutte dans la pollution plastique des océans. Ce soutien s’exprime, entre autres, par des financements ou par des expertises techniques. Ces partenaires peuvent également travailler avec Plastic Bank pour développer des projets communs pour répondre aux besoins de durabilité (en termes de développement durable : économie, social et environnement). Comme partenaire de ce type nous pouvons citer Biolage qui est la marque leader de soins capillaire selon le site de Plastic Bank. Cette marque se donne pour mission principale de guider les consommateurs dans les choix de produits capillaires plus respectueux de l’environnement. Nous pouvons également citer Charles & Keith Group, heydrate, etc.

Ensuite, nous avons les « Social Plastic Partner » qui regroupe les organisations locales qui achètent les plastiques de Plastic Bank en les intégrant dans leur chaîne d’approvisionnement. En cela, ils peuvent bénéficier d’une certification de durabilité ainsi que d’une valorisation de leur image. Parmi ces organisations nous pouvons citer Henkel qui utilise le plastique récolté par Plastic Bank dans l’emballage de certains de ses produits comme l’adoucissant Vernel, le

³⁹ Site web de Plastic Bank : <https://plasticbank.com/>.

nettoyant de surface Sidolin ou comme le nettoyant pour salle de bain Biff, selon le site de Plastic Bank. Nous pouvons également citer SC Johnson et ScanCom International.

L'activité de Plastic Bank est permise grâce à la blockchain Hyperledger Fabric et à ses avantages. En réalité, Hyperledger Fabric est des systèmes blockchain les plus populaires parmi les autres systèmes proposés par Hyperledger (le projet open source principal). Selon IBM, cette blockchain est un projet open source⁴⁰ de la Linux Foundation⁴¹. Du fait sa modularité et sa polyvalence, elle est adaptée pour les entreprises qui veulent intégrer la blockchain dans leur(s) activité(s).

2.4.2. Principe de la start-up

Le principe de la start-up est assez simple et peut se résumer par la figure 5 provenant du site web de Plastic Bank (figure 29). En commençant par le volet environnemental, des centres de collecte de plastique ont été mis en place dans des communautés démunies d'infrastructures adaptées (*recycle*). Les membres de la communauté de collecte, équipés de kit de collecte (outils et vêtements), peuvent apporter leur plastique trouvés à moins de 50 km (*collect*). Les membres pèsent ensuite leur collecte pour pouvoir faire un échange qui sera enregistré dans l'application PlasticBank (*exchange*). Cette application permet aux membres de vérifier leur solde, de trouver des centres de collecte et de faire des transactions. Du côté des entreprises, elle permet de se connecter avec les membres de la communauté pour acheter des crédits et les utiliser pour produire leurs produits (durables).

Dans le volet social, les membres échangent les plastiques contre de l'argent, des crédits (*reward*), des produits de base ou contre des avantages améliorant les conditions de vie comme des soins de santé, des services bancaires, etc. (*icentivize*). Les centres de collecte peuvent proposer des formations sur la gestion de déchets ou sur l'éducation à la santé, par exemple (*empower*).

Pour ce qui est de l'ordre économique, les plastiques récoltés sont transformés par des partenaires en granulés de plastique de haute qualité qui en ressortent sous le nom de Social Plastic (*reprocessing*). Ces granulés peuvent plus tard constituer une matière première pour

⁴⁰ Un projet open source est un projet de développement de logiciel qui permet à quiconque de voir, d'utiliser et de modifier le code source librement et gratuitement.

⁴¹ Site web de la Linux Foundation : <https://www.linuxfoundation.org/>.

d'autres entreprises pour fabriquer des produits durables (*renewal*). La mention de « Social Plastic » est source de confiance pour les consommateurs et donc donne de la valeur à la marque (*consumption*).

En allant plus loin, Plastic Bank aide à créer des emplois et à stimuler l'économie locale. En effet, les centres de collecte emploient la population locale pour trier, peser et collecter le plastique. Cette aide à l'emploi apparaît également lorsqu'il s'agit de transformer des plastiques collectés. A partir de là, nous pouvons voir que Plastic Bank aide l'économie des communautés à la fois directement et indirectement. D'une part, l'emploi créé directement par la start-up offre une source de revenus supplémentaire aux travailleurs qui vont ensuite acheter des biens et/ou services, ce qui va stimuler l'activité et l'emploi. De plus, dans le cas où des crédits sont distribués, les bénéficiaires pourront les utiliser pour acheter des biens et/ou services, ce qui stimule l'activité et l'emploi (indirectement).



Figure 29 : Le fonctionnement de la start-up leviers de Plastic Bank pour atteindre ses objectifs. **Lecture** : On peut diviser son fonctionnement en trois volets : économiques, environnementaux et sociaux qui sont respectivement représentés en bleu, gris et vert. **Source** : Plasticbank.com.

Plastic Bank a pour ambition de s'implanter dans les populations les plus démunies (donc pauvres) pour les débarrasser du fléau écologique mais aussi pour leur apporter des solutions d'ordre économiques et sociales. Dans l'optique d'aide aux pays pauvres, la start-up a notamment créé des centres de collecte de déchets à Haïti, dans les Philippines, en Indonésie et

à Rio de Janeiro. Pour ces populations, les déchets peuvent s'échanger contre des crédits téléphone, de l'électricité, des ampoules rechargeables, des connexions WIFI, etc.

Selon le site 20 Minutes, la start-up s'est installée depuis 2015 à Haïti et plus de trente points de collecte ont été créés et alimentés par les membres de la communauté comptant plusieurs centaines de personnes. De plus, Plastic Bank a conclu un partenariat avec environ cinquante écoles pour lesquelles les frais de scolarité peuvent être réglés avec l'argent obtenu par la collecte des plastiques.

Selon le journal 20 minutes, Plastic Bank ambitionne d'étendre son activité de dépollution des plastiques des océans dans d'autres pays défavorisés comme l'Égypte, la Thaïlande, le Vietnam et la Colombie. Ce sont des implémentations stratégiques car le Nil et le Mékong sont parmi les dix fleuves au monde qui rejettent le plus de déchets plastiques.

2.4.3. Une blockchain basée sur Hyperledger Fabric

La blockchain utilisée par Plastic Bank est privée et a pour but de suivre et de vérifier toutes les transactions concernant les plastiques collectés, traités et échangés en temps réel dans les centres de collecte. Ainsi, les transactions sont effectuées de manière transparente et permanente. Le but est de tracer l'origine des déchets tout au long du processus de (re)production.

La question est maintenant de savoir comment Plastic Bank maintient le succès (local) de son activité. L'organisation met en place un système de récompenses pour les membres qui collectent les plastiques, grâce à la blockchain. Ses récompenses prennent la forme de « tokens » (des jetons) cryptographique qui peuvent ensuite être échangés contre de l'argent, des produits ou des services. Ces tokens ne sont ni plus ni moins que la représentation numérique des crédits, comme la monnaie d'ailleurs.

Comme nous avons annoncé précédemment, la blockchain de Plastic Bank est privée, mais est aussi de type permissionnée. Nous avons déjà vu que dans ces cas comme celui-ci et dans lesquels l'algorithme de la PoA est souvent utilisé. Ce n'est pas le cas ici, car Hyperledger Fabric fonctionne avec l'algorithme de consensus *Pluggable*, selon IBM. En plus clair, cet algorithme peut être configuré selon les besoins de l'entité qui l'utilise. Il regroupe d'autres algorithmes comme la *Practical Byzantine Fault Tolerance* (PBFT) qui est utilisé par Plastic Bank. La raison de ce choix tient au fait que l'identité de chaque membre soit connue. Selon le

site Blockchains Expert, cet algorithme est très adapté pour des blockchains privées et/ou permissionnées, ce qui est le cas ici.

Le principe de la PBFT c'est de résister aux attaques malveillantes causées par des nœuds défectueux et/ou non autorisés. Les nœuds de la blockchain utilisant cet algorithme sont classés séquentiellement : un nœud principal et les autres sont des nœuds secondaires. L'idée est que si un nœud principal tombe en panne ou tente d'agir de manière malveillante, un nœud secondaire peut assumer le rôle de nœud principal. En plus, à chaque consensus appliqué, le rôle de nœud principal est assumé par un autre nœud.

Selon CaptainAltcoin, l'algorithme PBFT est caractérisée par un cycle comportant trois phases. La première phase correspond au moment où le nœud principal annonce au groupe de nœud la transaction sur laquelle il faudra se mettre d'accord : il envoie un message "pré-préparer". Durant la seconde phase, chaque nœud valide individuellement la cohérence de l'enregistrement et diffuse un message de à tous les autres nœuds pour la dernière phase. Elle consiste à regrouper l'autorisation (ou pas) des autres nœuds, si la majorité (les deux tiers au moins) ont validé la demande, alors elle est ajoutée à la blockchain.

2.4.4. D'autres utilisations de Hyperledger Fabric ?

Comme nous avons précisé plus tôt, Hyperledger Fabric est une blockchain très modulable. Cela signifie qu'elle applicable dans un large éventail de domaines (cf. 4.3 du chapitre 1^{er}). Selon IBM, plus de 148 entreprises utilisent Hyperledger Fabric. Cette blockchain est très populaire auprès des entreprises privées et ne cessent de gagner de l'ampleur. Le site web d'Hyperledger Foundation nous offre de nombreuses études de cas⁴², dont quatre que nous allons maintenant présenter.

L'une d'entre elles concerne l'entreprise Walmart. L'utilisation de Hyperledger Fabric a été alimentée pour répondre à l'enjeu que devait faire face Walmart selon lequel l'origine d'une maladie alimentaire devait être retracée afin de ne jeter que les produits de l'exploitation (ou les exploitations concernées), et donc réduire le gâchis alimentaire. Pour ce faire, Walmart a créé un système de traçabilité alimentaire basé sur Hyperledger Fabric. Deux projets ont été menés pour tester le système : un pour le traçage des mangues vendues dans les magasins

⁴² Pour plus se renseigner sur d'autres étude de cas, voir à cette adresse : <https://www.hyperledger.org/learn/case-studies>

Walmart aux Etats-Unis et le deuxième s'intéressant aux porcs vendus dans les magasins Walmart chinois. Les projets ont porté leurs fruits. D'ailleurs, Walmart ambitionne de déployer ce système pour d'autres produits.

Un autre exemple d'utilisation du système de blockchain s'applique dans le monde de la fiscalité et plus précisément du projet taXchain qui voulait créer un réseau blockchain pour échanger des formulaires fiscaux numérisés. L'entreprise, par ces formulaires fiscaux numériques, voulait gagner à la fois du temps et de l'argent, construire une plateforme ouverte et flexible pour toutes les entreprises de l'Union Européenne. Finalement, les coûts pour un remplir un formulaire ont été réduit de 75% et le temps pour le remplir est passé de quelques jours à quelques minutes.

Hyperledger Fabric a été utilisé par Change Healthcare, un système de santé américain, pour prouver qu'une blockchain pouvait traiter des centaines de transactions de soins de santé en une seule seconde. Pour le contexte, en 2017 et 2018, le réseau Change Healthcare a du traité environ 14 milliards de transactions de soins de santé valant 1 000 milliards de dollars. Les attentes de Change Healthcare ont été respecté dans le sens où Hyperledger Fabric a pu traiter jusqu'à 50 millions transactions par jour où 550 transactions en seule ont pu être traité au maximum.

Pour finir avec les études de cas présentés par Hyperledger Foundation, Honeywell Aerospace est un exemple d'entreprise fournisseur de pièces d'avion utilisant Hyperledger Fabric. L'entreprise voulait créer se créer une place dans le marché pour les pièces d'occasion d'avion en plus de vouloir réduire le temps d'achat des pièce et de pouvoir retracer les origines de chaque pièce. La blockchain a également été utilisée pour enforcer la confiance que les acheteurs pouvaient accorder aux pièces. L'entreprise a réussi à générer un chiffre d'affaires de 4 millions de dollars moins d'un an après l'adoption de la blockchain. Le temps d'achat a été réduit de quelques jours quelques minutes. De plus, les contrefaçons sont d'autant plus facilement détectables.

Pour ce qu'il y est de l'économie circulaire, d'autres projets ont été lancés dans cette optique (Baralla *et al.*, 2023). Les auteurs ont sommairement listé des projets utilisant des plateformes différentes et ont compter six projets utilisant Hyperledger Fabric (dont Plastic Bank). Par exemple, le projet pilote EME datant de 2020 utilise cette blockchain pour tracer l'excès de matériaux tout au long de leur cycle de vie. Enfin, le projet KleanLoop de 2019 se concentre

sur le fait d'optimiser les données de recyclage du commerce des déchets de manière transparente en utilisant la cryptomonnaie du KleanCoin.

2.4.5. Les deux faces d'Hyperledger Fabric utilisant la Practical Byzantine Fault Tolerance

D'abord, la flexibilité et la modularité d'Hyperledger Fabric implique de nombreux atouts techniques comme le stockage de données. En effet, cette blockchain donne. Ainsi, la blockchain peut être de petite taille et de réduire la quantité de données stockée et donc le coût de leur stockage. Mais si la taille de la blockchain vient à grandir, l'entreprise devra mettre à jour l'infrastructure pour continuer à répondre aux besoins sans faire face à des problèmes de stockage. Dans le cas de la blockchain de Plastic Bank utilisant la PBFT, le problème de stockage est un inconvénient car cet algorithme nécessite une grande communication entre les nœuds (*via* des messages) Par conséquent la quantité de données se multiplie et la taille de la blockchain également à cause du fait que chaque nœud doit stocker une copie de toutes les transactions

Pour une blockchain le problème d'un faible débit et d'une haute latence est un vrai défi. La blockchain d'Hyperledger Fabric, grâce à sa modularité, peut maximiser son débit et minimiser sa latence. Le cas de Healthcare Change en est la preuve : 550 transactions par secondes atteint, contrairement au Bitcoin avec 7 transactions par secondes. Malheureusement, si cette blockchain utilise la PBFT, cet avantage est réduit étant donné la quantité de données stockée.

Grâce à son architecture modulaire, le niveau de sécurité et le niveau de transparence d'Hyperledger Fabric sont assez élevés puisque c'est l'entreprise qui contrôle l'accès aux données, mais le niveau de confidentialité est impacté puisque c'est une entité centrale qui joue le rôle de médiateur, comme toutes les blockchains permissionnées en général. C'est à peu près le même cas si la PBFT est utilisée. La différence majeure (et principal problème de cet algorithme), c'est en cas d'attaque de type Sybil⁴³. Des pirates peuvent alors corrompre le réseau et ainsi devenir la majorité (les deux tiers des nœuds devant valider ou non une transaction).

⁴³ Une attaque de type Sybil est une attaque informatique où un pirate crée plusieurs fausses identités virtuelles pour occuper la majorité d'un système. Ce type d'attaque est difficile à contrer, car il est difficile de distinguer les vraies des fausses identités. De plus, si de fausses identités ont été découvertes et bloquées, le pirate peut en créer d'autres.

2.4.6. Prise en compte des limites environnementales ?

L'objectif est maintenant si cette blockchain est réellement un outil souhaitable du point de vue de l'économie circulaire. Cependant, nous avons dit que la blockchain d'Hyperledger Fabric présente l'avantage principal d'être hautement modulaire, évolutive et flexible. Cela s'explique en partie par le fait qu'une entreprise a l'opportunité d'avoir le choix aux pour moduler sa blockchain en fonction de ses besoins et ses objectifs. Cela passe par le choix de l'algorithme de consensus le plus adapté. C'est pour cela que nous allons à chaque fois faire la différence entre Hyperledger Fabric de manière générale (sans algorithme de consensus précis) et Hyperledger Fabric utilisant la PBTF, comme celle qu'utilise Plastic Bank.

Hyperledger Fabric vise à améliorer l'efficacité énergétique grâce à son architecture modulaire et à la possibilité d'algorithmes de personnalisation en fonction des besoins de l'entreprise. Cela peut aider à réduire la consommation d'énergie et à réduire le plus possible l'impact environnemental. L'algorithme PBTF peut réduire considérablement la consommation d'énergie requise pour les transactions de vérification, car elle ne nécessite aucun hachage pour ajouter de nouveaux blocs à la blockchain de base.

L'impact négatif de la thermodynamique est un problème lié au processus de vérification des transactions. Cependant, Hyperledger Fabric est basée sur des canaux de communication privés. Cette méthode réduit le nombre de nœuds impliqués dans le processus de consensus. D'où le fait d'une moindre nécessité de l'utilisation de matériel informatique. C'est généralement le cas pour Hyperledger Fabric avec ou sans PBTF.

Enfin, en ce qui concerne l'effet-rebond, Hyperledger Fabric est conçu pour permettre aux entreprises de personnaliser les politiques de validation des transactions, ce qui peut aider à minimiser l'effet-rebond et à réduire la consommation d'énergie. La PBTF peut également minimiser l'effet-rebond si l'entreprise gère cette blockchain choisit une configuration plus restrictive de la validation des transactions en réduisant le nombre de nœuds impliqués dans le processus de consensus ou en augmentant les critères de validation.

Pour conclure, la blockchain Hyperledger Fabric utilisant l'algorithme de consensus PBFT a des avantages plus ou moins importants à la fois environnementaux et techniques (sauf quand il s'agit du stockage des données), à la condition de bien configurer le réseau. Dans le cas

contraire, les problèmes techniques et environnementaux contre balanceraient l'utilité de la blockchain à visée écologique, voire se révélerait contre-productif.

3. Analyse critique et bilan du déploiement de la blockchain pour l'économie circulaire

La technologie blockchain est relativement nouvelle, contrairement à l'économie circulaire. Cette première présente de nombreux avantages, notamment en ce qui concerne la transmission d'informations et leur stockage. Cela peut être utile pour l'économie circulaire si le parcours des produits ou des déchets doit être retracé, notamment pour faciliter leur traitement (réutilisation ou recyclage). Cependant, nous avons constaté que chacune de ces innovations présentait des inconvénients. Nous avons donc analysé si les inconvénients de l'économie circulaire pouvaient être résolus par la blockchain.

La réponse n'est pas unique. En effet, il existe un très grand nombre de configurations possibles pour une blockchain (privée ou publique, petite ou grande, algorithme de consensus choisi, etc.). Nous sommes dans une période où le déploiement de la blockchain pour l'économie circulaire en est encore à ses débuts, et il faudra attendre quelques années pour que ce duo atteigne sa phase de maturité. Par conséquent, les concepteurs et les utilisateurs ne connaissent pas encore parfaitement tous les aspects de cette combinaison, d'où la nécessité d'attendre et d'apprendre au cours de cette période : « *learning by doing* ». En raison de sa jeunesse, les politiques publiques peuvent certes apporter leur soutien financier, mais elles ne peuvent pas apporter une protection juridique en raison de l'incertitude entourant l'aspect légal de la blockchain. De plus, dans certains pays, la question environnementale n'est pas une priorité, ce qui constitue une autre barrière au soutien accordé aux concepteurs de blockchain écologique.

Les coûts d'installation d'une blockchain peuvent également dissuader les entreprises de se lancer dans un projet de cette envergure. De plus, l'absence de garantie quant à l'avenir ne peut pas les rassurer. De nombreux projets de blockchain écologique sont d'ailleurs tombés en désuétude, renforçant les craintes des potentiels propriétaires et/ou concepteurs de blockchain écologique.

Malgré ces défis, de nombreux projets ont vu le jour et continuent encore aujourd'hui de fonctionner. Comme nous venons de le dire, il est difficile de déterminer s'il est judicieux ou non d'intégrer la blockchain dans une activité à vocation environnementale, car les blockchains ne sont pas toujours comparables entre elles. Cependant, grâce aux différentes études de cas

exposées dans cette partie, nous pouvons tout de même présenter un certain nombre d'éléments qui peuvent répondre au moins partiellement aux hypothèses que nous nous sommes posées.

De manière générale, la blockchain ne permet pas de résoudre tous les problèmes associés à l'économie circulaire, elle ne peut que les minimiser. De même, quelle que soit la blockchain, tous les inconvénients liés ne peuvent être résolus, notamment concernant la thermodynamique : il faudra toujours consommer de l'énergie (renouvelable ou non) et extraire des matières premières pour structurer et faire fonctionner une blockchain, surtout si elle vient à grandir. Autrement dit, peu importe l'efficacité environnementale d'une blockchain, elle n'est pas sans impact environnemental et doit au moins compenser l'impact (plus ou moins important) qu'elle a généré et qu'elle générera pour mériter le titre de « blockchain verte ». En général, il est vrai que sur le court terme, l'utilisation de la blockchain n'est pas une solution optimale, mais c'est sur le long terme qu'elle le devient en compensant l'impact environnemental qu'elle a généré sur le court terme, grâce à des résultats satisfaisants.

Plus précisément, nous pouvons tout de même établir quelques recommandations quant au déploiement de la blockchain pour l'économie circulaire. D'abord, le choix d'une blockchain publique est une mauvaise idée, car en général, une blockchain publique est relativement grande, ce qui s'accompagne d'une consommation d'énergie élevée (quelle que soit l'algorithme de consensus utilisé), sans compter les problèmes de thermodynamique, d'effets-rebond et de sécurité. Cela signifie qu'il faut privilégier l'utilisation d'une blockchain privée (ou d'un consortium, mais de manière assez restreinte) pour réduire la taille et ainsi minimiser la consommation d'énergie, réduire les impacts négatifs de la thermodynamique et de l'effet rebond. Le seul compromis à faire concerne les aspects techniques, en réduisant la décentralisation de la blockchain et en acceptant un niveau de confidentialité assez faible. Quoiqu'il en soit, la configuration d'un réseau doit inspirer une grande confiance chez les utilisateurs.

Ensuite, il faut choisir un algorithme de consensus qui soit en accord avec l'économie circulaire. En effet, la PoW ne doit pas figurer dans la liste des algorithmes possibles, car elle est beaucoup trop énergivore. Il faut privilégier d'autres algorithmes qui respectent davantage les exigences environnementales, comme la PoA qui est souvent utilisée dans les blockchains privées. Cependant, il faut également faire un choix qui respecte les exigences techniques, notamment en termes de stockage des données, comme c'est le cas avec la PBFT qui, en soi, est peu énergivore, mais qui génère également un grand nombre de messages, ce qui nécessite des installations supplémentaires ayant un impact environnemental supplémentaire.

Enfin, le choix de la taille de la blockchain revêt une grande importance. Comme mentionné précédemment, une blockchain publique est généralement de grande taille, ce qui a un impact environnemental significatif avec toutes les implications que cela entraîne. Cependant, même une blockchain privée utilisant un algorithme de consensus respectueux de l'environnement peut avoir un impact environnemental non négligeable si elle devient trop grande. Cet impact serait certainement moins important que celui d'une blockchain publique, mais il pourrait néanmoins compromettre les avantages qu'elle apporte en termes d'économie circulaire. Par exemple, la consommation d'énergie nécessaire pourrait dépasser la production d'énergie renouvelable.

CONCLUSION

Nous sommes face à un vrai paradoxe. D'un côté l'économie circulaire a pour objectif de réduire l'impact environnemental et la blockchain peut aider à réduire cet impact, mais d'un autre côté, la blockchain a un impact environnemental non-négligeable. Pour rappel, nous nous sommes demandé si la technologie blockchain peut contribuer à l'essor de l'économie circulaire tout en prenant en compte les limites de la biosphère. Pour l'instant, la blockchain permet de relativement bien répondre aux enjeux environnementaux. De ce fait, elle peut constituer un bon outil dans le développement de l'économie circulaire, dans le sens où elle permet de fournir une information complète et ainsi combler certains de ses inconvénients. Néanmoins, certaines limites comme les impacts négatifs de la thermodynamique et les effets-rebonds persistent encore, d'où la nécessité de faire des choix techniques pertinents et adaptés pour optimiser les résultats environnementaux et économiques. Par conséquent, il est essentiel de sensibiliser et de former les différents acteurs (concepteurs et utilisateurs) à l'utilisation de la blockchain s'ils souhaitent l'intégrer dans un projet d'économie circulaire. Les besoins et objectifs de chaque projet doivent être évalués en amont afin de déterminer la meilleure configuration de la blockchain à utiliser.

Sur le court terme, l'analyse coût-avantage en termes environnementaux et économiques serait plutôt négative (les coûts seront plus importants que les avantages). Mais sur le long terme, la tendance s'inverserait et dans ce cas, il est pertinent d'utiliser la blockchain pour faciliter la transition écologique. Elle n'est qu'un frein à cette transition qu'au début, mais ce frein serait compensé plus tard, à la condition que les choix techniques pertinents soient effectués.

Il ne faut pas omettre un élément important pour la synergie innovante étudiée : elle n'est qu'à ses début. Une innovation systémique est appelée à évoluer dans le temps à la fois sur le plan juridique (surtout dans le cas de la blockchain), mais également sur le plan social. La demande de ces deux innovations est favorable à leur développement. Dans cette optique, grâce aux futures innovations techniques, de nouvelles solutions blockchain pourront être développées pour améliorer encore les résultats. Les résultats s'amélioreront donc grâce à des avancées techniques futures, et de nouvelles solutions blockchain pourront être proposées pour améliorer les résultats environnementaux.

Cela serait justement un autre sujet à traiter dans quelques années, lorsque l'application de cette synergie aura évolué, à la fois techniquement et juridiquement et lorsque les données et les cas se seront multipliés.

BIBLIOGRAPHIE

- Abdulqadder, Ihsan H., Deqing Zou, et Israa T. Aziz. « The DAG Blockchain: A Secure Edge Assisted Honeypot for Attack Detection and Multi-Controller Based Load Balancing in SDN 5G ». *Future Generation Computer Systems* 141 (avril 2023): 339-54. <https://doi.org/10.1016/j.future.2022.11.008>.
- Abe, Ryosuke. « Blockchain Storage Load Balancing Among DHT Clustered Nodes ». arXiv, 6 février 2019. <http://arxiv.org/abs/1902.02174>.
- Annales des Mines - Responsabilité et environnement* 2014/4 (N° 76), 2020. <https://www.cairn.info/revue-responsabilite-et-environnement1-2014-4.htm>.
- Article 2276 - Code civil - Légifrance. Consulté le 27 avril 2023. https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000019017163/2022-04-04.
- Aubert, Jean-Luc. *Introduction au droit*. Presses Universitaires de France. Que sais-je ?, 2007. <https://rbu.univ-reims.fr:2085/introduction-au-droit--9782130562559.htm>.
- Audit, Mathias. « Le droit international privé confronté à la blockchain ». *Revue critique de droit international prive* 4, n° 4 (2020): 669-94.
- Bai, Qianlan, Xinyan Zhou, Xing Wang, Yuedong Xu, Xin Wang, et Qingsheng Kong. « A Deep Dive into Blockchain Selfish Mining ». arXiv, 1 novembre 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1811.08263>.
- Bank, European Investment. *Artificial Intelligence, Blockchain and the Future of Europe: How Disruptive Technologies Create Opportunities for a Green and Digital Economy*. European Investment Bank, 2021. <https://doi.org/10.2867/126279>.
- Baralla, Gavina, Andrea Pinna, Roberto Tonelli, et Michele Marchesi. « Waste Management: A Comprehensive State of the Art about the Rise of Blockchain Technology ». *Computers in Industry* 145 (février 2023): 103812. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103812>.
- Beddiar, Karim, et Fabien Imbault. *Blockchain pour l'énergie*. Dunod, 2018. <https://rbu.univ-reims.fr:4182/catalog/book/docid/88863943?searchterm=Blockchain%20pour%20l%27%C3%A9nergie>.
- Béres, Ferenc, István András Seres, András A. Benczúr, et Mikerah Quintyne-Collins. « Blockchain is Watching You: Profiling and Deanonymizing Ethereum Users ». arXiv, 13 octobre 2020. <http://arxiv.org/abs/2005.14051>.
- Berkhout, Peter H. G., Jos C. Muskens, et Jan W. Velthuisen. « Defining the Rebound Effect ». *Energy Policy* 28, n° 6 (1 juin 2000): 425-32. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00022-7](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00022-7).

- Bernard Guerrien et Ozgur Gun. *Dictionnaire d'analyse économique*. La Découverte. Repères, 2012. https://rbu.univ-reims.fr:2085/dictionnaire-d-analyse-economique--9782707174222.htm?ora.z_ref=cairnSearchAutocomplete.
- Collard, Fabienne. « L'économie circulaire ». *Courrier hebdomadaire du CRISP* n° 2455-2456, n° 10 (21 juillet 2020): 5-72.
- Croman, Kyle, Christian Decker, Ittay Eyal, Adem Efe Gencer, Ari Juels, Ahmed Kosba, Andrew Miller, et al. « On Scaling Decentralized Blockchains ». In *Financial Cryptography and Data Security*, édité par Jeremy Clark, Sarah Meiklejohn, Peter Y.A. Ryan, Dan Wallach, Michael Brenner, et Kurt Rohloff, 106-25. Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-662-53357-4_8.
- D'Amato, D., J. Korhonen, et A. Toppinen. « Circular, Green, and Bio Economy: How Do Companies in Land-Use Intensive Sectors Align with Sustainability Concepts? » *Ecological Economics* 158 (1 avril 2019): 116-33. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.12.026>.
- Debref, Romain. *Innovation environnementale et écoconception, certitudes et controverses*. ISTE. Innovation, entrepreneuriat et gestion, 2018.
- Décision - Pourvoi n°15-22.595 | Cour de cassation (3 novembre 2016).
- Dierksmeier, Claus, et Peter Seele. « Blockchain and Business Ethics ». *Business Ethics: A European Review* 29, n° 2 (2020): 348-59. <https://doi.org/10.1111/beer.12259>.
- Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE), 312 OJ L § (2008). <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj/fra>.
- « Directive (UE) 2018/ du Parlement européen et du Conseil du 30 mai 2018 modifiant la directive 2008/98/CE relative aux déchets », s. d.
- Dosi, Giovanni, Christopher Freeman, Richard Nelson, Gerald Silverberg, et Luc Soete. *Technical Change and Economic Theory*. Pinter Publishers, 1988.
- Ellen MacArthur Foundation. « Vers une économie circulaire : Arguments économiques pour une transition accélérée », 2016. https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Executive_summary_FR_10-5-16.pdf.
- Ellen MacArthur Foundation, SUN, et McKinsey Center for Business and Environment. « L'économie circulaire, pour une Europe compétitive », 2015. https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Note-de-Synthese_FR_Growth-Within.pdf.
- Evermann, Joerg, et Henry Kim. « Workflow Management on Proof-of-Work Blockchains: Implications and Recommendations ». *SN Computer Science* 2, n° 1 (19 janvier 2021): 44. <https://doi.org/10.1007/s42979-020-00387-6>.

- Freeman, Christopher, et Luc Soete. *New Explorations in the Economics of Technical Change*. Pinter Publishers, 1990.
- Gallaud, Delphine, et Blandine Laperche. *Economie circulaire et développement durable: Ecologie industrielle et circuits courts*. ISTE Group, 2016.
- Geissdoerfer, Martin, Paulo Savaget, Nancy M. P. Bocken, et Erik Jan Hultink. « The Circular Economy – A New Sustainability Paradigm? » *Journal of Cleaner Production* 143 (1 février 2017): 757-68. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>.
- Geng, Yong, Fujita Tsuyoshi, et Xudong Chen. « Evaluation of Innovative Municipal Solid Waste Management through Urban Symbiosis: A Case Study of Kawasaki ». *Journal of Cleaner Production* 18, n° 10-11 (juillet 2010): 993-1000. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.03.003>.
- Ghisellini, Patrizia, Catia Cialani, et Sergio Ulgiati. « A Review on Circular Economy: The Expected Transition to a Balanced Interplay of Environmental and Economic Systems ». *Journal of Cleaner Production*, Towards Post Fossil Carbon Societies: Regenerative and Preventative Eco-Industrial Development, 114 (15 février 2016): 11-32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>.
- Honkasalo, Antero, Jyri Seppälä, et Jouni Korhonen. « Circular Economy: The Concept and its Limitations ». *Ecological Economics* 143, n° Supplement C (1 janvier 2018): 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>.
- Iansiti, Marco, et Karim Lakhani. « The Truth About Blockchain »: *Harvard business review* 95 (1 janvier 2017): 118-27.
- Institut de droit et d'économie des affaires (Lyon). Organisation du congrès. *Blockchain et droit*. Dalloz. Thèmes et commentaires. Actes, 2018.
- Keynes, John Maynard. *Théorie générale de l'emploi, de l'intérêt et de la monnaie*. Payot, 2017.
- Kirchherr, Julian, Denise Reike, et Marko Hekkert. « Conceptualizing the Circular Economy: An Analysis of 114 Definitions ». *Resources, Conservation and Recycling* 127 (1 décembre 2017): 221-32. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>.
- Korhonen, Jouni. « Industrial Ecology in the Strategic Sustainable Development Model: Strategic Applications of Industrial Ecology ». *Journal of Cleaner Production*, Applications of Industrial Ecology, 12, n° 8 (1 octobre 2004): 809-23. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.02.026>.
- Korhonen, Jouni, Cali Nuur, Andreas Feldmann, et Seyoum Eshetu Birkie. « Circular Economy as an Essentially Contested Concept ». *Journal of Cleaner Production* 175 (février 2018): 544-52. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.111>.
- Korhonen, Jouni, et Juha-Pekka Snäkin. « Analysing the Evolution of Industrial Ecosystems: Concepts and Application ». *Ecological Economics* 52, n° 2 (25 janvier 2005): 169-86. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.07.016>.

- Lasmoles, Olivier. « La difficile appréhension des blockchains par le droit ». *Revue internationale de droit économique*, n° 4 (2018): 453-69.
- Lasmoles, Olivier, et Mamadou T. Diallo. « Impacts of Blockchains on International Maritime Trade ». *Journal of Innovation Economics & Management* 37, n° 1 (2022): 91-116. <https://doi.org/10.3917/jie.pr1.0114>.
- Li, Huiquan, Weijun Bao, Caihong Xiu, Yi Zhang, et Hongbin Xu. « Energy Conservation and Circular Economy in China's Process Industries ». *Energy, Energy and Its Sustainable Development for China*, 35, n° 11 (1 novembre 2010): 4273-81. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.04.021>.
- LOI n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte (1), 2015-992 § (2015).
- LOI n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire (1), 2020-105 § (2020).
- Loignon, Stéphane. « Chapitre 9. Rapidité, confidentialité, sécurité : trois défis techniques ». *Hors collection*, 2017, 239-45.
- . « Chapitre 12. Réglementer sans freiner l'innovation ». *Hors collection*, 2017, 259-68.
- . « Chapitre 13. Une question de souveraineté pour la France et l'Europe ». *Hors collection*, 2017, 269-73.
- . « Préambule. Une brève histoire de la blockchain ». *Hors collection*, 2017, 29-39.
- Ma, Tianjun, Haixia Xu, et Peili Li. « SkyEye: A Traceable Scheme for Blockchain ». Consulté le 21 avril 2023. <https://eprint.iacr.org/undefined/undefined>.
- Marke, Alastair. *Transforming Climate Finance and Green Investment with Blockchains*. Elsevier Science, 2018. <https://rbu.univ-reims.fr:4182/catalog/book/docid/88864552?searchterm=solarcoin>.
- Matete, Ntlibi, et Cristina Trois. « Towards Zero Waste in Emerging Countries – A South African Experience ». *Waste Management* 28, n° 8 (janvier 2008): 1480-92. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.06.006>.
- Mayer, Audrey L., Pekka E. Kauppi, Per K. Angelstam, Yu Zhang, et Päivi M. Tikka. « Importing Timber, Exporting Ecological Impact ». *Science* 308, n° 5720 (15 avril 2005): 359-60. <https://doi.org/10.1126/science.1109476>.
- Mayumi, K., M. Giampietro, et J.M. Gowdy. « Georgescu-Roegen/Daly versus Solow/Stiglitz Revisited ». *Ecological Economics* 27, n° 2 (1998): 115-17. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(98\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(98)00003-2).
- Mengelkamp, Esther, Johannes Gärttner, Kerstin Rock, Scott Kessler, Lawrence Orsini, et Christof Weinhardt. « Designing Microgrid Energy Markets ». *Applied Energy* 210 (janvier 2018): 870-80. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.054>.

- Mitridati, Lesia, Jalal Kazempour, et Pierre Pinson. « Design and Game-Theoretic Analysis of Community-Based Market Mechanisms in Heat and Electricity Systems ». *Omega* 99 (1 mars 2021): 102177. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.102177>.
- Niang, Amadou, Sébastien Bourdin, et André Torre. « Vers une territorialisation des dynamiques de l'économie circulaire ? Analyse du cas français, 2008-2015 ». *Revue d'économie industrielle* 177, n° 1 (2022): 67-101. <https://doi.org/10.4000/rei.11225>.
- Ntsondé, Joël, et Franck Aggeri. « L'économie circulaire comme utopie rationnelle ». *Revue française de gestion* 304, n° 3 (1 juillet 2022): 43-63.
- Ordonnance n° 2017-1674 du 8 décembre 2017 relative à l'utilisation d'un dispositif d'enregistrement électronique partagé pour la représentation et la transmission de titres financiers (s. d.). Consulté le 27 avril 2023.
- Ouaili, Lydia, Samia Bouzefrane, Elena Kornysheva, et Pierre Paradinas. « Vers une gestion d'identités auto-souveraine pour les dispositifs IoT », 2022.
- Parvizimosaed, Alireza, Masoud Bashari, Ashkan Rahimi-Kian, Daniel Amyot, et John Mylopoulos. *Compliance Checking for Transactive Energy Contracts using Smart Contracts*, 2021. <https://doi.org/10.1109/TESC50295.2020.9656942>.
- Pearce, David, et R. Turner. « Economics of natural resources and the environment / D.W. Pearce, R.K. Turner. » *American Journal of Agricultural Economics* 73 (1 février 1991). <https://doi.org/10.2307/1242904>.
- Poirson, Brune. « L'économie circulaire, pilier de la transition écologique », s. d.
- Qin, Rui, Yong Yuan, et Fei-Yue Wang. « Optimal Block Withholding Strategies for Blockchain Mining Pools ». *IEEE Transactions on Computational Social Systems* 7, n° 3 (juin 2020): 709-17. <https://doi.org/10.1109/TCSS.2020.2991097>.
- Quiniou, Matthieu. *Blockchain, l'avènement de la désintermédiation*. ISTE. Collection Innovation, entrepreneuriat et gestion, 2019.
- Ren, Yongjun, Xinyu Liu, Pradip Kumar Sharma, Osama Alfarraj, Amr Tolba, Shenqing Wang, et Jin Wang. « Data Storage Mechanism of Industrial IoT Based on LRC Sharding Blockchain ». *Scientific Reports* 13, n° 1 (16 février 2023): 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29917-x>.
- Renda, Andrea, Jacques Pelkmans, Christian Egenhofer, Lorna Schrefler, Can Selçuki, Jesus Ballesteros, et Anne-Claire Zirnhelt. « Centre for European Policy Studies (CEPS) », s. d.
- Saad, Muhammad, Jeffrey Spaulding, L. Njilla, C. Kamhoua, S. Shetty, Daehun Nyang, et Aziz Mohaisen. « Exploring the Attack Surface of Blockchain: A Systematic Overview ». *ArXiv*, 6 avril 2019. <https://www.semanticscholar.org/paper/ef1a49572983124172ac8c696b9fa84cc5580ef4>.
- Sands, Philippe, et Paolo Galizzi, éd. « Decision No 1600/2002/EC of the European Parliament and of the Council of 22 July 2002 Laying down the Sixth Community Environment Action

- Programme (OJ L 242 10.09.2002 p. 1) ». In *Documents in European Community Environmental Law*, 2^e éd., 63-89. Cambridge University Press, 2006. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511610851.007>.
- Schulte, Uwe G. « New Business Models for a Radical Change in Resource Efficiency ». *Environmental Innovation and Societal Transitions*, Energy, materials and growth: A homage to Robert Ayres, 9 (1 décembre 2013): 43-47. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2013.09.006>.
- Song, Qingbin, Jinhui Li, et Xianlai Zeng. « Minimizing the Increasing Solid Waste through Zero Waste Strategy ». *Journal of Cleaner Production* 104 (octobre 2015): 199-210. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.027>.
- Swan, Melanie. *Blockchain: Blueprint for a New Economy*. O'Reilly Media, Inc., 2015.
- Tukker, Arnold. « Product Services for a Resource-Efficient and Circular Economy – a Review ». *Journal of Cleaner Production*, Special Volume: Why have ‘Sustainable Product-Service Systems’ not been widely implemented?, 97 (15 juin 2015): 76-91. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.049>.
- Tukker, Arnold, Tanya Bulavskaya, Stefan Giljum, Arjan de Koning, Stephan Lutter, Moana Simas, Konstantin Stadler, et Richard Wood. « Environmental and Resource Footprints in a Global Context: Europe’s Structural Deficit in Resource Endowments ». *Global Environmental Change* 40 (1 septembre 2016): 171-81. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.07.002>.
- Upadhyay, Arvind, Sumona Mukhuty, Vikas Kumar, et Yigit Kazancoglu. « Blockchain Technology and the Circular Economy: Implications for Sustainability and Social Responsibility ». *Journal of Cleaner Production* 293 (avril 2021): 126130. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126130>.
- Valenzuela-Venegas, Guillermo, Gabriela Vera-Hofmann, et Felipe A. Díaz-Alvarado. « Design of Sustainable and Resilient Eco-Industrial Parks: Planning the Flows Integration Network through Multi-Objective Optimization ». *Journal of Cleaner Production* 243 (janvier 2020): 118610. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118610>.
- Vries, Alex de, et Christian Stoll. « Bitcoin’s Growing e-Waste Problem ». *Resources, Conservation and Recycling* 175 (1 décembre 2021): 105901. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105901>.
- Vukolić, Marko. « The Quest for Scalable Blockchain Fabric: Proof-of-Work vs. BFT Replication ». In *Open Problems in Network Security*, édité par Jan Camenisch et Doğan Kesdoğan, 112-25. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer International Publishing, 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39028-4_9.
- Wang, Tonghe, Haochen Hua, Zhiqian Wei, et Junwei Cao. « Challenges of Blockchain in New Generation Energy Systems and Future Outlooks ». *International Journal of Electrical*

- Power & Energy Systems* 135 (février 2022): 107499. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107499>.
- Weinstock, Charles B., et John B. Goodenough. « On System Scalability »: Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1 mars 2006. <https://doi.org/10.21236/ADA457003>.
- Wen, Shifan, Wenjun Xiong, Junming Tan, Siwei Chen, et Qing Li. « Blockchain Enhanced Price Incentive Demand Response for Building User Energy Network in Sustainable Society ». *Sustainable Cities and Society* 68 (1 mai 2021): 102748. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102748>.
- Xu, Min, Xingtong Chen, et Gang Kou. « A systematic review of blockchain ». *Financial Innovation* 5, n° 1 (4 juillet 2019): 27. <https://doi.org/10.1186/s40854-019-0147-z>.
- Zaman, Atiq Uz, et Steffen Lehmann. « The Zero Waste Index: A Performance Measurement Tool for Waste Management Systems in a ‘Zero Waste City’ ». *Journal of Cleaner Production* 50 (juillet 2013): 123-32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.11.041>.
- Zink, Trevor, et Roland Geyer. « Circular Economy Rebound ». *Journal of Industrial Ecology* 21, n° 3 (1 juin 2017): 593-602. <https://doi.org/10.1111/jiec.12545>.

WEBOGRAPHIE

- « ABOUT THE INITIATIVE ». Consulté le 4 mai 2023. <https://www3.dps.ny.gov/W/PSCWeb.nsf/All/CC4F2EFA3A23551585257DEA007DCFE2?OpenDocument>.
- « Accélérer la transition vers l'économie circulaire à l'aide de la blockchain - SUEZ Groupe ». Consulté le 25 octobre 2022. <https://www.suez.com/fr/actualites/accelerer-la-transition-vers-economie-circulaire-aide-blockchain>.
- ADEME Infos. « Numérique : quel impact environnemental ? » Consulté le 1 mars 2023. <https://infos.ademe.fr/magazine-avril-2022/faits-et-chiffres/numerique-quel-impact-environnemental/>.
- Atelier Populaire Paris. « Le développement durable chez Atelier Populaire », 29 mai 2019. <https://www.atelierpopulaire.fr/blogs/blog-atelier-populaire/zoom-developpement-durable>.
- Banque des Territoires. « Projet de loi sur l'économie circulaire : des ordonnances pour contrecarrer les lobbies ? », 24 janvier 2019. <https://www.banquedesterritoires.fr/projet-de-loi-sur-leconomie-circulaire-des-ordonnances-pour-contrecarrer-les-lobbies>.
- Behrens, Decrypt / Alexander. « Hacker Nets over \$5 Million in Ethereum Classic 51% Attack ». Decrypt, 5 août 2020. <https://decrypt.co/37721/hacker-nets-over-5-million-ethereum-classic-51-attack>.
- « Biolage - Banque Plastique », 8 mars 2022. <https://plasticbank.com/client/biolage/>.
- Blagojevic, Dobrica. « What Is Practical Byzantine Fault Tolerance (pBFT)? » *CaptainAltcoin* (blog), 21 mars 2019. <https://captainaltcoin.com/what-is-practical-byzantine-fault-tolerance-pbft/>.
- « Blockchain for financial services | IBM ». Consulté le 28 avril 2023. <https://www.ibm.com/blockchain/industries/financial-services>.
- « Blockchain for Government - IBM Blockchain | IBM ». Consulté le 28 avril 2023. <https://www.ibm.com/blockchain/industries/government>.
- « Blockchain healthcare and life sciences solutions | IBM ». Consulté le 28 avril 2023. <https://www.ibm.com/blockchain/industries/healthcare>.
- Bretagne, DREAL. « Obligation ». DREAL Bretagne, 21 mars 2019. <https://www.bretagne.developpement-durable.gouv.fr/obligation-tri-5-flux-a3862.html>.
- Buy Bitcoin, Ethereum & 250+ Other Cryptocurrencies | Bittrex Global. « Buy Bitcoin & Ethereum | Cryptocurrency Exchange | Bittrex Global ». Consulté le 1 mai 2023. <https://global.bittrex.com/>.
- « Changer l'étude de cas sur les soins de santé - Hyperledger Foundation ». Consulté le 15 avril 2023. <https://www.hyperledger.org/learn/publications/changehealthcare-case-study>.

- « Circular Economy Action Plan ». Consulté le 25 avril 2023. https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en.
- « CircularChain, la blockchain au service de l'économie circulaire - SUEZ Groupe ». Consulté le 10 avril 2023. <https://www.suez.com/fr/nous-connaitre/innover-pour-demain/circularchain-la-blockchain-au-service-economie-circulaire>.
- Coin Academy. « L'histoire de la blockchain ». Consulté le 4 novembre 2022. <https://coinacademy.fr/academie/histoire-blockchain/>.
- Coinaute. « SolarCoin, la cryptomonnaie qui brille d'ingéniosité ». *Coinaute* (blog), 14 mai 2021. <https://coinaute.com/solarcoin-2/>.
- « CoinEx-Plateforme mondiale de trading de cryptos ». Consulté le 1 mai 2023. <https://www.coinex.com>.
- CoinMarketCap. « SolarCoin price today, SLR to USD live, marketcap and chart ». Consulté le 30 avril 2023. <https://coinmarketcap.com/currencies/solarcoin/>.
- « Comment la blockchain transforme notre mobilité | BMW.com ». Consulté le 21 février 2023. <https://www.bmw.com/fr/innovation/blockchain-automobile.html>.
- « Community solar micro grids provide a ray of hope ». Consulté le 7 avril 2023. https://www.wwfindia.org/news_facts/feature_stories/community_solar_micro_grids_provide_a_ray_of_hope.
- Crypto Education - Proof of Authority Explained | Animation | Cryptomatics*, 2021. <https://www.youtube.com/watch?v=rjsaa0tJ8Cw>.
- CSTB. « 5 villes chinoises primées Eco-cités : revue de projets ». CSTB. Consulté le 27 mars 2023. <http://www.cstb.fr/fr/actualites/detail/5-villes-chinoises-primees-eco-cites-revue-de-projets-1804/>.
- « Donner au monde les moyens d'arrêter le plastique des océans - Plastic Bank », 10 décembre 2022. <https://plasticbank.com/>.
- Dora. « Proof of Authority : Définition et Explications ». *Cryptorobin.fr* (blog), 23 décembre 2021. <https://cryptorobin.fr/quest-ce-que-le-proof-of-authority/>.
- « économie circulaire | Ministères Écologie Énergie Territoires ». Consulté le 25 octobre 2022. <https://www.ecologie.gouv.fr/leconomie-circulaire>.
- « ecosystem : une deuxième vie pour vos équipements électriques ». Consulté le 18 avril 2023. <https://www.ecosystem.eco/>.
- « Étude de cas Honeywell – Fondation Hyperledger ». Consulté le 15 avril 2023. <https://www.hyperledger.org/learn/publications/honeywell-case-study>.
- « Étude de cas taXchain – Fondation Hyperledger ». Consulté le 15 avril 2023. <https://www.hyperledger.org/learn/publications/taxchain-case-study>.

- « Étude de cas Walmart - Fondation Hyperledger ». Consulté le 15 avril 2023. <https://www.hyperledger.org/learn/publications/walmart-case-study>.
- « Études de cas – Fondation Hyperledger ». Consulté le 15 avril 2023. <https://www.hyperledger.org/learn/case-studies>.
- « Fiscalité photovoltaïque : quels impôts et taxes sur le solaire ? », 17 janvier 2022. <http://mypower.engie.fr/energie-solaire/conseils/fiscalite-photovoltaïque.html>.
- GeeksforGeeks. « Components of Blockchain Network », 1 avril 2021. <https://www.geeksforgeeks.org/components-of-blockchain-network/>.
- Heyden, Ruud Van Der. « Test: Smappee energiemonitor ». elektrozone.be, 15 décembre 2014. <https://elektrozone.be/test-smappee-energiemonitor/>.
- Intermines. « L'économie circulaire : mise en perspective historique et enjeux contemporains ». Consulté le 4 novembre 2022. <https://www.inter-mines.org/fr/revue/article/l-economie-circulaire-mise-en-perspective-historique-et-enjeux-contemporains/1388>.
- « International Cooperation ». Consulté le 25 avril 2023. https://environment.ec.europa.eu/international-cooperation_en.
- L, Bastien. « Blockchain et Big Data : deux technologies complémentaires ». *LeBigData.fr* (blog), 4 mai 2018. <https://www.lebigdata.fr/blockchain-big-data>.
- Lars, Ludovic. « Quelles Différences Entre Blockchain Publique et Blockchain Privée ? » Cryptoast, 20 juin 2018. <https://cryptoast.fr/differences-blockchain-publique-blockchain-privee/>.
- Le maGAZine. « SolarCoin : le photovoltaïque comme monnaie d'échange », 13 septembre 2018. <https://www.sefe-energy.fr/gazmagazine/2018/09/solarcoin-monnaie-photovoltaïque/>.
- Le Monde de l'Energie. « Blockchain dans le domaine de l'énergie : où en est-on ? », 19 mars 2019. <https://www.lemondedelenergie.com/blockchain-energie/2019/03/19/>.
- « Le partenariat de Henkel avec Plastic Bank change le monde », 16 juin 2020. <https://plasticbank.com/client/henkel/>.
- Le Proof of work (PoW): C'est quoi ? Explication en français*, 2021. <https://www.youtube.com/watch?v=aUMhhvrvWqY>.
- « Le règlement général sur la protection des données - RGPD | CNIL ». Consulté le 27 avril 2023. <https://www.cnil.fr/fr/reglement-europeen-protection-donnees>.
- LeMondeInformatique. « Blockchain : les salaires et les compétences les plus recherchées - Le Monde Informatique », 31 mai 2016. <https://www.lemondeinformatique.fr/actualites/lire-blockchain-les-salaires-et-les-competences-les-plus-recherchees-64976.html>.
- « Linux Foundation - Decentralized Innovation, Built with Trust ». Consulté le 7 mai 2023. <https://www.linuxfoundation.org>.

LiveCoinWatch. « Bitcoin (BTC) live coin price, charts, markets & liquidity ». Consulté le 1 mai 2023. <https://www.livecoinwatch.com/price/Bitcoin-BTC>.

LiveCoinWatch. « SolarCoin (SLR) Live Coin Price, Charts, Markets & Liquidity ». Consulté le 30 avril 2023. <https://www.livecoinwatch.com/price/SolarCoin-SLR>.

Lunil. « L’impact environnemental de la technologie blockchain ». *LUNIL - L’innovation dans le monde* (blog), 27 février 2023. <http://www.lunil.com/limpact-environnemental-de-la-technologie-blockchain/>.

Lyon Confluence. « Concerto, une première reconnaissance européenne ». Consulté le 8 avril 2023. <https://www.lyon-confluence.fr/fr/concerto-une-premiere-reconnaissance-europeenne>.

Médicis Immobilier Neuf. « Top 19 des innovations écologiques complètement folles », 28 juillet 2020. <https://www.medicis-patrimoine.com/actualites-immobilier-neuf/eco-habitat/2020/07/28/3186-top-19-des-innovations-ecologiques-completement-folles.html>.

Molly. « The Resilience Programme: Changing Japan’s grid ». *Power Technology* (blog), 19 février 2018. <https://www.power-technology.com/features/resilience-programme-changing-japans-grid/>.

Peck, Morgen E. « A Microgrid Grows in Brooklyn ». *Scientific American*. Consulté le 4 mai 2023. <https://www.scientificamerican.com/article/a-microgrid-grows-in-brooklyn/>.

« Première stratégie pour l’économie circulaire - Environnement - Commission européenne ». Consulté le 25 avril 2023. https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/first_circular_economy_action_plan.html.

Prué, Maximilien. « Plus de 50 Pays Ont Placé Des Limites à La Circulation de Cryptomonnaies, Selon Un Rapport ». *Cryptoast*, 23 décembre 2021. <https://cryptoast.fr/pays-limitant-circulation-cryptomonnaies/>.

Quénétain, Stanislas de. « Algorithme des Généraux Byzantins: Le Mode de Consensus des Blockchains Privées ». *Blockchains Expert* (blog), 17 juillet 2018. <https://www.blockchains-expert.com/algorithme-des-generaux-byzantins/>.

« Qu’est-ce que Hyperledger Fabric ? | IBM ». Consulté le 15 avril 2023. <https://www.ibm.com/fr-fr/topics/hyperledger>.

« Qu’est-ce que le Proof of Authority (PoA) ? | Archipels ». Consulté le 6 mai 2023. <https://www.archipels.io/faq/proof-of-authority-definition>.

« Qu’est-ce que l’Internet of Things (IoT) ? » Consulté le 6 mars 2023. <https://www.oracle.com/fr/internet-of-things/what-is-iot/>.

Redaktion. « Solarcoin, la monnaie cryptographique respectueuse de l’environnement ». *Coin Report*, 25 avril 2018. <https://www.coin-report.net/fr/solarcoin/>.

- Sciences et Avenir. « Le SolarCoin, la crypto-monnaie du photovoltaïque », 9 mars 2017. https://www.sciencesetavenir.fr/high-tech/le-solarcoin-la-crypto-monnaie-du-photovoltaïque_111149.
- siemens.com Global Website. « Smart Grids and Energy Storage: A Microgrid Grows in Brooklyn ». Fw_Inspiring. Consulté le 3 mai 2023. <https://www.siemens.com/global/en/company/stories/research-technologies/energytransition/a-microgrid-grows-in-brooklyn.html>.
- « SMA collabore avec la Fondation SolarCoin et SolarLux », 20 juin 2018. <https://www.sma-france.com/presse/actualites-detaillees/sma-collabore-avec-la-fondation-solarcoin-et-solarlux>.
- « SolarCoin (SLR) Prévision de prix pour 2023-2030, 2040, 2050 ». Consulté le 5 avril 2023. <https://bitscreener.com/fr/coins/solarcoin/price-prediction>.
- Statista. « Bitcoin Blockchain Size 2009-2022 ». Consulté le 21 avril 2023. <https://www.statista.com/statistics/647523/worldwide-bitcoin-blockchain-size/>.
- Statista Infographies. « Infographie: Les entreprises leader dans la technologie blockchain », 29 novembre 2018. <https://fr.statista.com/infographie/16249/entreprises-leader-blockchain-financement>.
- « Statistiques | Eurostat ». Consulté le 9 mai 2023. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/CEI_PC034/default/line?lang=en.
- « Statistiques | Eurostat ». Consulté le 9 mai 2023. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/CEI_PC050/default/line?lang=en.
- « Statistiques | Eurostat ». Consulté le 9 mai 2023. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/CEI_PC040/default/table?lang=en.
- « Statistiques | Eurostat ». Consulté le 9 mai 2023. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/CEI_CIE011/default/line?lang=en.
- « Statistiques | Eurostat ». Consulté le 9 mai 2023. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/CEI_CIE012/default/table?lang=en.
- « Statistiques | Eurostat ». Consulté le 9 mai 2023. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/CEI_CIE012/default/line?lang=en.
- « Statistiques | Eurostat ». Consulté le 9 mai 2023. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/CEI_CIE020/default/line?lang=en.
- « Statistiques | Eurostat ». Consulté le 9 mai 2023. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/CEI_WM010/default/line?lang=en.
- « SUEZ launches CircularChain, the circular economy blockchain, and support the agricultural transition, the keystone of sustainable food - SUEZ Group », 22 septembre 2020. <https://www.suez.com/en/news/press-releases/suez-launches-circularchain-circular-economy-blockchain-and-support-agricultural-transition-keystone-of-sustainable-food>.

Techniques de l'Ingénieur. « Vers un réseau de smart microgrids ? » Consulté le 7 avril 2023. <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/vers-un-reseau-de-smart-microgrids-3252/>.

Watt, Hello. « [Guide 2023] Combien coûte une installation photovoltaïque ? » Hello Watt. Consulté le 3 avril 2023. <https://www.hellowatt.fr/panneaux-solaires-photovoltaïques/combien-coute-installation-photovoltaïque>.

Webinaire - la blockchain au service de l'économie circulaire - Crystalchain x SUEZ, 2021. <https://www.youtube.com/watch?v=qdJGC6MvViY>.

« Who is Plastic Bank? - Plastic Bank », 7 janvier 2022. <https://plasticbank.com/about/>.

www.20minutes.fr. « Dans les pays du Sud, Plastic Bank transforme le plastique en monnaie », 7 janvier 2020. <https://www.20minutes.fr/planete/2688271-20200107-plastic-bank-start-up-transforme-plastique-monnaie-pays-sud>.

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Fréquence moyenne par page selon l'origine géographique de l'entreprise pour les cinq secteurs.	19
Figure 2 : Production de déchets par habitant entre 2004 et 2020 au sein de l'Union Européenne.	21
Figure 3 : Production de déchets d'emballages par habitant dans l'Union Européenne entre 2005 et 2020.	22
Figure 4 : Production de déchets d'emballages en plastique par habitant dans l'Union Européenne entre 2005 et 2020.	23
Figure 5 : Taux de recyclage des déchets (sauf minéraux principaux) entre 2004 et 2020, au sein de l'Union Européenne.	23
Figure 6 : Nombre de personnes employées dans le secteur de l'économie circulaire entre 2012 et 2021 au sein de l'Union Européenne.	24
Figure 7 : Investissement privé et valeur ajoutée brute liés aux secteurs de l'économie circulaire au sein de l'Union Européenne, en 2017.	25
Figure 8 : Brevets liés au recyclage et aux matières premières secondaires au sein de l'Union Européenne, en 2018.	25
Figure 9 : Rebond de l'économie circulaire dû à l'augmentation de la production.	34
Figure 10 : Chronologie blockchain.	38
Figure 11 : Proportion d'entreprises lançant un projet blockchain selon l'année, en France (en pourcentage).	40
Figure 12 : Les types de blockchain privilégiés par les entreprises entre 2015 et 2020, en France (en pourcentage).	41
Figure 13 : Budget moyen des entreprises traditionnelles pour les projets blockchain selon la taille des entreprises, entre 2015 et 2020, en France.	42
Figure 14 : Stade d'avancement des projets blockchain des 80 entreprises entre 2015 et 2020, en France.	43

Figure 15 : Estimation des investissements en capital-risque dans les PME de l'IA et de la blockchain par étape du cycle de vie du financement, en 2019.	45
Figure 16 : Estimation des investissements en capital-risque dans les PME de l'IA et de la blockchain par région de l'UE, entre 2010 et 2019.....	45
Figure 17 : Production totale d'équipements miniers actifs et de déchets électroniques dans le réseau Bitcoin au fil du temps. Estimation de l'équipement minier actif et de la production de déchets électroniques (en kilotonnes métriques) dans le réseau Bitcoin depuis juillet 2014...	61
Figure 18 : Processus de rémunération par SolarCoin.	82
Figure 19 : Moniteur d'énergie Smappee.	83
Figure 20 : Evolution du cours du Bitcoin (courbe cyan) et de sa quantité échangée (histogramme en noir) depuis début 2014, dans le monde.....	85
Figure 21 : Evolution du cours du Bitcoin (courbe cyan) et de sa quantité échangée (histogramme en noir) depuis début 2014, dans le monde.....	86
Figure 22 : Comparatif du cours du SolarCoin (en bleu) et du Bitcoin (en jaune) depuis 2018 et de leur prévision depuis début 2023 (pointillés rouge).	89
Figure 23 : Lawrence Orsini sur le toit d'une maison à Brooklyn connectée au Microgrid. ...	94
Figure 24 : Les objectifs fixés par les créateurs du Microgrid de Brooklyn d'ordre économique, technique et environnemental.....	95
Figure 25 : Exemple de configuration d'un marché des Microgrids.....	96
Figure 26 : Schéma de l'architecture du dispositif utilisant la blockchain.	99
Figure 27 : Architecture schématique du dispositif prévu par le projet CircularChain.	103
Figure 28 : Les trois piliers du développement durable.	106
Figure 29 : Le fonctionnement de la start-up leviers de Plastic Bank pour atteindre ses objectifs.	108

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Mention des codes pour les 114 définitions pour la période d'avant 2012 et la période de 2012 et après.....	56
Tableau 2 : Tableau de synthèse récapitulatif du chapitre 1 ^{er}	77

TABLE DES MATIERES

Introduction	9
Chapitre 1 ^{er} - Une analyse théorique de l'application de la blockchain dans l'économie circulaire.....	12
1. Économie circulaire : une innovation systémique clé dans la transition énergétique... 13	
1.1. Historique : une innovation environnementale systémique basée sur la circularité 13	
1.2. Définition de l'économie circulaire et son rôle dans la transition énergétique et de matière.....	16
1.3. Où en sommes-nous maintenant ?	18
1.3.1. Un effet de mode ?.....	18
1.3.2. La circularité en France en quelques chiffres	19
1.3.3. Union Européenne : vers une circularité de qualité ?	20
1.3.4. Evaluation de la circularité mondiale à différents niveaux	26
1.3.4.1. Niveau macroéconomique	26
1.3.4.2. Niveau mésoéconomique	28
1.3.4.3. Niveau microéconomique	29
1.4. Avantages et inconvénients de cette innovation environnementale à partir d'une perspective d'économie écologique et d'économie de l'innovation.....	30
1.4.1. Les effets bénéfiques d'une économie circulaire	30
1.4.2. Les conséquences indésirables de l'économie circulaire	32
2. La blockchain : innovation systémique, moteur d'une transition majeure dans l'économie de l'information	36
2.1. Une histoire témoignant de la nature systémique de la blockchain	36
2.2. Les trois visages de la blockchain.....	38
2.3. Le déploiement de la blockchain aujourd'hui.....	39

2.3.1.	Au niveau français	39
2.3.2.	Un retard européen sur le monde en matière de blockchain.....	43
2.3.3.	La course à l'innovation : un chemin semé d'embûches.....	46
2.4.	Les forces et les faiblesses de la blockchain	48
2.4.1.	Son potentiel explicatif d'un engouement de grande ampleur	48
2.4.2.	Les faces les plus sombres de la blockchain.....	49
2.5.	Blockchain et Big Data : Bonnie and Cloud	53
3.	Blockchain et économie circulaire : analyse des avantages et défis d'une synergie innovante pour la transition écologique.....	55
3.1.	Des innovations victimes de pressions	55
3.2.	Un couple permettant d'améliorer l'efficacité de l'économie circulaire... ..	57
3.3.	...mais engendre des conséquences non-souhaitables	60
4.	Les déterminants de la blockchain déployée pour l'économie circulaire : analyse des trajectoires d'innovation	63
4.1.	Influence des politiques publiques	63
4.1.1.	Une législation stricte et claire pour l'économie circulaire.....	63
4.1.2.	... mais une législation floue pour la blockchain	66
4.2.	Les technologies de la blockchain : des innovations qui s'accumulent.....	69
4.3.	Influence de la demande	72
4.4.	Conclusion et synthèse – Tableau récapitulatif des avantages et des inconvénients	

75

Chapitre 2 - Une analyse empirique et critique de l'application de la technologie blockchain dans l'économie circulaire	78
---	----

1. La blockchain pour l'économie circulaire : rappel des hypothèses de la partie 1 et méthodologie de la comparaison	79
2. Des cas témoins d'une réelle possibilité d'alliance entre deux innovations systématiques différentes	80

2.1.	Une cryptomonnaie pour la production d'énergie solaire : le SolarCoin	80
2.1.1.	Une communauté agissant pour le bien de la planète grâce à de la cryptomonnaie.....	80
2.1.2.	SolarCoin : analyse complète du fonctionnement et de la valeur de cette cryptomonnaie et des coûts qu'elle engendre	81
2.1.2.1.	Une technologie originale	81
2.1.2.2.	Valeur du SolarCoin et coûts qu'il engendre	87
2.1.2.3.	Valeur de la cryptomonnaie comme moyen d'incitation efficace ?	88
2.1.3.	Enjeux écologiques de la blockchain de SolarCoin dans une production électrique plus respectueuse de l'environnement.....	91
2.2.	Le Microgrid : une blockchain pour l'indépendance énergétique	93
2.2.1.	Des catastrophes naturelles qui incitent à prendre conscience des enjeux énergétiques.....	93
2.2.2.	Une blockchain privée sous Ethereum	95
2.2.3.	Le déploiement du Microgrid	97
2.2.3.1.	Dans le monde.....	97
2.2.3.2.	Cas de l'écoquartier Confluence	98
2.2.3.3.	Analyse technologique du Microgrid de Confluence et de ses limites techniques	99
2.2.4.	Une efficacité environnementale ?	101
2.3.	CircularChain : pour une meilleure traçabilité et transparence des déchets	102
2.3.1.	Qu'est-ce que CircularChain ?	102
2.3.2.	Un fonctionnement indépendant du cours des cryptomonnaies	102
2.3.3.	Un algorithme de consensus faite pour une blockchain verte	105
2.4.	Plastic Bank : vers une transition écologique et une intégration sociale	105
2.4.1.	Une blockchain au service des populations pauvres	105

2.4.2.	Principe de la start-up	107
2.4.3.	Une blockchain basée sur Hyperledger Fabric	109
2.4.4.	D'autres utilisations de Hyperledger Fabric ?	110
2.4.5.	Les deux faces d'Hyperledger Fabric utilisant la Practical Byzantine Fault Tolerance.....	112
2.4.6.	Prise en compte des limites environnementales ?	113
3.	Analyse critique et bilan du déploiement de la blockchain pour l'économie circulaire	115
	Conclusion.....	118
	Bibliographie.....	120
	Webographie	127
	Table des figures	133
	Table des tableaux.....	135
	Table des matières	136