

Haute École
« ICHEC – ECAM – ISFSC »



Enseignement supérieur de type long de niveau universitaire

Comment la blockchain peut-elle contribuer à l'atteinte des Objectifs de développement durable émis par l'ONU malgré la consommation énergétique qui y est associée ?

Étude de cas

Mémoire présenté par :
Louis HANNOUILLE

Pour l'obtention du diplôme de :
Master en gestion de l'entreprise
Année académique 2020-2021

Promoteur :
Catherine DAL FIOR

Boulevard Brand Whitlock 6 - 1150 Bruxelles

Haute École
« ICHEC – ECAM – ISFSC »



Enseignement supérieur de type long de niveau universitaire

Comment la blockchain peut-elle contribuer à l'atteinte des Objectifs de développement durable émis par l'ONU malgré la consommation énergétique qui y est associée ?

Étude de cas

Mémoire présenté par :
Louis HANNOUILLE

Pour l'obtention du diplôme de :
Master en gestion de l'entreprise
Année académique 2020-2021

Promoteur :
Catherine DAL FIOR

Boulevard Brand Whitlock 6 - 1150 Bruxelles

Déclaration anti-plagiat

« Je soussigné, HANNOUILLE Louis, étudiant en Master 2 à l'ICHEC Brussels Management School, déclare par la présente que le mémoire ci- joint est exempt de tout plagiat et respecte en tous points le règlement des études en matière d'emprunts, de citations et d'exploitation de sources diverses signé lors de mon inscription à l'ICHEC, ainsi que les instructions et consignes concernant le référencement dans le texte respectant la norme APA, la bibliographie respectant la norme APA, etc. mises à ma disposition sur Moodle. Par ma signature, je certifie sur l'honneur avoir pris connaissance des documents précités et que le travail présenté est original et exempt de tout emprunt à un tiers non-cité correctement.»

Date : 16/08/2021

Signature : 

Remerciements

Je profite de ces quelques lignes pour remercier chaleureusement toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la rédaction de mon mémoire. Sans leur aide précieuse, je n'aurais été en mesure de rédiger ce travail que j'ai commencé il y a près d'un an. Je souhaite tout particulièrement remercier ...

... Mme. Catherine Dal Fior, Professeur à l'ICHEC et promotrice de ce mémoire, pour son suivi ainsi que ses conseils constructifs et judicieux.

... Mr. Yves Carnazzola, CEO d'AxessImpact pour m'avoir donné l'opportunité de faire mon stage de master au sein de son organisation. Je tiens à souligner sa disponibilité et sa volonté de m'impliquer dans ses projets tout en partageant son expérience.

... Mme Émilie Raffo, Sales Director chez ChainSecurity, pour m'avoir introduit à la blockchain en 2019 et transmis sa passion pour cette technologie émergente. Je la remercie également pour son rôle de mentor, pour ses nombreux conseils apportés tout au long de la rédaction de ce mémoire et pour avoir répondu à mes diverses questions lors d'un entretien.

... Mr. Benjamin Duval, fondateur et CEO de Upbots, pour sa disponibilité et son expertise qui me fût particulièrement utile lors de la rédaction de ce mémoire, notamment grâce aux réponses aux questions que je lui ai posées lors d'un entretien.

... ma famille, mes amis et ma copine pour leur soutien tout au long de mon parcours à l'ICHEC.

Liste des abréviations

BTC	Bitcoin
CDN	Contributions Déterminées au Niveau National
DLT	Distributed ledger technology
ETH	Ether
GSM	Global Sustainability Model
ODD	Objectifs de développement durable
ONU	Organisation des Nations Unies
PoS	Proof-of-Stake
PoW	Proof-of-Work
POWR	Power Ledger
SDG	Sustainable Development Goals
UE	Union européenne

Table des matières

INTRODUCTION.....	1
MOTIVATION	2
MÉTHODOLOGIE	4
I. ANALYSE DE LA LITTÉRATURE.....	4
II. PHASE D'ANALYSE	4
PARTIE I : ANALYSE DE LA LITTÉRATURE	10
1. CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL.....	10
1.1 ENJEUX DU DÉVELOPPEMENT DURABLE.....	10
1.1.1 <i>Sur l'écologie et la biodiversité</i>	10
1.1.2 <i>Sur l'économie</i>	11
1.1.3 <i>Sur la société</i>	11
1.2 L'ACCORD DE PARIS	12
1.2.1 <i>Contexte</i>	12
1.2.2 <i>Etat d'avancement depuis la ratification</i>	13
1.3 LES OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE (ODD) ÉMIS PAR L'ONU	14
1.3.1 <i>Les 17 ODDs</i>	14
1.3.2 <i>Définition et origines</i>	16
1.3.3 <i>ODD et innovation technologique</i>	17
2. BLOCKCHAIN	19
2.1 ORIGINE DE LA BLOCKCHAIN ET DE LA DLT	19
2.2 LA BLOCKCHAIN, C'EST QUOI ?	20
2.3 LA BLOCKCHAIN, COMMENT ÇA MARCHE ?	21
2.4 LA BLOCKCHAIN, UNE TECHNOLOGIE, PLUSIEURS CONSENSUS ?	22
2.4.1 <i>Le consensus Proof-of-Work (PoW)</i>	23
2.4.2 <i>Le consensus Proof-of-Stake (PoS)</i>	23
2.5 LA BLOCKCHAIN, QUELS AVANTAGES ?	24
2.5.1 <i>Transparence</i>	24
2.5.2 <i>Traçabilité</i>	24
2.5.3 <i>Sécurité</i>	25
2.5.4 <i>Confidentialité</i>	25
2.5.5 <i>Désintermédiation</i>	26
2.6 LA BLOCKCHAIN, QUEL(LE)S INCONVÉNIENTS/LIMITES ?	27
2.6.1 <i>Préoccupations en matière de transparence, d'anonymat, et de sécurité</i>	27
2.6.2 <i>Contraintes réglementaires</i>	28
2.6.3 <i>Autres inconvénients</i>	29
2.7 BLOCKCHAIN ET IMPACT ENVIRONNEMENTAL	29
2.7.1 <i>Blockchain et consommation énergétique</i>	29
2.7.2 <i>La blockchain, un allié du développement durable ?</i>	31
2.7.2.1 <i>La mise en place de chaînes d'approvisionnement résilientes et transparentes</i>	32
2.7.2.2 <i>La création d'institutions publiques fortes et responsables</i>	34
2.7.2.3 <i>Encourager des modes de production et de consommation plus responsables</i>	35
RÉSUMÉ DE L'ANALYSE DE LA LITTÉRATURE.....	37
PARTIE II : ANALYSE DE QUATRE CAS D'APPLICATION.....	39
1. ETHEREUM	39
1.1 PRÉSENTATION	39
1.2 FONCTIONNEMENT ET "SMART-CONTRACTS"	40

1.3 CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE	41
1.4 ETHEREUM 2.0 : TRANSITION DE PoW À PoS	42
1.5 ÉVALUATION DE L'IMPACT D'ETHEREUM SUR LES ODDs	43
1.6 ÉVALUATION DE L'IMPACT D'ETHEREUM SUR LES TROIS PILIERS DU DÉVELOPPEMENT DURABLE	47
2. AXESSIMPACT	49
2.1 CONTEXTE ET PRÉSENTATION	49
2.2 FONCTIONNEMENT	49
2.3 LA VALEUR AJOUTÉE DE LA BLOCKCHAIN POUR AXESSIMPACT	51
2.4 ÉVALUATION DE L'IMPACT D'AXESSIMPACT SUR LES ODDs	53
2.5 ÉVALUATION DE L'IMPACT D'AXESSIMPACT SUR LES TROIS PILIERS DÉVELOPPEMENT DURABLE	56
3. PROVENANCE	58
3.1 CONTEXTE ET PRÉSENTATION	58
3.2 LA VALEUR AJOUTÉE DE LA BLOCKCHAIN POUR PROVENANCE	59
3.3 ÉVALUATION DE L'IMPACT DE PROVENANCE SUR LES ODDs	60
3.4 ÉVALUATION DE L'IMPACT DE PROVENANCE SUR LES TROIS PILIERS DU DÉVELOPPEMENT DURABLE	64
4. AID:TECH	65
4.1 CONTEXTE ET PRÉSENTATION	65
4.2 LA VALEUR AJOUTÉE DE LA BLOCKCHAIN POUR AID:TECH	66
4.3 ÉVALUATION DE L'IMPACT DE AID:TECH SUR LES ODDs	69
4.4 ÉVALUATION DE L'IMPACT DE AID:TECH SUR LES TROIS PILIERS DU DÉVELOPPEMENT DURABLE	72
5. AGRÉGATION DES RÉSULTATS	74
5.1 BLOCKCHAIN VALUE FRAMEWORK	74
5.2 SDG IMPACT ASSESSMENT TOOL	76
5.3 GLOBAL SUSTAINABILITY MODEL	77
CONCLUSION GÉNÉRALE, LIMITES ET RECOMMANDATIONS	78
BIBLIOGRAPHIE	80

Liste des figures et tableaux

Figures :

Figure 1 : Logos et descriptifs des 4 organisations étudiées dans le cadre de ce mémoire	5
Figure 2 : Processus d'analyse des 4 cas d'application étudiés dans le cadre de ce mémoire..	8
Figure 3 : Modèle SOI (Sustainability-oriented Innovation).....	18
Figure 4 : Système centralisé/décentralisé/distribué.....	19
Figure 5 : Fonctionnement d'une blockchain.....	22
Figure 6 : Impact d'Ethereum sur les 17 Objectifs de développement durable	47
Figure 7 : Schéma de l'écosystème-type mis en place par AxessImpact.....	50
Figure 8 : Impact d'AxessImpact sur les 17 Objectifs de développement durable	56
Figure 9 : Impact de Provenance sur les 17 Objectifs de développement durable	63
Figure 10 : Impact de AID:Tech sur les 17 Objectifs de développement durable.....	72

Tableaux :

Tableau 1 : Description des 17 Objectifs de développement durable	14
Tableau 2 : Impact d'Ethereum sur les 17 Objectifs de développement durable.....	43
Tableau 3 : Impact d'Ethereum sur les 3 piliers du développement durable.....	48
Tableau 4 : Plus-value de la blockchain pour AxessImpact.....	53
Tableau 5 : Impact d'AxessImpact sur les 17 Objectifs de développement durable	54
Tableau 6 : Impact d'AxessImpact sur les 3 piliers du développement durable.....	56
Tableau 7 : Plus-value de la blockchain pour Provenance	60
Tableau 8 : Impact de Provenance sur les 17 Objectifs de développement durable.....	61
Tableau 9 : Impact de Provenance sur les 3 piliers du développement durable	64
Tableau 10 : Plus-value de la blockchain pour AID:Tech	68
Tableau 11 : Impact de AID:Tech sur les 17 Objectifs de développement durable	69
Tableau 12 : Impact de AID:Tech sur les 3 piliers du développement durable	72
Tableau 13 : Agrégation des résultats du Blockchain Value Framework.....	74
Tableau 14 : Agrégation des résultats du SDG Impact Assessment Tool	76
Tableau 15 : Agrégation des résultats du Global Sustainability Model.....	77

Introduction

« *Tesla investit 1,5 milliard de dollars dans le Bitcoin* », « *Mastercard annonce que certains stable-coins seront acceptés sur son réseau* », « *la valeur des crypto-monnaies explose* », ...

Il semblerait que ce genre de titres fasse le tour des journaux depuis maintenant quelques mois. Pourtant, en comparaison, on entend assez peu parler de la technologie sous-jacente aux crypto-monnaies, la blockchain, bien que cette dernière permette une multitude d'autres cas d'application.

Parallèlement, suite à l'Accord de Paris en 2015, les problématiques environnementales sont au cœur des préoccupations internationales, notamment en raison des Objectifs de développement durable (ODD) émis par l'ONU, ainsi que de la mise en place des Contributions Déterminées au Niveau National (CDN).

A l'heure où l'impact environnemental de la blockchain est souvent mis en cause en raison de l'énergie nécessaire à son fonctionnement, les projets à vocation durable ayant recours à cette technologie se multiplient. C'est dans ce contexte particulier que ce mémoire vise à répondre à la question de recherche suivante : **Comment la blockchain peut-elle contribuer à l'atteinte des Objectifs de développement durable émis par l'ONU malgré la consommation énergétique qui y est associée ?**

Afin de répondre à cette question, ce mémoire s'appuie tout d'abord sur une étude de la littérature existante. Celle-ci se compose de deux parties principales. La première traite du contexte environnemental dans lequel on se situe en 2021, tandis que la deuxième porte sur la blockchain et l'impact de cette technologie sur l'environnement.

Par la suite, plusieurs cas d'application sont étudiés à l'aide de certains outils d'analyse tels que le *Blockchain Value Framework*, le *SDG Impact Assessment Tool* et le *Global Sustainability Model*. Ceux-ci sont présentés dans la méthodologie de ce mémoire. Ces outils viennent s'ajouter à mes connaissances acquises grâce à mes cours à l'ICHEC et mon expérience de stagiaire chez CryptoLake Consulting, VenezVit, et AxessImpact.

L'objectif de cette analyse est de déterminer la réelle plus-value apportée par la blockchain aux business models traditionnels tout en évaluant le type d'impact que peut avoir cette technologie sur l'environnement et sur les Objectifs de développement durable.

Motivation

Les innovations technologiques peuvent modifier la façon dont les gens travaillent et vivent. Elles modifient la manière dont les entreprises sont gérées, et par conséquent, ont un impact considérable sur l'environnement (National Research Council, 1995).

Étant moi-même passionné par l'innovation, et ce depuis longtemps, j'adore découvrir et m'informer sur les dernières tendances technologiques ou encore sur les différents projets menés par certaines entreprises pionnières en innovation telles qu'Amazon, SpaceX, Google ou Tesla.

C'est en partie grâce à cet intérêt qu'en juillet 2019, j'ai pu collaborer en tant qu'étudiant indépendant avec une consultante spécialisée dans la blockchain. Après plus d'un an d'apprentissage à ses côtés, il était évident pour moi que j'allais aborder cette technologie dans le contexte de mon mémoire.

C'est d'ailleurs en faisant des recherches avec elle pour un projet de tokénisation que je me suis rendu compte du véritable potentiel de la blockchain en termes de durabilité et de protection de l'environnement. Le projet se basait sur une étude du Fonds Monétaire International (FMI) (2019) qui indiquait que la valeur d'une baleine était d'environ 2 millions de dollars américains. Cette valeur était calculée en fonction de la quantité de CO2 capturée par les baleines au cours de leur vie. Sur base de ce constat et de l'impulsion du FMI, un projet a été lancé. Le but de ce dernier était de créer une crypto-monnaie durable où chaque « *token* » (c.-à-d. une unité d'une crypto-monnaie) représenterait une quantité prédéterminée de CO2. Ainsi, grâce à ce processus de tokénisation du CO2, l'argent des investisseurs serait utilisé afin de financer la protection des baleines.

Travailler (à mon échelle) dans ce cadre-là m'a réellement passionné et m'a donné envie d'en apprendre plus sur ce type de projet innovant. C'est une des raisons qui m'a amené à m'orienter vers le thème de mémoire mentionné ci-dessus.

Par ailleurs, l'évolution de notre société et les conséquences environnementales qui en découlent me préoccupent également. Entre le réchauffement climatique, l'inégalité des richesses et la surexploitation des ressources naturelles, il est clair qu'une réaction et un changement drastique sont nécessaires (WWF, b.d.). Cette préoccupation m'a notamment amené à suivre l'option « *Nouveaux Business Modèles Durables* » en master 1.

Au fil de ma première année de master à l'ICHEC, mon intérêt pour les nouvelles technologies et les préoccupations environnementales s'est accentué. C'est pourquoi j'ai décidé d'effectuer un stage d'été chez VenezVit, une start-up à but non lucratif basée à Paris et se

spécialisant dans la logistique pharmaceutique. Cette start-up propose à ses clients (principalement des associations humanitaires) un service intégrant la blockchain qui permet d'optimiser la logistique et de tracer les médicaments envoyés à l'étranger. Grâce à cette expérience, je me suis rendu compte que les secteurs dans lesquels la blockchain peut avoir un impact environnemental positif sont plus nombreux que ce que j'imaginais jusque-là. Cela m'a bien entendu renforcé dans mon idée d'orienter mon mémoire vers la thématique mentionnée au point précédent.

Dès lors, vu mon intérêt pour les deux domaines mentionnés ci-avant, il m'a semblé judicieux d'opter pour un thème de mémoire qui les combine.

Méthodologie

Un mémoire doit être rédigé selon une méthodologie rigoureuse qui se divise en différentes étapes. Nous exposons ci-dessous le fil conducteur de ce travail, de même que les détails de la méthodologie appliquée à chaque étape de celui-ci.

I. Analyse de la littérature

La première étape de ce mémoire est l'analyse de la littérature. Il s'agit de la phase initiale de nos recherches, celle où nous posons le cadre théorique et où nous fournissons le contexte nécessaire à la compréhension du thème de ce mémoire.

En ce qui concerne les sources qui nous ont servi lors de cette première partie, nous avons tenté de rassembler le plus de documentation possible sur le changement climatique, le développement durable, l'Accord de Paris, les ODDs et la blockchain. Pour collecter cette documentation spécifique, nous avons effectué des recherches dans des rapports, des articles scientifiques, des revues littéraires et d'autres types de documentation grâce aux outils à notre disposition tels que la bibliothèque en ligne de l'ICHEC et certaines plateformes de recherche sur Internet comme Google Scholar. Afin d'affiner notre recherche, nous avons sélectionné les mots/associations de mots suivants : blockchain, éco-blockchain, cryptomonnaie, sustainability/durabilité, SDG/Objectifs de développement durable, FinTech, impact assessment, Covid-19, Accord de Paris, changement climatique, consensus, etc.

II. Phase d'analyse

Étude de cas :

Dans la deuxième partie de ce mémoire, nous tenterons de répondre à la question de recherche et à ses diverses sous-questions en analysant quatre cas d'application.

L'étude de cas est une méthode de recherche largement utilisée en sciences de gestion et permet l'application de connaissances à la résolution de problèmes concrets (Université Catholique de Louvain, 2008). L'objectif principal d'une étude de cas est d'analyser un objet (tel qu'un événement spécifique, une entreprise ou une personne) en vue de poser un diagnostic et d'en déduire des règles ou des principes applicables à des cas similaires (Chamberland, 1995).

Une étude de cas multiples permet au chercheur d'explorer les éventuelles divergences au sein des cas et entre eux. L'objectif est d'analyser et d'agréger les résultats de ceux-ci. Comme des comparaisons seront établies, il est impératif que les cas soient représentatifs et choisis

avec soin afin que le chercheur puisse prédire des résultats similaires ou contrastés sur d'autres cas pertinents (Yin, 2003).

Les études de cas combinent généralement des méthodes de collecte de données telles que des archives, des entretiens, des questionnaires et des observations. Les données peuvent être qualitatives, quantitatives ou les deux (Eisenhardt, 1989).

Bien que ce type de méthodologie qualitative soit exploité de diverses façons, l'étude de cas est généralement constituée de trois étapes principales : l'introduction, le développement et la conclusion. L'introduction vise à présenter l'objet étudié et à établir un cadre d'analyse pertinent. La deuxième étape, le développement, consiste à analyser l'objet en question, au moyen d'une/d'enquête(s) ou d'un/d'outil(s) d'analyse, afin d'en faire émerger une ou plusieurs problématiques. La dernière étape, la conclusion, consiste quant à elle à agréger les résultats obtenus durant l'analyse et à les confronter aux diverses hypothèses préalablement identifiées (Claude, 2020).

L'étude des cas d'application présentés dans le cadre de ce mémoire se basera sur cette même structure. En effet, chaque organisation/projet étudié(e) sera d'abord présenté(e). Cette première phase d'introduction se basera principalement sur une étude de la littérature associée aux cas d'application. Par la suite, ceux-ci seront étudiés à l'aide des outils d'analyse présentés ci-après. Nous procéderons finalement à une agrégation des résultats et à une interprétation de ceux-ci.

Les quatre cas d'application :

Les quatre cas d'application analysés dans le cadre de ce mémoire sont les suivants :

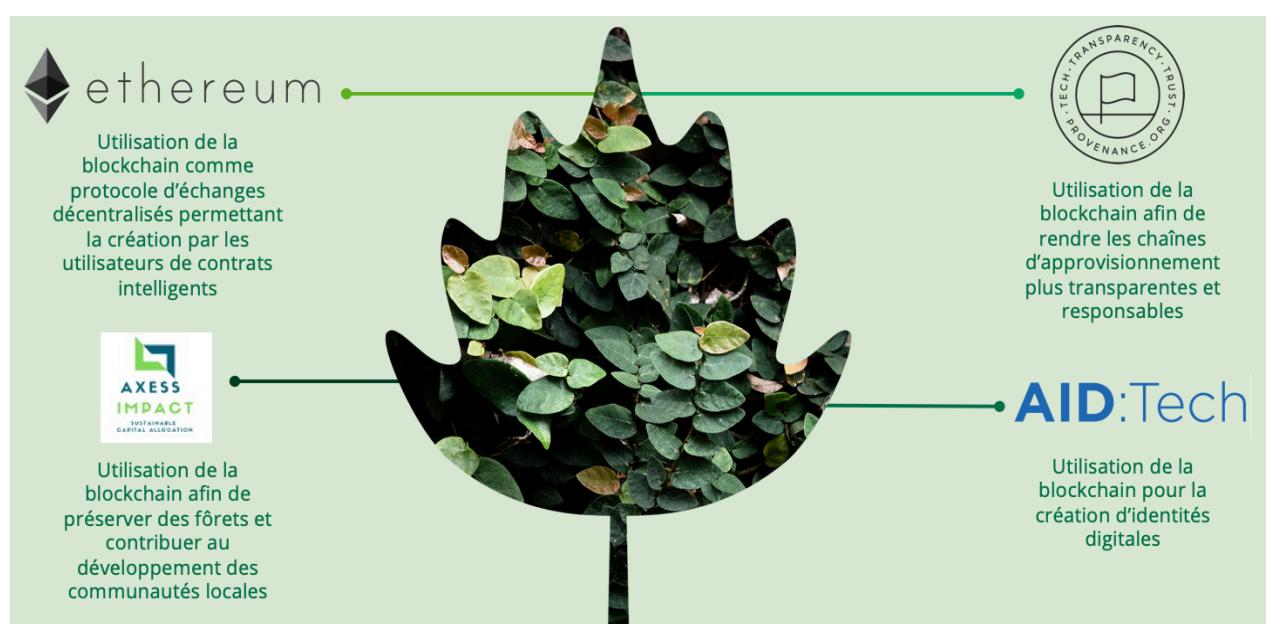


Figure 1 : Logos et descriptifs des 4 organisations étudiées dans le cadre de ce mémoire

Ethereum :

Le premier cas d'application se focalise sur la consommation énergétique des blockchains de type Proof-of-Work (PoW) et sur la potentielle alternative qu'est le consensus Proof-of-Stake (PoS). Ce sujet est illustré par le cas d'Ethereum qui est sur le point de passer d'une blockchain PoW à une blockchain PoS. L'étude de ce premier cas d'application s'appuie notamment sur des entretiens semi-directifs avec des experts spécialisés en blockchain. L'objectif de cette analyse est de déterminer si le consensus Proof-of-Stake représente une alternative réaliste au consensus Proof-of-Work.

Nous tenterons également d'analyser l'influence d'Ethereum sur les ODDs et sur les trois piliers principaux du développement durable. En outre, il est intéressant de noter qu'il s'agit d'un projet dont l'objectif principal n'est pas de contribuer au développement durable. Par conséquent, cela nous permettra d'avoir un cadre d'analyse plus étendu et représentatif de l'utilisation de la blockchain en 2021.

Les trois cas d'application qui suivent illustrent, quant à eux, le potentiel de la blockchain pour les organisations dont l'objectif principal est de contribuer au développement durable.

AxessImpact :

Le premier d'entre eux est centré autour du projet de l'entreprise au sein de laquelle j'ai effectué mon stage de Master : AxessImpact. Ce cas d'application est particulièrement illustratif de certaines caractéristiques phares de la blockchain, telles que la transparence et la traçabilité, appliquées à un projet à vocation durable. De plus, il est représentatif d'un des trois piliers principaux du développement durable : la dimension écologique.

Nous commencerons par déterminer la plus-value de la blockchain pour un tel projet. Ensuite, comme pour le cas d'Ethereum, nous tenterons d'analyser l'influence d'AxessImpact sur les ODDs et sur les trois piliers principaux du développement durable.

Provenance :

Le cas de Provenance illustre quant à lui deux des trois aspects principaux présentés par le Forum Économique Mondial (2020) comme domaines où la blockchain peut avoir un impact positif sur le développement durable (Voir Point 2.7.2) : la mise en place de chaînes d'approvisionnement plus résilientes et transparentes et l'incitation à l'approvisionnement et à la consommation responsables. En outre, Provenance est représentatif d'un autre pilier du développement durable : la dimension économique.

Tout comme AxessImpact, nous commencerons par déterminer la plus-value de la blockchain pour un tel projet. Ensuite, nous tenterons d'analyser l'influence de Provenance sur les ODDs et sur les trois piliers principaux du développement durable.

AID:Tech :

Le dernier cas d'application analysé dans le cadre de ce mémoire se focalise sur AID:Tech. La plateforme développée par cette entreprise apporte (grâce à la blockchain) transparence et traçabilité aux modes de distribution de ressources menés par les gouvernements, les ONGs, les entreprises et les organisations caritatives. Ce cas d'application illustre l'autre domaine principal ciblé par le Forum Économique Mondial (2020) (Voir Point 2.7.2) comme domaine où la blockchain peut avoir un impact positif sur le développement durable : la création d'institutions publiques plus fortes et responsables. De plus, AID:Tech est représentatif du dernier pilier principal du développement durable : la dimension sociale

Tout comme AxessImpact et Provenance, nous commencerons par déterminer la plus-value de la blockchain pour un tel projet. Ensuite, nous tenterons d'analyser l'influence de AID:Tech sur les ODDs et sur les trois piliers principaux du développement durable.

Utilisation et description des outils d'analyse

AxessImpact, Provenance et AID:Tech seront chacun analysés au travers de trois outils différents : le *Blockchain Value Framework*, le *SDG Impact Assessment Tool*, et le *Global Sustainability Model*.

La combinaison de ceux-ci permet d'étudier les cas d'application en profondeur en déterminant avec plus de précision la plus-value apportée par la blockchain au sein de l'organisation, le type d'impact sur les ODDs (positif/négatif/neutre/direct/indirect), et le type d'impact sur le développement durable (économique, écologique, social).

Pour ce qui est du cas d'Ethereum, seuls le *SDG Impact Assessment Tool* et le *Global Sustainability Model* seront utilisés. La raison en est que contrairement aux autres cas d'application pour lesquels la blockchain n'est qu'un élément du business model, Ethereum est une blockchain à part entière. Il n'est donc pas pertinent d'en évaluer la valeur ajoutée au travers du *Blockchain Value Framework*.

Une fois que les quatre cas d'application seront analysés au travers des outils mentionnés ci-dessus, nous procéderons à une agrégation des résultats et à une conclusion. Ce processus d'analyse est illustré ci-dessous.

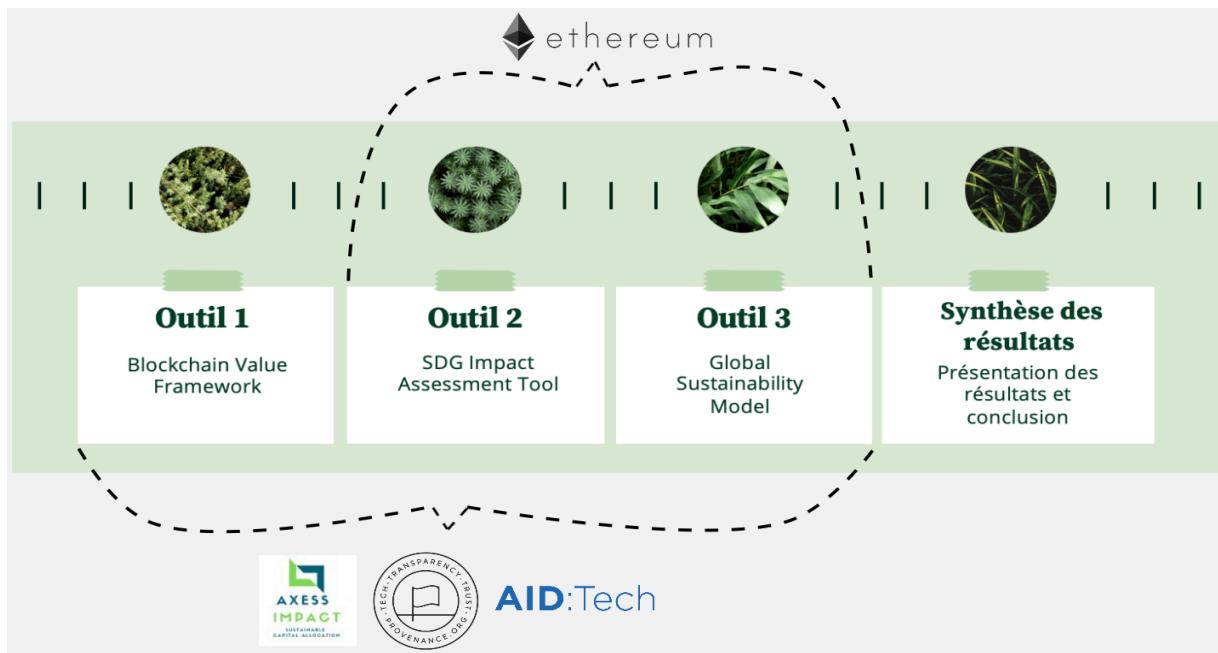


Figure 2 : Processus d'analyse des 4 cas d'application étudiés dans le cadre de ce mémoire

Le Blockchain Value Framework

Conçu par le Forum Économique Mondial et Accenture, cet outil aide les organisations à identifier la valeur ajoutée de la blockchain pour leur business model. Le *Blockchain Value Framework* (Voir ANNEXE 1) a été développé sur base d'une enquête mondiale menée auprès de 550 professionnels issus de 13 secteurs différents, ainsi que sur une analyse de 79 projets ayant recours à la blockchain.

La première étape de cet outil consiste à identifier les points faibles/champs d'opportunités du secteur dans lequel l'organisation analysée est active. La deuxième étape consiste à déterminer si certaines caractéristiques de la blockchain implantée par l'organisation en question peuvent permettre d'améliorer/résoudre les points faibles précédemment identifiés. La troisième étape consiste à cibler (à l'aide de l'antisèche fournie par le *Blockchain Value Framework* (Voir ANNEXE 1)), les nouvelles capacités générées grâce à la blockchain et associées aux différents points faibles préalablement identifiés. La dernière étape consiste, quant à elle, à identifier les leviers de création de valeurs pour l'organisation (à l'aide de l'antisèche fournie par le *Blockchain Value Framework* (Voir ANNEXE 1))).

Au travers de ces étapes, cet outil permet donc d'identifier la plus-value générée grâce à la blockchain pour chacune des organisations étudiées.

Le SDG Impact Assessment Tool

Développé par UNSDSN et le Centre de Göteborg pour le développement durable, le *SDG Impact Assessment Tool* (Voir ANNEXE 2) est un outil destiné aux institutions académiques,

aux entreprises, aux entrepreneurs, aux organisations civiques et aux organismes publics, qui leur permet d'évaluer leur impact sur les 17 Objectifs de développement durable émis par l'ONU (UNSDSN, 2021).

Pour ce faire, l'impact d'une organisation sur chacun des 17 ODDs est évalué comme suit : positif direct, positif indirect, neutre, négatif indirect, négatif direct ou nécessite plus d'informations. Les impacts sur les 17 ODDs sont ensuite illustrés dans un tableau récapitulatif.

Le *Global Sustainability Model* (GSM)

Le *Global Sustainability Model* (Voir ANNEXE 3), développé par Oxford Economics, est une extension du célèbre *Global Economic Impact Model*, à la différence qu'il intègre des mesures environnementales et sociales.

Ce modèle d'analyse peut notamment contribuer aux efforts des entreprises qui souhaitent visualiser ou communiquer leurs progrès réalisés en termes de développement durable (Oxford Economics, s.d.). Le GSM consiste à catégoriser l'impact des organisations analysées selon que celui-ci soit plutôt économique, social ou écologique.

Partie I : Analyse de la littérature

1. Contexte environnemental

Avant d'analyser les organisations mentionnées au point précédent et de tenter de répondre à la question de recherche, il est important de se pencher sur le contexte environnemental dans lequel nous nous situons actuellement. Dans cette première partie de l'analyse de la littérature, nous allons d'abord nous intéresser aux principaux enjeux du développement durable, qu'ils soient plutôt écologiques, économiques ou sociaux. Ensuite, nous aborderons l'Accord de Paris ainsi que les Contributions Déterminées au Niveau National (CDN) qui y sont associées. Nous terminerons cette partie en présentant les Objectifs de développement durable (ODD) émis par l'ONU.

1.1 Enjeux du développement durable

1.1.1 Sur l'écologie et la biodiversité

Comme on peut le lire dans le rapport provisoire de l'Organisation Météorologique Mondiale (2020), la décennie 2011-2020 fut la plus chaude jamais enregistrée. De plus, les effets du changement climatique n'ont fait qu'augmenter en 2020, année qui est en passe de devenir l'une des trois années les plus chaudes jamais enregistrées. Nous avons en effet connu de nouvelles températures extrêmes sur terre, comme dans les océans.

Selon WWF (s.d.), le réchauffement climatique sera probablement la principale cause d'extinction d'espèces au cours du 21^{ème} siècle. Dans son rapport sur le changement climatique de 1,5°, le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2019) estime qu'une augmentation moyenne de 1,5°C peut mettre 20 à 30% des espèces en danger d'extinction.

En outre, une telle augmentation des températures augmenterait significativement les risques de catastrophes naturelles (OMM, 2020).

Plusieurs zones riches en biodiversité ont d'ailleurs été récemment ravagées à cause de larges feux de forêts. Ce fut le cas en Australie, en Sibérie, sur la côte ouest des États-Unis, de même qu'en Amérique du Sud, envoyant par la même occasion de larges étendues de fumée autour du globe et émettant d'importantes quantités de CO2 qui viennent s'ajouter à la pollution très importante générée par les activités humaines. En tant que puits naturels de carbone, les zones forestières représentent donc un enjeu majeur de préservation (OMM, 2020).

1.1.2 Sur l'économie

La durabilité économique est une partie intégrante du développement durable et signifie que nous devons optimiser l'utilisation, la récupération et le recyclage des ressources à notre disposition. En d'autres termes, nous devons préserver aujourd'hui les ressources naturelles limitées afin que les générations futures puissent également en bénéficier à leur tour (Löf, 2018).

La durabilité de l'économie mondiale dépend de multiples facteurs tels que le taux d'emploi, le degré d'inflation, le taux de croissance économique, le montant du déficit budgétaire et le statut du commerce international (Rekhi, s.d.).

Cependant, l'économie mondiale rencontre aujourd'hui certaines difficultés associées aux facteurs cités ci-dessus. Certains pays ont, par exemple, connu une inflation fulgurante. Ce fut notamment le cas du Venezuela, du Zimbabwe, du Soudan et de l'Argentine, avec respectivement 9986%, 676%, 71% et 46% de taux d'inflation (World Population Review, 2021). Par ailleurs, selon Reilly et al. (2021), la crise sanitaire liée au Covid-19 a mis en lumière les limites du commerce international et a contraint de nombreux pays à accroître leur déficit budgétaire afin de subvenir aux besoins de leurs citoyens. Les incertitudes liées à ce type de difficultés sont encore renforcées par la possibilité de vagues d'infections ultérieures qui infligeraient de nouveaux dommages à l'économie mondiale.

En outre, selon le rapport *Recover Better* de l'ONU (2020), l'économie mondiale a fait face à un ralentissement généralisé de la croissance économique. Celle des pays du Sud a été particulièrement entravée par deux tendances : la lenteur des progrès en matière de changements structurels et le manque d'investissements en recherche et développement (R&D) (ONU, 2020).

1.1.3 Sur la société

Outre les aspects mentionnés précédemment, l'OMM (2020) précise que le changement climatique a bien d'autres impacts sur la société. Certaines communautés se voient, par exemple, contraintes de fuir leurs terres en raison de catastrophes météorologiques causées par le changement climatique (OMM, 2020).

Par ailleurs, l'Union Européenne a identifié sept enjeux fondamentaux pour le développement de notre société :

- La santé, le bien-être et la gestion des changements démographiques
- La nourriture et l'agriculture durable
- L'énergie propre, sécurisée et efficiente
- La mobilité verte, efficiente et accessible

- La lutte contre le changement climatique
- L'inclusion et l'innovation
- La sécurité et la liberté des citoyens

Les enjeux cités ci-dessus font également office d'objectifs pour les pays membres de l'UE (NCP Wallonie, s.d.).

1.2 L'Accord de Paris

Afin de réagir face aux enjeux cités plus haut ainsi qu'aux autres défis causés par le changement climatique, les représentants de 196 pays se sont réunis lors de la COP21 à Paris en 2015, pour finalement aboutir à l'Accord de Paris (UNFCCC, s.d.).

Comme on peut le lire sur le site internet des Nations Unies (s.d.), l'Accord de Paris est un traité international juridiquement contraignant à propos des changements climatiques.

Cet accord est entré en vigueur le 4 novembre 2016 et a été adopté par 196 parties lors de la COP21 qui s'est tenue en décembre 2015 à Paris. En effet, du 30 novembre au 11 décembre 2015, la France a accueilli les représentants de 196 pays lors de la conférence des Nations Unies (ONU) sur le changement climatique, l'une des réunions mondiales sur le climat les plus importantes et les plus ambitieuses jamais organisées. Cette conférence avait pour objectif de renforcer les engagements pris lors du Protocole de Kyoto, un précédent traité international destiné à limiter les rejets de gaz à effet de serre (Commission Européenne, s.d.).

L'Accord de Paris se veut plus ambitieux que son prédécesseur, le Protocole de Kyoto, en ce sens qu'il constraint légalement les parties prenantes à limiter leurs émissions de gaz à effet de serre à des niveaux qui empêcheraient les températures mondiales d'augmenter de plus de 2°C par rapport à la température de référence fixée avant le début de la révolution industrielle (Benduski, 2020).

1.2.1 Contexte

L'Accord de Paris est en réalité l'aboutissement d'un long processus qui a débuté au Sommet de la Terre de 1992 au Brésil, lorsque les parties prenantes ont adhéré à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Cinq ans plus tard, au vu de la nécessité de renforcer les réductions d'émission de CO₂, les pays impliqués ont adopté le Protocole de Kyoto. Ce protocole avait pour but de contraindre juridiquement les parties prenantes (majoritairement les pays occidentaux) à réduire leurs émissions selon des objectifs préalablement définis. Cependant, cet accord n'eut en réalité que peu d'impact car la Chine et les États-Unis, deux des principaux pays les plus pollueurs au monde, ont choisi de ne pas y participer. En effet, de par son statut de pays en voie de développement, la Chine n'était pas

liée par le Protocole de Kyoto. Par conséquent, et en raison de leur relation ambivalente avec la Chine, les États-Unis et ses nombreux représentants ont également décidé de ne pas participer au protocole (Britannica, s.d.).

En 2012, lors de la COP18 qui s'est tenue à Doha, les délégués internationaux ont réaffirmé l'engagement qu'ils avaient pris en 2011, lors de la COP17, de créer un nouveau traité sur le climat plus complet et juridiquement contraignant. Ce traité obligera toutes les parties prenantes, y compris certains émetteurs de carbone comme la Chine et les États-Unis qui n'avaient pas participé au Protocole de Kyoto, à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre et de CO2 (OCDE, 2012).

Cet engagement devint une réalité en 2015 lors de la COP21 à Paris. En amont de cette conférence internationale, les Nations Unies avaient demandé aux parties prenantes de soumettre des plans détaillant la manière dont elles comptaient diminuer leurs émissions de gaz à effet de serre. Ces plans sont plus communément connus sous l'appellation de "Contributions Déterminées au Niveau National" (CDN) (Britannica, s.d.).

Au 10 décembre 2015, 185 pays avaient soumis leurs CDNs, indiquant donc les mesures qu'ils comptaient prendre afin de réduire leurs émissions de gaz à effet de serre d'ici 2025 ou 2030 (UNFCCC, s.d.).

Le texte de l'Accord de Paris met l'accent sur la coopération, la transparence, la flexibilité et la communication régulière des progrès accomplis dans le cadre de la réalisation des CDNs (UNFCCC, s.d.). Comme nous le verrons plus loin dans ce mémoire, la réalisation de certains de ces objectifs peut être facilitée grâce à des innovations technologiques telles que la blockchain.

1.2.2 Etat d'avancement depuis la ratification

La vaste majorité des pays du monde a rejoint l'Accord de Paris avant la date limite du 21 avril 2017. Parmi les pays souverains, seuls le Nicaragua et la Syrie n'avaient pas signé l'accord au début de 2017. Cependant, lors de cette même année, l'arrivée de Donald Trump à la présidence américaine avait entraîné la sortie officielle des États-Unis de l'accord. L'absence des États-Unis fut toutefois de courte durée car, le premier jour de son mandat, le 20 janvier 2021, le nouveau président Joe Biden a réintégré l'accord au nom des États-Unis, ce qui a ouvert la voie à la réintégration officielle du pays en février 2021 (Peltier et Sengupta, 2021).

Au mois de janvier 2021, 195 pays avaient signé et 190 pays avaient ratifié l'accord (UNFCCC, s.d.).

Depuis l'entrée en vigueur de l'accord, les progrès vers les objectifs d'émission ont été mitigés. Les responsables de l'Union Européenne ont annoncé en 2018 que tous les États membres avaient pris du retard dans la réalisation de leurs objectifs. Parmi ceux-ci, la Suède, le Portugal et la France avaient fait le plus de progrès, atteignant en 2018 respectivement 77 %, 66 % et 65 % de leurs objectifs pour 2020 (Britannica, s.d.).

1.3 Les Objectifs de développement durable (ODD) émis par l'ONU

Pour combattre les effets du changement climatique et progresser dans l'accomplissement des CDNs, les gouvernements et les organisations impliqués peuvent s'appuyer sur les 17 Objectifs de développement durable émis par l'ONU.

1.3.1 Les 17 ODDs

Tableau 1 : Description des 17 Objectifs de développement durable (Nation Unies, s.d.)

N° ODD	Description de l'ODD
1 PAS DE PAUVRETÉ 	Éliminer l'extrême pauvreté et la faim
2 FAIM «ZÉRO» 	Éliminer la faim, assurer la sécurité alimentaire améliorer la nutrition et promouvoir l'agriculture durable
3 BONNE SANTÉ ET BIEN-ÊTRE 	Permettre à tous de vivre en bonne santé et promouvoir le bien-être de tous à tout âge
4 ÉDUCATION DE QUALITÉ 	Assurer l'accès de tous à une éducation de qualité, sur un pied d'égalité, et promouvoir les possibilités d'apprentissage tout au long de la vie
5 ÉGALITÉ ENTRE LES SEXES 	Parvenir à l'égalité des sexes et autonomiser toutes les femmes et les filles
6 EAU PROPRE ET ASSAINISSEMENT 	Garantir l'accès de tous à des services d'alimentation en eau et d'assainissement gérés de façon durable

	<p>Garantir l'accès de tous à des services énergétiques fiables, durables et modernes, à un coût abordable</p>
	<p>Promouvoir une croissance économique soutenue, partagée et durable, le plein emploi productif et un travail décent pour tous</p>
	<p>Bâtir une infrastructure résiliente, promouvoir une industrialisation durable qui profite à tous et encourager l'innovation</p>
	<p>Réduire les inégalités dans les pays et d'un pays à l'autre</p>
	<p>Faire en sorte que les villes et les établissements humains soient ouverts à tous, sûrs, résilients et durables</p>
	<p>Établir des modes de consommation et de production durables</p>
	<p>Prendre d'urgence des mesures pour lutter contre les changements climatiques et leurs répercussions</p>
	<p>Conserver et exploiter de manière durable les océans, les mers et les ressources marines aux fins du développement durable</p>
	<p>Préserver et restaurer les écosystèmes terrestres, en veillant à les exploiter de façon durable, gérer durablement les forêts, lutter contre la désertification, enrayer et inverser le processus de dégradation des terres et mettre fin à l'appauvrissement de la biodiversité</p>

 <p>16 PAIX, JUSTICE ET INSTITUTIONS EFFICACES</p>	<p>Promouvoir l'avènement de sociétés pacifiques et inclusives aux fins du développement durable, assurer l'accès de tous à la justice et mettre en place, à tous les niveaux, des institutions efficaces, responsables et ouvertes à tous</p>
 <p>17 PARTENARIATS POUR LA RÉALISATION DES OBJECTIFS</p>	<p>Renforcer les moyens de mettre en œuvre le partenariat mondial pour le développement et le revitaliser</p>

1.3.2 Définition et origines

Les Objectifs de développement durable (ODD) énoncés ci-dessus, *“également nommés Objectifs mondiaux, sont un appel mondial à agir pour éradiquer la pauvreté, protéger la Planète et faire en sorte que tous les êtres humains vivent dans la paix et la prospérité”* (UNDP, 2015).

Ces 17 ODDs définissent donc les priorités et les aspirations mondiales en matière de développement durable pour l'horizon 2030 et cherchent à mobiliser les efforts mondiaux autour d'un ensemble commun de buts et de cibles. Les ODDs appellent à une action mondiale des gouvernements, des entreprises et des citoyens pour lutter contre la pauvreté et développer notre société dans le respect des ressources naturelles qui sont à notre disposition (UNDP, 2015).

Préalablement aux Objectifs de développement durable émis par l'ONU, les Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD) ont fourni entre 2000 et 2015 un cadre de développement important et ont permis d'obtenir des résultats dans un certain nombre de domaines tels que la réduction de la pauvreté ainsi que l'amélioration de la santé et de l'éducation dans les pays du sud. Les Objectifs de développement durable (ODD) succèdent ainsi aux OMDs, élargissant par la même occasion le spectre des objectifs en proposant un large éventail de sujets interconnectés dans les dimensions économiques, sociales et écologiques du développement durable (SDG Compass, s.d.).

Les ODDs sont nés de ce qui est sans doute le processus le plus inclusif de l'histoire des Nations Unies car il est le reflet de contributions substantielles de tous les secteurs de la société et de toutes les régions du monde. Rien que dans le cadre du Pacte mondial des Nations Unies, plus de 1500 entreprises ont apporté leurs contributions et leurs conseils. De plus, les objectifs sont universellement applicables, et ce, aussi bien dans les pays du nord que dans les pays du sud. Les gouvernements sont censés les traduire en plans d'action concrets, en tenant compte des différentes réalités et capacités de leurs pays (SDG Compass, s.d.).

Bien qu'ils s'adressent principalement aux gouvernements, les ODDs sont conçus pour rallier un plus large éventail d'organisations, et ce, afin de façonner les priorités et les aspirations des efforts de développement durable autour d'un cadre commun. Plus important encore, les ODDs reconnaissent le rôle-clé que les entreprises peuvent et doivent jouer dans leur réalisation (SDG Compass, s.d.).

1.3.3 ODD et innovation technologique

Selon une étude de BCG menée par David Young et Wendy Woods (2019), les institutions du monde entier progressent trop lentement dans leurs objectifs de développement durable. Toujours selon cette étude, des investissements considérables sont nécessaires pour combler l'écart de près de 2500 milliards de dollars par an entre ce qui est dépensé aujourd'hui et ce qui serait nécessaire pour atteindre les 17 Objectifs de développement durable (ODD) des Nations Unies. Pour combler cet écart, BCG indique que les secteurs public, social et privé doivent collaborer efficacement, notamment en encourageant les entreprises à utiliser leurs ressources et leur envergure pour s'attaquer aux problèmes sociétaux.

Bien que ce type de mesures soient essentielles, elles ne sont pas suffisantes. Comme on peut le lire dans le rapport de Young et Woods (2019), la priorité est de se concentrer sur la manière de réduire à la fois le montant de l'investissement nécessaire ainsi que le temps nécessaire pour obtenir les résultats souhaités. Pour ce faire, BCG insiste sur le fait que les acteurs publics, sociaux et privés doivent tirer parti de l'innovation. Il existe en effet de nombreuses technologies qui, une fois adaptées et déployées à grande échelle, pourraient réduire de manière significative le déficit d'investissement dans les ODDs. En outre, l'étude de BCG affirme que certaines de ces nouvelles technologies (y compris la blockchain) ont le potentiel de réduire drastiquement les coûts liés à la réalisation des ODDs.

Pour que le type de technologies mentionnées ci-dessus facilite concrètement la réalisation des ODDs, l'Institut de Recherche des Nations Unies pour le Développement Social (UNRISD) (2016) estime que trois caractéristiques associées à l'innovation sont nécessaires : progressif, systémique et orienté vers le long terme. Dans un article sur l'innovation durable, Adams et al. (2015) présentent un modèle qui peut également être utilisé pour caractériser le potentiel de transformation durable de certaines innovations technologiques.

En effet, Adams et al. (2015) distinguent trois types d'innovation qui se différencient selon l'axe de leurs objectifs, de leurs résultats et de leur relation avec l'organisation qui les implémente (Voir Figure 3).

Comme on peut le voir ci-dessous, le premier genre d'innovation est appelé "*optimisation opérationnelle*". Il est axé sur l'efficience (faire mieux avec les mêmes ressources) et représente une vision assez basique de l'innovation. Ce type d'innovation peut permettre

d'améliorer les processus d'entreprise mais ne contribue pas totalement à une transformation du business model (Adams et al., 2015).

Les deux autres types d'innovation appelés respectivement "transformation organisationnelle" et "création de systèmes" se concentrent tous deux sur le fait de faire mieux en faisant de nouvelles choses. Ces deux types d'innovation permettent de favoriser une transformation plus durable et, par conséquent, de participer activement à l'atteinte des ODDs (Adams & al., 2015).

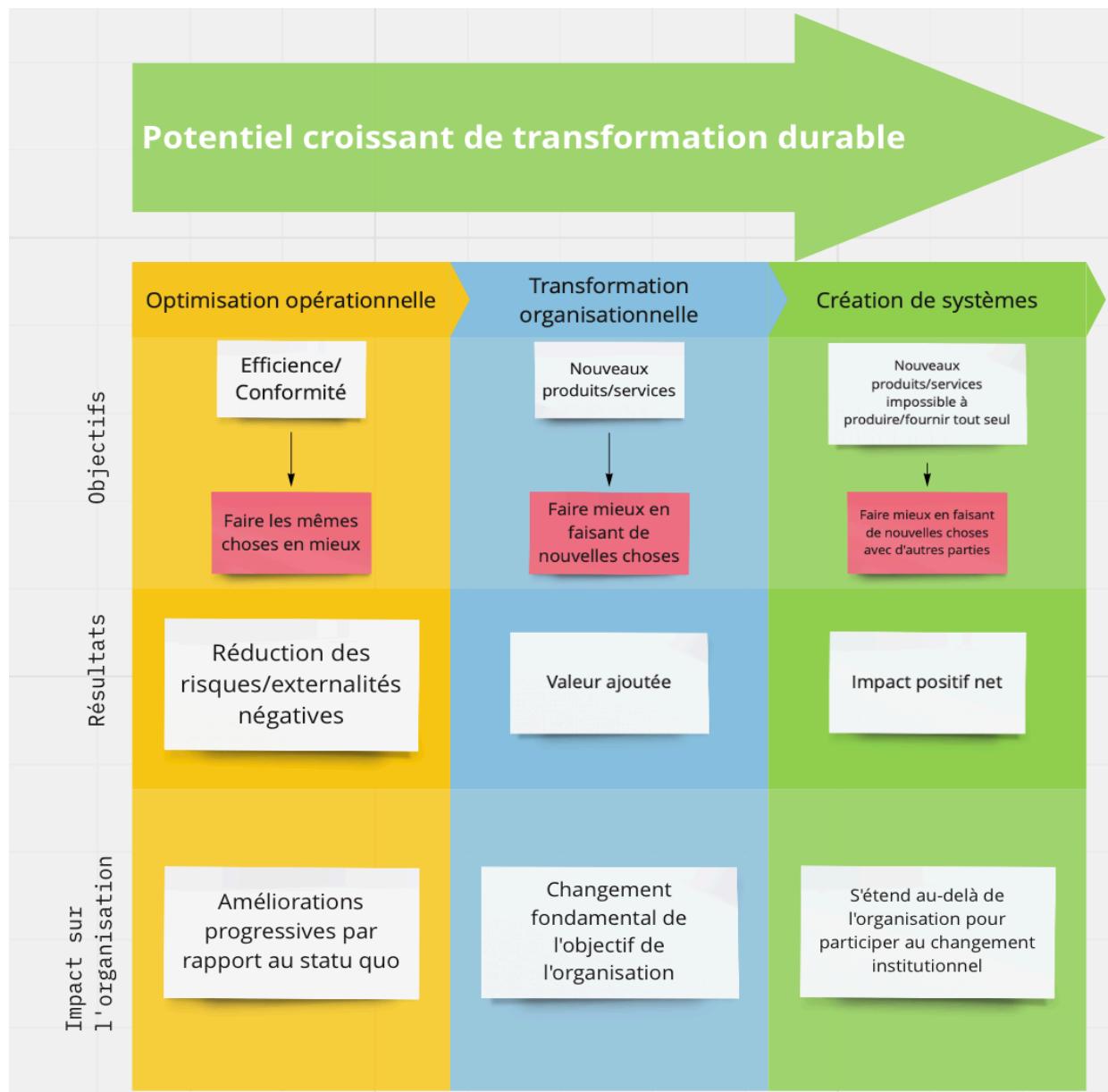


Figure 3 : Modèle SOI (Sustainability-oriented Innovation). Adapté à partir de « Sustainability-oriented Innovation, a systematic review » de Adams et al. (2015). International Journal of Management Reviews, 18, p.180 – 205

Nous déterminerons plus loin dans ce mémoire si la blockchain se trouve parmi les technologies à grand potentiel de transformation durable.

2. Blockchain

2.1 Origine de la blockchain et de la DLT

Les registres distribués, ou “*distributed ledger technology*” (DLT), trouvent leur origine dans les années 90, lorsque les premiers blocs de données protégés grâce à la cryptographie ont été décrits (Robinson, 2018). Cependant, ce n'est qu'en 2008 que les concepts de la première blockchain fonctionnelle ont été exposés. Nous pouvons les trouver dans le livre blanc de Satoshi Nakamoto (une personne/entité encore inconnue à ce jour), qui présente les principes du Bitcoin : un “*système de paiement électronique de pair à pair*” qui s'appuie la technologie blockchain pour créer un nouveau système de transactions financières (Nakamoto, 2008).

Le terme “*blockchain*” est ainsi devenu synonyme de DLT et de Bitcoin, bien que ce dernier ne soit en réalité qu'un seul cas d'application de la technologie. Il existe effectivement différentes sortes de blockchain, avec chacune des propriétés qui lui sont spécifiques et qui sont adaptées à différents cas d'application. Toutes les blockchains existantes à ce jour possèdent toutefois certaines caractéristiques communes, à savoir qu'elles sont (au moins partiellement) décentralisées et distribuées (Voir Figure 4). Contrairement aux technologies de l'information plus traditionnelles qui sont largement centralisées de par leur nature, le mode de fonctionnement de la blockchain présente un certain nombre d'aspects supplémentaires qui la rendent intéressante, voire révolutionnaire (Nakamoto, 2008).

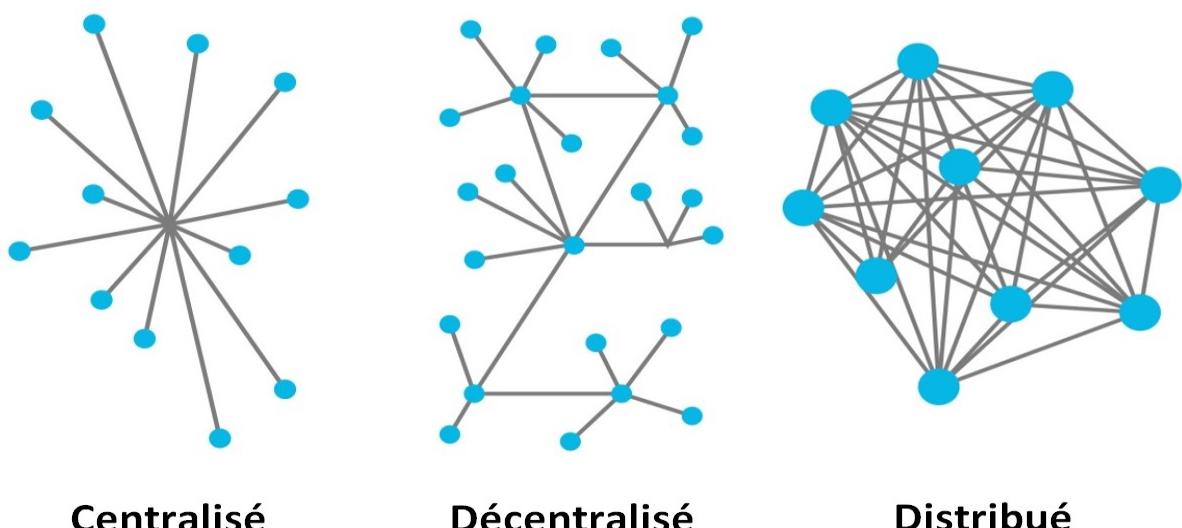


Figure 4 : Système centralisé/décentralisé/distribué. Reproduit à partir de « Qu'est-ce qui différencie la Preuve de Travail de la Preuve d'Enjeu ? », par [toutsurlebitcoin.fr](https://www.toutsurlebitcoin.fr/quest-ce-qui-differencie-preuve-de-travail-et-preuve-denjeu.htm). (s.d.). Récupéré le 15 mars 2021 de <https://www.toutsurlebitcoin.fr/quest-ce-qui-differencie-preuve-de-travail-et-preuve-denjeu.htm>

2.2 La blockchain, c'est quoi ?

La blockchain est une sorte de grand registre digital et public qui peut être utilisé pour enregistrer, confirmer et transférer tous types d'actifs au sein d'un réseau public ou privé. En substance, la technologie blockchain est un nouveau type de structure de base de données qui peut changer la façon dont nous échangeons de la valeur (Mougayar, 2016).

Swan (2015) explique qu'un système comme la blockchain ne doit pas seulement être utilisé pour acter des transactions incluant toute monnaie, tout contrat financier ou tout type d'actif. Il doit être considéré comme une base de données interactive et géante ; un système d'enregistrement et d'inventaire permettant d'enregistrer, de suivre, de contrôler et de transiger tous les actifs de valeur (Swan, 2015).

Cette base de données fonctionne de manière décentralisée et enregistre toutes les transactions à travers un réseau de pair à pair. Chaque transaction saisie dans la base de données est enregistrée de manière permanente. Les transactions ne peuvent être effacées ou modifiées ultérieurement, et elles ne peuvent être mises à jour que de manière itérative. Le système verrouille l'historique des transactions dans des blocs de données, tous reliés entre eux et sécurisés à l'aide de moyens cryptographiques, ce qui crée une chaîne immuable de transactions. Les nouvelles transactions qui sont ajoutées à la chaîne doivent être approuvées par les participants du réseau. Il en résulte une infrastructure partagée de pair à pair, dans laquelle les tiers de confiance et médiateurs qui facilitent habituellement ces transactions sont totalement ou partiellement supprimés (Mougayar, 2016).

Par ailleurs, et comme nous le verrons de manière plus détaillée au point 2.5, la blockchain offre à tous les participants la possibilité de vérifier l'authenticité de chaque bloc de la chaîne, ce qui renforce la confiance, la transparence et l'intégrité entre les différents participants. Cette technologie permet ainsi de générer des transactions de confiance directement entre deux ou plusieurs parties. Ces transactions sont alors authentifiées par une collaboration de masse et alimentées par l'intérêt collectif (Tapscott & Tapscott, 2018).

Mougayar (2016) ajoute que la blockchain peut être expliquée selon les trois perspectives suivantes : la perspective technique, commerciale et juridique. D'un point de vue technique, elle peut être présentée comme étant un registre numérique des transactions qui est dupliqué et distribué sur l'ensemble de son réseau de systèmes informatiques. D'un point de vue commercial, la blockchain peut être considérée comme un réseau d'échange de pair à pair en ligne et adapté à tout type de transactions impliquant une valeur, et ce, sans l'intervention de tiers intermédiaires. Finalement, du point de vue juridique, la blockchain peut être vue comme une technologie qui peut faciliter la validation des transactions et remplacer les entités auxquelles on faisait auparavant confiance pour s'en charger (Mougayar, 2016).

2.3 La blockchain, comment ça marche ?

La blockchain s'articule autour de trois concepts importants : les blocs, les mineurs et les nœuds.

Dans une blockchain, les transactions sont enregistrées dans des blocs. Chaque bloc nouvellement généré fait référence au bloc qui le précède par un numéro d'identification unique appelé "*hash*". Les blocs sont ainsi inter-reliés et constituent donc une chaîne, d'où l'appellation "*blockchain*" (BitPanda Academy, s.d.).

Les mineurs créent de nouveaux blocs sur la chaîne par un processus appelé « *minage* ». Les mineurs utilisent un logiciel informatique pour résoudre un problème mathématique incroyablement complexe consistant à trouver un « *nonce* » (nombre arbitraire et unique utilisé en cryptographie) qui génère un « *hachage* » (opération consistant à appliquer une fonction mathématique qui permet de créer l'empreinte numérique d'une transaction) accepté. Le nonce recherché ne comporte que 32 bits et le hachage en comporte 256, ce qui signifie qu'il existe environ quatre milliards de combinaisons possibles qui doivent être exploitées avant de trouver la bonne combinaison. Lorsque cela se produit, on dit que les mineurs ont trouvé le « *nonce d'or* » et leur bloc est ensuite ajouté à la chaîne. Pour modifier un bloc précédemment ajouté à la chaîne, il faudrait miner à nouveau le bloc modifié, ainsi que tous les blocs qui le suivent. C'est pourquoi il est extrêmement difficile de manipuler une blockchain. En effet, trouver les nonces d'or de chaque bloc nécessiterait une quantité énorme de temps et de puissance de calcul (BuiltIn, s.d.).

Lorsqu'un bloc est miné avec succès, la modification est acceptée par tous les nœuds du réseau et le mineur est récompensé financièrement. Les nœuds peuvent prendre la forme de n'importe quel type de dispositif électronique, et chacun d'entre eux possède sa propre copie de la blockchain. Le réseau doit ainsi approuver de manière algorithmique tout nouveau bloc miné pour que la chaîne soit mise à jour (BuiltIn, s.d.).

Grâce au processus expliqué ci-dessus et illustré par la Figure 5, les blockchains peuvent être utilisées par des parties qui ne se font pas nécessairement confiance, car elles savent que leurs transactions sont infalsifiables et vérifiables par tous (BitPanda Academy, s.d.).

A titre d'exemple, imaginons que vous possédez des Bitcoins (BTC) et que vous souhaitez les vendre contre des dollars. Pour ce faire, vous allez mettre un ordre de vente sur une plateforme d'échange tel que Coinbase ou Binance. Lorsqu'une personne acceptant d'acheter vos Bitcoins au prix auquel vous souhaitez les vendre se présentera, une transaction entre vous et cette personne sera initiée sur la blockchain. Les informations inhérentes à cette transaction seront inscrites dans un bloc regroupant également les informations d'autres transactions s'effectuant en parallèle. Une fois que le bloc en question est validé par les

nœuds du réseau, il est ajouté à la chaîne. Suite à ce mécanisme, l'acheteur recevra le nombre de Bitcoins que vous avez souhaité vendre tandis que vous obtiendrez la contrepartie en dollars. Ce mécanisme transactionnel est illustré ci-dessous.

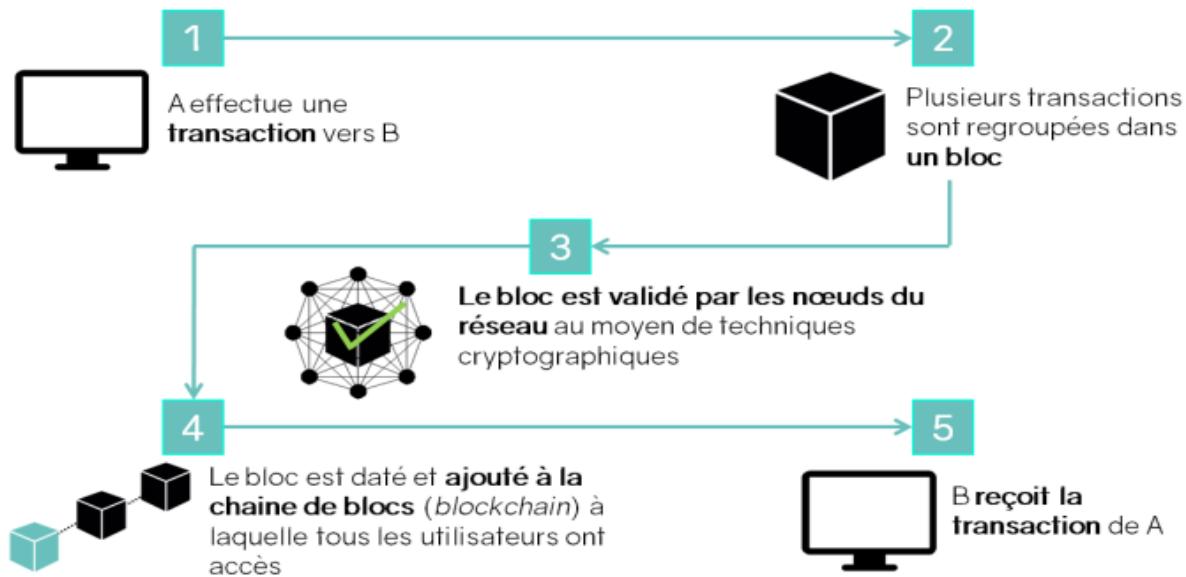


Figure 5 : Fonctionnement d'une blockchain. Reproduit à partir de « Fonctionnement d'une blockchain », par David. (2018). Récupéré le 07 janvier 2021 de <https://blog.ippon.fr/2018/01/08/fonctionnement-dune-blockchain/>

2.4 La blockchain, une technologie, plusieurs consensus ?

Selon Rokkex (2019), un consensus est une procédure de prise de décision. Son objectif est de garantir que tous les participants du réseau sont d'accord à propos de l'ajout de nouvelles informations ou de transactions. En cryptographie, le consensus garantit que la blockchain est légitime et incite les participants à rester honnêtes. Les consensus sont fondamentaux car ils permettent d'éviter qu'une seule entité puisse manipuler l'ensemble du système. Ils garantissent également que chaque membre du réseau respecte les règles de ce dernier (Rokkex, 2019).

Il existe de nombreux consensus tel que le “Proof-of-Work”, le “Proof-of-Stake”, le “Proof-of-Activity”, le “Proof-of-Authority”, le “Proof-of-Location”, etc. (Rokkex 2019). Selon Massessi (2019), *“la principale différence entre les mécanismes de consensus réside dans la manière dont ils délèguent et récompensent la vérification des transactions. (...) D'une manière ou d'une autre, les algorithmes de consensus de la blockchain se résument à une sorte de vote où le nombre de votes d'un utilisateur est lié à la quantité d'une ressource limitée qui est sous son contrôle.”*

Dans le contexte de ce mémoire, nous allons nous intéresser exclusivement aux deux consensus les plus répandus au sein des blockchains existantes à ce jour : la preuve de travail

et la preuve d'enjeu, que l'on nomme plus communément le "Proof-of-Work" (PoW) et le "Proof-of-Stake" (PoS) respectivement.

2.4.1 Le consensus Proof-of-Work (PoW)

Le consensus Proof of Work (PoW) est un système qui exige un effort non négligeable mais réalisable afin de décourager les manipulations informatiques, telles que l'envoi de spams ou le lancement de cyber-attaques. Ce système a été adapté à la sécurisation d'un concept de monnaie numérique par Hal Finney en 2004, avec l'idée de "*preuve de travail réutilisable*" utilisant l'algorithme de hachage SHA-256. Après son introduction en 2009, le Bitcoin est devenu la première application de large envergure qui se basait sur le consensus PoW dépeint par Finney. De nombreuses autres crypto-monnaies ont suivi et se basent également sur le consensus Proof-of-Work, leur permettant d'opérer sur une blockchain sécurisée et décentralisée (FrankenField, 2021).

Il s'agit en fait d'un mécanisme décentralisé qui exige que les membres d'un réseau déploient des efforts pour résoudre une énigme mathématique arbitraire afin d'empêcher quiconque de manipuler le système. Le consensus PoW est largement utilisé dans le secteur des crypto-monnaies, pour valider les transactions et générer de nouveaux tokens (c.-à-d. unités de la crypto-monnaie en question) (FrankenField, 2021).

Comme expliqué précédemment, les transactions en Bitcoin et autres crypto-monnaies (se basant sur le même type de consensus) peuvent ainsi être traitées en pair à pair de manière sécurisée, et sans qu'un tiers de confiance ne soit nécessaire.

Cependant, au plus le nombre de mineurs présents sur le réseau augmente, au plus les blockchains de type PoW nécessitent d'énormes quantités d'énergie pour leur fonctionnement (FrankenField, 2021). Nous reviendrons sur cet aspect au point 2.7.1.

2.4.2 Le consensus Proof-of-Stake (PoS)

Le concept de Proof-of-Stake (PoS) est une alternative au consensus PoW et stipule qu'une personne peut valider des transactions sur la blockchain en fonction du nombre de tokens qu'elle détient. Cela signifie que plus un mineur possède de tokens d'une crypto-monnaie, plus son pouvoir de minage pour cette même crypto-monnaie est important (FrankenField, 2019).

Effectivement, dans un mécanisme de consensus PoS, le nœud qui enregistre chaque transaction est choisi par un algorithme. Ce dernier évalue la quantité de crypto-monnaie détenue par le propriétaire du nœud. Plus cette quantité est importante, plus le nœud a de chances d'être choisi pour valider et enregistrer la transaction. De cette façon, il est possible de réduire considérablement la complexité et la lourdeur du travail cryptographique

nécessaire à la validation transactionnelle, ce qui entraîne des gains de débit massifs pour l'ensemble du réseau. Par ailleurs, comme chaque nœud doit miser sa propre monnaie pour participer, il serait beaucoup trop coûteux pour quiconque d'attaquer le réseau (Wilcox, 2020).

Selon Frankenfield (2019), la preuve d'enjeu (PoS) cherche également à résoudre le problème lié à l'importante consommation d'énergie des blockchains PoW en attribuant aux mineurs de type PoS une puissance de minage limitée à la proportion de tokens détenus. Nous reviendrons sur cet aspect plus loin dans ce mémoire.

2.5 La blockchain, quels avantages ?

Il est avancé que la blockchain a le potentiel de remettre en cause les modèles d'affaires traditionnels et en même temps, la façon dont toutes nos activités économiques, sociales, politiques et scientifiques sont organisées (Brakeville et Perepa, 2019). Dans cette partie, nous allons nous pencher sur les différents avantages que cette technologie a à offrir afin de mieux comprendre le potentiel disruptif décrit par Brakeville et Perepa.

2.5.1 Transparence

Certaines caractéristiques telles que la traçabilité, la sécurité et la décentralisation font que la blockchain peut apporter une transparence accrue aux business models actuels. La blockchain rend ainsi les données transparentes d'une manière qui n'existe pas dans les systèmes financiers auparavant (Jung, 2019).

Comme expliqué précédemment, lorsqu'une transaction est validée et enregistrée sur la blockchain, elle est distribuée au sein du réseau. Cette liste croissante d'enregistrements donne lieu à une chaîne immuable de transactions dont les informations sont accessibles en temps réel et publiquement. Chaque participant peut ainsi consulter l'historique des transactions qui révèle tous les détails de chacune d'entre elles. En outre, toutes les transactions sont signées avec une clé privée, qui n'appartient qu'à une seule personne. Par conséquent, les transactions ne peuvent être directement liées qu'à la personne qui les a effectuées. La blockchain offre donc à toutes les parties prenantes un aperçu et une visibilité accrue concernant l'ensemble du processus transactionnel, ce qui augmente la transparence globale (Seppälä, 2016).

2.5.2 Traçabilité

La traçabilité est régie par la norme ISO 8402 qui la définit comme « *l'aptitude à retrouver l'historique, l'utilisation ou la localisation d'une entité au moyen d'identifications enregistrées* » (Forcam, 2020).

La traçabilité vise principalement à permettre un suivi et un traçage précis des produits. Les capacités de suivi permettent aux organisations de contrôler de près la progression d'un produit tout au long du processus de fabrication, et ce, jusqu'au consommateur/destinataire final. Ceci permet notamment aux entreprises d'optimiser leurs chaînes de production et d'approvisionnement en les rendant plus efficientes et moins coûteuses (Forcam, 2020).

La blockchain répond à ce besoin en permettant la création de chaînes de transactions qui se veulent sécurisées, irréversibles et horodatées. De plus, comme la blockchain est un registre public et partagé, elle permet aux participants de suivre et de retracer chaque étape de la transaction depuis son origine. De cette façon, le système peut, par exemple, réduire le temps et l'argent dépensés par une société d'audit pour vérifier l'authenticité d'une chaîne d'approvisionnement (Tapscott et Tapscott, 2018).

2.5.3 Sécurité

Les partisans de la blockchain affirment que la technologie améliore également la sécurité des transactions. Chaque transaction sur la blockchain est enregistrée et vérifiée par cryptographie. De plus, l'authenticité des blocs est garantie par le hachage effectué par les mineurs. Grâce à ce système cryptographique, la blockchain permet ainsi la mise en place d'une plateforme sécurisée (Tapscott et Tapscott, 2018).

En effet, les codes cryptographiques et les contrôles par les membres du réseau réduisent les chances que les transactions fassent l'objet de pratiques malveillantes, de même que certains risques tels que le piratage et la fraude. De plus, comme les données de transaction sont stockées de manière cryptée et décentralisée, les données ne peuvent pas être altérées, ce qui augmente la sécurité de la chaîne (PwC, s.d.).

2.5.4 Confidentialité

Avec l'essor d'Internet, de nombreuses plateformes en ligne se sont développées. Cependant, celles-ci font l'objet d'une attention croissante car elles collectent souvent les données personnelles des utilisateurs à des fins commerciales. La vie privée des individus sur les réseaux en ligne est ainsi devenue une question qui a suscité beaucoup d'attention ces derniers temps, notamment avec les scandales de *Cambridge Analytica* et, plus récemment, de l'application WhatsApp (Ladiray, 2021).

Selon Mougayar (2016), la blockchain se présente comme une potentielle solution face à ce problème, car elle permet aux utilisateurs d'avoir un contrôle accru sur leur identité. En outre, les données des utilisateurs ne sont pas stockées dans une base de données centrale et ne sont donc pas contrôlées par un tiers.

La blockchain garantit également la confidentialité des utilisateurs en utilisant la cryptographie pour vérifier l'identité de ceux-ci. En effet, chaque membre du réseau possède une clé publique et une clé privée qui représentent son identité sur le réseau. De plus, les blockchains permettent souvent aux utilisateurs de choisir le niveau de confidentialité qui leur convient pour chaque transaction (Mougaray, 2016).

IBM (2018) conclut que la blockchain peut être considérée comme un mécanisme innovant permettant de mieux contrôler l'utilisation des données personnelles, bien que celle-ci ne réponde pas encore à tous les défis du RGPD (Règlement Général sur la Protection des Données).

2.5.5 Désintermédiation

Dans les modèles de transaction traditionnels, les tiers intermédiaires sont nécessaires pour établir la confiance entre les différentes parties prenantes. Ces intermédiaires prennent la forme de banques, de notaires, de compagnies d'assurance, etc. (Deloitte, s.d.).

Le terme "*désintermédiation*" désigne l'évolution de ce type de marché vers une chaîne de valeur plus courte. Une des raisons derrière cette tendance à la désintermédiation est que les producteurs et les consommateurs semblent avoir de fortes incitations économiques à se passer des intermédiaires de confiance (OCDE, 2010). En effet, ceux-ci font augmenter le coût de la chaîne de valeur, réduisant ainsi la rentabilité des producteurs et faisant grimper les prix finaux pour les consommateurs (Wigand, 1995).

La blockchain fonctionne à l'aide d'un réseau de pair à pair qui peut potentiellement perturber les modèles de transaction mentionnés ci-dessus. Une des caractéristiques de cette technologie est de constituer des preuves horodatées en remplaçant la confiance interindividuelle par une confiance algorithmique. En outre, les smart-contracts (c.-à-d. les contrats intelligents qui s'auto-exécutent) de la blockchain permettent de repenser les pratiques dans de nombreux domaines tels le e-commerce, la communication interbancaire, les levées de fonds et la justice (preuves horodatées, actes authentifiés par la blockchain, etc.) (Quiniou, 2019).

Ceci permet par exemple de réaliser des transactions financières sans passer par une banque, ou encore de signer des contrats sans l'intervention d'avocats. Ainsi, ce réseau de transactions de pair à pair invite à une évolution vers une structure d'échange de valeur décentralisée et fondamentalement différente des modèles traditionnels. Cette décentralisation permet également d'éviter certains abus de marché liés aux situations de monopole. De plus, elle offre aux utilisateurs une autonomie dans leurs transactions, ce qui renforce la position sur le marché des consommateurs et des producteurs et implique un changement important dans les modes de gouvernance (PwC, 2017).

De Filippi (2017) résume l'effet de désintermédiation de la blockchain en expliquant que cette dernière est en fin de compte un moyen pour les individus de coordonner des activités communes, d'interagir directement les uns avec les autres et de se gouverner d'une manière plus sûre et décentralisée.

2.6 La blockchain, quel(le)s inconvénients/limites ?

Bien que la blockchain présente de nombreux avantages, toute innovation technologique s'accompagne de ses inconvénients et de ses défis (Tapscott et Tapscott, 2018). De nombreux "*crypto-sceptiques*" remettent en question les promesses de cette technologie. Cette section n'aborde pas les aspects techniques de la blockchain, mais se concentre plutôt sur les défis et les limites qui peuvent être identifiés pour la blockchain en tant que technologie de réseau.

2.6.1 Préoccupations en matière de transparence, d'anonymat, et de sécurité

A côté des avantages découlant d'une transparence et d'une traçabilité accrues, certaines caractéristiques suscitent également des inquiétudes. Dans un réseau basé sur la blockchain, tous les membres du réseau doivent partager leurs données, ce qui rend publics les détails de chaque transaction tout au long de la chaîne de valeur. Cela implique que n'importe qui peut retracer le parcours de la transaction, en ayant accès à certaines informations spécifiques telles que l'origine et la valeur de celle-ci. Mougayar (2016) affirme que cette transparence pourrait mettre l'éthique de certaines organisations à mal et que, par conséquent, l'adoption de ce système risque de rencontrer une certaine résistance, car il pourrait rendre les entreprises vulnérables (Mougayar, 2016).

En outre, grâce à la cryptographie, la blockchain établit des identités numériques, ce qui permet l'anonymat des utilisateurs dans les transactions (Mougayar, 2016). Par conséquent, beaucoup considèrent que le réseau est susceptible d'être utilisé par les criminels, par exemple pour des activités de blanchiment d'argent (Tapscott et Tapscott, 2018).

Par ailleurs, malgré des bases de données réputées inviolables grâce au réseau crypté et décentralisé de la blockchain, Niranjanamurthy et al. (2018) affirment que certains problèmes de cyber-sécurité doivent encore être résolus avant que le grand public ne confie ses données personnelles à cette technologie de réseau.

Une des menaces principales est ce qu'on appelle une attaque à 51 % contre la blockchain. Cela se produit lorsqu'un acteur malveillant parvient à contrôler plus de la moitié de la puissance de calcul du réseau, ce qui a pour effet que la version de la blockchain de l'attaquant est considérée comme la "vérité", alors que ce n'est pas forcément le cas. Par

conséquent, l'auteur de ce type d'attaque peut fausser la blockchain et décider quelles transactions sont approuvées et ajoutées à celle-ci (National Law Review, 2020).

Le dernier désavantage principal qui est avancé est le problème de scalabilité de la blockchain et des crypto-monnaies. Les crypto-sceptiques pointent du doigt la vitesse limitée à laquelle les transactions sont traitées sur la blockchain par rapport aux méthodes transactionnelles existantes. De plus, des plafonds parfois trop bas sont fixés pour le nombre de transactions pouvant être traitées sur la chaîne. Ce défaut d'évolutivité est particulièrement problématique pour les entreprises qui ont recours à des transactions massives et qui ont besoin de réseaux permettant un débit élevé de transactions tout en maintenant une faible latence (De Meijer, 2021).

2.6.2 Contraintes réglementaires

Comme expliqué précédemment, avec la blockchain, le rôle des tiers de confiance est diminué, ce qui crée un réseau décentralisé et distribué. Par conséquent, cette technologie engendre un déplacement du pouvoir vers le public. Cela soulève des questions à propos de la gestion et de la responsabilité inhérentes à l'utilisation de cette technologie (Sangokoya et Ajoku, 2018).

Les régulateurs veulent notamment s'assurer que les criminels ne puissent pas exploiter la blockchain et les crypto-monnaies. Par conséquent, les législateurs pourraient bientôt commencer à faire pression pour rendre les transactions en crypto-monnaies et via la blockchain moins anonymes. Les projets se basant sur la blockchain pourraient ainsi être poussés à trouver un équilibre entre la confidentialité des utilisateurs et un modèle plus conforme à la loi anti-criminalité (Chen, 2021).

Une des autres grandes questions réglementaires autour de la blockchain est de savoir si les crypto-monnaies doivent être considérées comme des valeurs mobilières ou non. Si elles le doivent, elles seront assujetties aux réglementations de différents organismes nationaux, tels que la SEC (the Securities and Exchange Commission) aux États-Unis. La SEC a d'ailleurs poursuivi la crypto-monnaie Ripple (XRP) pour cette même raison en 2021 (procès toujours en cours). Si les crypto-monnaies telles que le Ripple sont effectivement considérées comme des actifs mobiliers, cela impliquerait qu'elles devront se conformer à toute une série d'obligations et d'exigences légales pour éviter d'être sanctionnées (Chen, 2021).

En outre, au vu du manque de standardisation réglementaire vis-à-vis de la blockchain et des crypto-monnaies, d'autres défis légaux plus spécifiques peuvent également se présenter selon les réglementations nationales partout dans le monde (KYC-CHAIN, 2020).

2.6.3 Autres inconvénients

Le développement socio-économique est inextricablement lié à l'innovation technologique, car la technologie, la société, l'économie et l'environnement évoluent conjointement (ECOSOC Youth Forum, 2017). Par conséquent, l'évolution technologique peut également être une source de conflit et entraîner des problèmes annexes ou des conséquences imprévues (Head & Alford, 2015).

L'une de ces conséquences est liée au fait que presque toutes les technologies consomment des ressources, ce qui peut engendrer des effets négatifs sur l'environnement (Sustainable Development Knowledge Platform, 2016). C'est notamment le cas de la blockchain et de la consommation d'énergie qui y est associée. Bien que certaines améliorations aient été apportées au consensus PoW, cette technologie demeure particulièrement énergivore. (Sedlmeir & al., 2020). Nous reviendrons sur cet aspect au point 2.7.1.

En outre, les impacts du progrès technologique ne sont souvent pas neutres, d'où le risque que les avantages soient distribués de manière inégale entre les pays du nord et les pays du sud (Sustainable Development Knowledge Platform, 2016).

2.7 Blockchain et impact environnemental

Comme nous l'avons vu précédemment, les nouvelles technologies ont le potentiel de transformer rapidement tous les aspects de notre société. On estime par exemple que 70 % de la nouvelle valeur créée dans l'économie au cours de la prochaine décennie reposera sur des plateformes numériques (Herweijer, 2019).

Malgré tous les avantages qu'elle offre, la technologie peut également exercer une pression accrue sur notre société. Chaque jour, de nouvelles questions sont soulevées par les gros titres des médias sur les risques en matière de vie privée, de sécurité, et sur l'impact environnemental présumé négatif de certaines technologies (Herweijer, 2019).

Dans cette partie, nous passerons en revue l'impact environnemental de la blockchain en nous focalisant sur deux aspects principaux : la consommation énergétique causée par cette technologie et le potentiel de celle-ci en termes de contribution au développement durable.

2.7.1 Blockchain et consommation énergétique

La conséquence environnementale la plus connue de la blockchain concerne sa consommation d'énergie et, par conséquent, son impact négatif sur l'environnement. Le processus de vérification des transactions, basé sur l'algorithme Proof-of-Work, défini précédemment, est extrêmement gourmand en énergie car il nécessite une énorme puissance

de traitement, et donc d'électricité, pour exécuter les calculs informatiques associés (de Vries, 2018).

Le problème énergétique des blockchains de type PoW fut d'ailleurs récemment mis en lumière par Elon Musk lorsque celui-ci annonça en mai 2021 que le Bitcoin ne serait plus accepté comme moyen de paiement pour l'achat de voitures de la marque Tesla (du moins temporairement). Il avait alors justifié cette décision en twittant que la consommation en électricité générée par les transactions en Bitcoin était bien trop importante et que les conséquences sur l'environnement qui en découlaient n'étaient pas en adéquation avec la stratégie de développement durable menée par Tesla (Leparmentier, 2021).

Selon Sedlmeir (2020), la forte consommation d'énergie des blockchains PoW n'est pas le résultat d'algorithmes inefficaces ou de matériels informatiques obsolètes. En effet, ce type de blockchains est énergivore par nature. C'est précisément leur forte consommation d'énergie qui protège les blockchains PoW contre d'éventuelles attaques. Selon le scénario, un attaquant doit supporter au moins 25 à 50 % de la puissance de calcul totale du réseau. Par conséquent, afin de pouvoir manipuler ou contrôler le système, il doit également supporter la même proportion de la consommation énergétique totale (Sedlmeir, 2020).

Au vu de ce système, une adoption massive de la blockchain pourrait contrecarrer les efforts d'atténuation du changement climatique, car l'électricité reste largement produite à partir de combustibles fossiles dans le monde entier. En effet, la production à partir de combustibles représente près de deux tiers de la production mondiale totale d'électricité (European Environment Agency, 2021).

La crypto-monnaie Bitcoin est particulièrement illustrative de ce problème. En effet, à titre de comparaison, le Bitcoin serait 20 000 fois plus énergivore que Visa (Brosens, 2017). Par ailleurs, certains analystes avaient démontré que l'énergie consommée pour chaque transaction en Bitcoin avait atteint 635 kWh en 2019, ce qui équivaut à une quantité d'électricité qui pourrait alimenter environ 21 foyers américains pendant 1 jour (Digiconomist, 2019).

D'autres études datant de 2019 estimaient que la consommation d'électricité de Bitcoin se situait entre 20 et 80 TWh par an, soit environ 0,1-0,4% de la consommation mondiale d'électricité (Kamiya, 2019). En 2021, avec une adoption plus importante de la blockchain comparativement à 2019, la consommation liée au Bitcoin est bien supérieure. En effet, le Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI) (2021) cite, quant à lui, un chiffre de 137 TWh par an, ce qui dépasse nettement la consommation électrique annuelle de certains pays comme la Belgique et les Pays-Bas (93 TWh et 121 TWh respectivement) (Eurostat, 2021). Selon Koomey (2019), ces estimations doivent cependant être interprétées avec prudence, en raison de problèmes liés à la méthodologie et à la disponibilité limitée des données.

Bien que ces statistiques semblent impressionnantes, il faut garder à l'esprit qu'elles ne concernent que le Bitcoin, qui n'est qu'une crypto-monnaie, et donc qu'une application de la blockchain parmi tant d'autres. Il sera donc essentiel de trouver un moyen de réduire l'énergie consommée pour la vérification des transactions. Le remplacement du mécanisme de consensus original, c'est-à-dire l'algorithme Proof-of-Work, par d'autres approches (comme le consensus Proof-of-Stake) a déjà été suggéré (Wilcox, 2020).

Certaines crypto-monnaies et applications développées sur la blockchain s'appuient déjà sur ces alternatives. Toutefois, une évaluation approfondie de chaque mécanisme et de son efficacité énergétique est encore nécessaire (Parlement Européen, 2018). Selon de Vries (2019), il serait également possible de réduire la consommation énergétique du Bitcoin en restructurant la manière dont la maintenance de la blockchain se produit.

Par ailleurs, tout comme d'autres technologies émergentes basées sur les technologies de l'information et de la communication (TIC), la blockchain suscite également des inquiétudes concernant les déchets électroniques (e-waste). En effet, pour rester compétitifs, les mineurs ont besoin de matériel de minage de plus en plus efficace, ce qui entraîne une obsolescence rapide (de Vries, 2019). Des estimations approximatives montrent que le Bitcoin crée 135 g de déchets électroniques par transaction, soit 30 000 fois plus qu'une transaction Visa (c.-à-d 0,0045 g/transaction) (de Vries, 2019).

2.7.2 La blockchain, un allié du développement durable ?

Lorsque les ODDs ont été conçus en 2012, la technologie blockchain n'en était qu'à ses débuts. A l'époque, peu de gens auraient pu prévoir la trajectoire et le potentiel de la blockchain en termes de contribution au développement durable. En 2021, grâce à une adoption bien plus importante et aux caractéristiques avantageuses présentées précédemment, la blockchain est désormais considérée par beaucoup comme un potentiel allié du développement durable, et ce, malgré la consommation énergétique qui y est associée.

Effectivement, l'ONU affirme dans son rapport "Au-delà des Bitcoins" (2019) que la blockchain a un potentiel énorme pour relever de nombreux défis associés aux objectifs de développement durable. Achim Steiner, administrateur du Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) (2019) ajoute que « *la rapidité et l'omniprésence des mutations technologiques (y compris la blockchain) offrent des possibilités sans précédent de développement durable, mais elles s'accompagnent également d'un risque d'inégalité croissante entre et au sein des pays. Il appartient aux décideurs politiques de tirer parti de cette transformation pour de bon et d'atténuer leurs risques*

Comme l'indique Achim Steiner (2019), la blockchain n'aura que peu d'effet en l'absence d'institutions juridiques qui la supportent et de mécanismes de résolution des conflits solides. Un autre aspect qui inquiète est le fossé numérique. En effet, la blockchain semble bénéficier principalement aux pays du nord en raison de la connexion internet et du matériel informatique nécessaires pour faire partie du réseau. Ceci signifie que les communautés plus pauvres et marginalisées des pays du sud ont moins de chances d'avoir accès à des connexions internet fiables, et donc moins de chances d'accéder aux bénéfices de la blockchain (Programme des Nations Unies pour le Développement, 2019).

A mesure que la blockchain évolue et pour autant que les obstacles techniques et environnementaux mentionnés ci-dessus soient résolus, l'ONU estime que la technologie pourrait être d'une aide cruciale dans la lutte contre le changement climatique (Programme des Nations Unies pour le Développement, 2019).

Selon un rapport du Forum Économique Mondial (2020), il existe trois domaines principaux dans lesquels la blockchain pourrait avoir un impact positif déterminant en matière de développement durable : la mise en place de chaînes d'approvisionnement résilientes et transparentes, la création d'institutions publiques plus fortes et responsables, et l'incitation à l'approvisionnement et à la consommation responsables. Nous allons donc nous concentrer sur ces trois aspects dans le cadre de ce mémoire.

2.7.2.1 La mise en place de chaînes d'approvisionnement résilientes et transparentes

Les ODDs constituent un ensemble d'objectifs ambitieux qui exigent une action collaborative et ambitieuse. Pour que les entreprises progressent suffisamment vers la réalisation de ces objectifs, Transparency One (s.d.) affirme qu'elles doivent s'intéresser à leurs chaînes d'approvisionnement et les améliorer.

Cependant, depuis mars 2020, la pandémie de Covid-19 a causé d'importants soucis aux chaînes logistiques du monde entier. Le virus a ainsi mis en évidence les défis et les vulnérabilités des chaînes d'approvisionnement mondiales, augmentant par la même occasion les appels à la transparence et à la traçabilité (Harapko, 2021).

Le concept de transparence dans le domaine des chaînes d'approvisionnement était pratiquement inconnu il y a quinze ans, mais aujourd'hui il retient l'attention d'un nombre croissant d'organisations actives dans tous types de secteur. Pour Bateman et Bonanni (2019), les raisons de cet intérêt accru sont claires : les entreprises subissent la pression des gouvernements, des consommateurs, des ONG et d'autres parties prenantes pour divulguer davantage d'informations sur leurs chaînes d'approvisionnement. Ne pas répondre à ces demandes pourrait avoir des implications négatives sur la réputation et l'image de marque des entreprises. Le secteur alimentaire est particulièrement confronté à ce phénomène car de

plus en plus de clients demandent à connaître certaines informations relatives à la chaîne d'approvisionnement telles que l'origine des ingrédients, le bien-être des animaux et les conditions de travail des salariés (Bateman et Bonanni, 2019).

Cependant, et comme la Harvard Business Review (2020) l'indique, à l'heure actuelle, des erreurs d'exécution (telles que les erreurs dans les données d'inventaire) sont souvent impossibles à détecter en temps réel. Même lorsqu'un problème est découvert après coup, il est difficile et coûteux d'en déterminer la source ou de le résoudre en retracant la séquence des activités enregistrées. Bien que les systèmes ERP (largement répandus dans le domaine des chaînes d'approvisionnement) capturent tous les types de flux, il peut être difficile d'évaluer quelles écritures de journal (comptes clients, paiements, crédits pour retours, etc.) correspondent à quelle transaction d'inventaire. Cela est particulièrement vrai pour les entreprises qui effectuent des milliers de transactions chaque jour à travers un vaste réseau de partenaires et de produits tout au long de leur chaîne d'approvisionnement (Gaur et Gaiha, 2020).

Lorsque la blockchain est utilisée pour la tenue de registres dans les chaînes d'approvisionnement, les actifs tels que les unités de stock reçoivent des identifiants uniques, qui servent de jetons numériques. De même, les parties prenantes du réseau reçoivent des identifiants uniques, ou signatures numériques, qu'ils utilisent pour signer les blocs qu'ils ajoutent à la blockchain. Chaque étape de la transaction est alors enregistrée sur la blockchain comme un transfert du jeton d'un participant à l'autre, assurant ainsi la traçabilité de la chaîne d'approvisionnement (Gaur et Gaiha, 2020).

Par ailleurs, chaque bloc est crypté et distribué à tous les participants, qui conservent leurs propres copies de la blockchain. Ces copies peuvent ensuite servir de base d'audit fiable et inviolable. Étant donné que les participants disposent de leurs propres copies individuelles de la blockchain, chaque membre du réseau peut examiner l'état d'une transaction, identifier les erreurs et tenir les contreparties responsables de leurs actions respectives. En outre, aucun participant ne peut effacer les données préalablement enregistrées, car cela impliquerait de réécrire tous les blocs suivants sur toutes les copies partagées de la blockchain (Gaur et Gaiha, 2020).

Ainsi, et grâce aux avantages de la blockchain expliqués précédemment, les chaînes d'approvisionnement mondiales ont désormais la possibilité de devenir bien plus transparentes et traçables, ce qui pourrait générer d'importantes économies de coûts et de temps. Le temps gagné peut alors être consacré à une gestion des risques plus proactive pour les questions relatives aux ODDs. Par exemple, les entreprises pourraient déterminer les zones à risque potentiel de déforestation (ODD 15) ou de travail forcé (ODD 8) et déterminer si et comment leurs chaînes d'approvisionnement peuvent être affectées (Transparency One, s.d.).

2.7.2.2 *La création d'institutions publiques fortes et responsables*

Selon le Forum Économique Mondial (2020), cet aspect est directement lié à l'ODD n°16 : « promouvoir des sociétés pacifiques et inclusives pour le développement durable, assurer l'accès à la justice pour tous et mettre en place des institutions efficaces, responsables et inclusives à tous les niveaux ».

Selon la Banque Mondiale (2017), près de 1,7 milliard de personnes à travers le monde n'ont pas accès aux services financiers basiques. C'est notamment le cas pour 80% de la population d'Afrique subsaharienne. Ces personnes qui n'ont pas accès au crédit vivent souvent dans des zones rurales extrêmement pauvres où il n'y a pas d'accès direct aux services bancaires. De plus, ces personnes n'ont généralement pas d'antécédents en matière de crédit, ce qui a pour conséquence que le système financier traditionnel ne les accepte pas ou ne leur accorde pas non plus de crédit. Cette situation ne fait qu'accroître le fossé entre les populations bancarisées des pays du nord et celles non bancarisées des pays du sud (Deloitte, 2018).

De plus, dans de nombreux cas, la population non bancarisée ne dispose pas de documents d'identité, car elle n'a pas les moyens de les payer. Comme nous le verrons plus loin dans ce mémoire au travers de l'analyse de AID:Tech, les identités basées sur la blockchain ne nécessitent pas de documents traditionnels, ce qui permettrait à des centaines de millions de personnes d'être facilement identifiables sur une blockchain publique. Cela ouvrirait un tout nouvel éventail de possibilités pour les banques commerciales, car l'historique de crédit pourrait être facilement lié à une blockchain, ce qui permettrait aux personnes non bancarisées d'accéder ainsi aux services financiers (RSK, s.d.). La blockchain est donc aujourd'hui présentée comme une technologie qui a le potentiel de favoriser l'inclusion financière. Il faut toutefois préciser que l'intervention d'organisations tierces, tel que AID:Tech demeure aujourd'hui nécessaire pour les populations non bancarisées qui ne possèdent pas le matériel informatique indiqué (ordinateur ou smartphone).

Par ailleurs, en offrant un moyen décentralisé et efficace de stockage de données, la blockchain peut potentiellement résoudre les problèmes de corruption. Le cabinet d'avocats Nyman Gibson Miralis (2020) souligne ainsi quelques caractéristiques qui peuvent rendre les systèmes de données basés sur la blockchain plus résistants à la corruption :

- Toutes les modifications apportées aux données stockées sont publiquement enregistrées sur la blockchain, ce qui accroît la transparence.
- Une fois que les données sont stockées sur la blockchain, elles ne peuvent pas être manipulées ou modifiées de manière illégitime.
- Les données étant stockées sur des registres distribués, la sécurité du système est renforcée.

- Il n'est pas nécessaire de faire appel à un tiers pour vérifier les transactions, ce qui réduit les risques de corruption et de pots-de-vin.

Cullel (2019) ajoute que grâce aux principes de transparence, de responsabilité et de consensus, la blockchain peut également avoir un impact positif sur les modèles de vote démocratique, et ainsi promouvoir les principes de bonne gouvernance.

Tous les éléments mentionnés ci-dessus semblent donc favoriser la mise en place d'institutions publiques plus inclusives, transparentes et responsables.

2.7.2.3 Encourager des modes de production et de consommation plus responsables

Ce dernier aspect est directement en lien avec l'ODD n°12 : « assurer des modes de consommation et de production durables ».

La consommation et la production responsables sont des éléments-clés de la transition mondiale vers la durabilité, comme en témoigne sa place parmi les Objectifs de développement durable émis par l'ONU. Face aux tendances actuelles de surconsommation, l'objectif 12 vise à faire plus et mieux avec moins, en responsabilisant aussi bien les producteurs que les consommateurs (MacMillan, 2019).

Notre taux de consommation actuel suggère que l'être humain consomme l'équivalent en ressources naturelles de 1,6 fois la Terre (WWF, 2020). Si la population mondiale atteint 9,6 milliards d'habitants d'ici 2050, il faudrait l'équivalent de près de trois planètes Terre pour fournir les ressources naturelles nécessaires au maintien des modes de vie actuels (Nations Unies, s.d.).

Dans le cadre d'une transition vers des modes de consommation et de production plus durables, des recherches menées par Bengtsson et al. (2018) suggèrent que le changement doit provenir de la conscientisation des consommateurs vis-à-vis des niveaux globaux de consommation, ainsi que des problèmes liés à la production et à la distribution des produits/services.

Comme expliqué précédemment, la blockchain est une base de données où chaque transaction est enregistrée dans des blocs, qui viennent ensuite s'ajouter à la chaîne. Dans le cas d'une chaîne de production, un bloc pourrait être constitué d'informations à propos de chaque étape de la chaîne de valeur du produit, du fournisseur de matières premières au consommateur final. Une fois enregistrée et vérifiée sur la blockchain, chaque entrée ne peut être modifiée, ce qui rend les informations (retracant l'histoire d'un produit) immuables et accessibles aussi bien pour les producteurs que pour les consommateurs (MacMillan, 2019).

De plus, ce type de système permet de garder un historique complet des matières premières et des produits, ce qui peut aider à identifier les sources d'approvisionnement acceptables et les inefficacités potentielles dans la chaîne d'approvisionnement. Cette technologie peut ainsi réduire les risques associés à l'erreur humaine et permettre des réponses plus rapides aux problèmes identifiés tout au long de la chaîne d'approvisionnement (MacMillan, 2019).

Par conséquent, selon le rapport du Forum Économique Mondial (2020), les caractéristiques de la blockchain explicitées précédemment permettraient de rendre les producteurs et les consommateurs mieux informés, ce qui favoriserait une attitude plus responsable.

Résumé de l'analyse de la littérature

Nous avons débuté cette analyse de la littérature en présentant le contexte environnemental dans lequel nous nous situons en 2021. Il en découle que le changement climatique est indéniable et que les enjeux écologiques, économiques et sociaux sont plus importants que jamais.

Pour répondre à ces enjeux environnementaux et lutter contre le changement climatique, les représentants de 196 pays se sont réunis lors de la COP21 en 2015 pour aboutir à l'Accord de Paris. L'accord vise à contenir l'augmentation des températures mondiales bien en dessous de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels. Ce traité international met l'accent sur la coopération, la transparence, la flexibilité et la communication régulière des progrès accomplis dans le cadre de la réalisation des Contributions Déterminées au Niveau National (CDN).

Six ans plus tard, et suite à la crise sanitaire liée au Covid-19, nous avons découvert qu'il est essentiel d'adopter une stratégie de relance économique basée sur le développement durable, d'autant plus que les pays membres de l'Accord de Paris sont contraints juridiquement de respecter leurs engagements pris en 2015. Pour ce faire, les parties prenantes peuvent s'appuyer sur un outil développé par l'ONU : les 17 Objectifs de développement durable (ODD). Ceux-ci forment un cadre auquel les gouvernements et les particuliers peuvent se référer afin d'atteindre et mesurer leurs objectifs.

Dans ce contexte, et grâce à certains avantages tels que la transparence, la traçabilité et la désintermédiation, la blockchain, une nouvelle technologie de stockage et de transmission de données décentralisée, se présente comme un potentiel allié du développement durable. Le Forum Économique Mondial (2020) a identifié trois domaines principaux dans lesquels cette technologie à un rôle à jouer dans la lutte contre le changement climatique : la mise en place de chaînes d'approvisionnement plus résilientes et transparentes ; la création d'institutions publiques plus fortes et responsables et l'incitation à l'approvisionnement et à la consommation responsables.

Paradoxalement, l'impact environnemental de la blockchain est également la source de nombreuses critiques en raison de l'importante consommation d'énergie nécessaire à son fonctionnement. Comme nous avons pu le constater au travers de l'analyse de la littérature, ces reproches visent principalement le Bitcoin et les autres crypto-monnaies se basant sur une blockchain de type Proof-of-Work (PoW), un consensus de validation transactionnelle particulièrement énergivore. Cependant, certaines alternatives réputées plus durables se profilent, comme le consensus Proof-of-Stake (PoW), bien que ce dernier ne soit adopté que par une minorité de crypto-monnaies en 2021.

Dans la deuxième partie de ce mémoire, nous tenterons de répondre à la question de recherche en déterminant avec plus de précision quel type d'impact la blockchain peut avoir sur les Objectifs de développement durable. Nous essayerons également de savoir si les blockchains de type PoS ont réellement le potentiel d'éclipser les blockchains de type PoW, aussi bien d'un point de vue environnemental qu'en termes d'adoption.

Partie II : Analyse de quatre cas d'application

1. Ethereum

Ce premier cas d'application est représentatif d'un projet de blockchain appliquée à grande échelle. Il nous servira d'exemple afin de déterminer l'impact environnemental d'une blockchain dont l'objectif principal n'est pas de contribuer au développement durable. Par ailleurs, l'analyse de ce cas d'application nous permettra de nous pencher sur la consommation énergétique des blockchains de type Proof-of-Work (PoW) et sur la potentielle alternative qu'est le consensus Proof-of-Stake (PoS).

1.1 Présentation

Ethereum est une blockchain open source lancée le 30 juillet 2015 par Vitalik Buterin et son équipe. La crypto-monnaie native de cette blockchain est l'Ether (ETH). Avec une capitalisation boursière de plusieurs centaines de milliards de dollars, l'ETH est aujourd'hui la deuxième crypto-monnaie la plus importante derrière le Bitcoin (BTC). (CoinMarketCap, 2021).

De la même façon que toutes les autres crypto-monnaies, les ETHs circulent grâce à un réseau blockchain (celui de la blockchain Ethereum en l'occurrence). Comme expliqué dans la première partie de ce mémoire, une blockchain fonctionne comme un registre public décentralisé et distribué où toutes les transactions sont vérifiées et enregistrées. Ethereum bénéficie donc de toutes les caractéristiques avantageuses de la technologie telles que la transparence, la traçabilité et la désintermédiation.

La blockchain Ethereum et sa crypto-monnaie Ether peuvent être utilisées pour acheter et vendre des biens et des services, au même titre que le Bitcoin. Par ailleurs, la valeur des ETHs en circulation a augmenté de manière significative au cours des dernières années, ce qui en fait de facto un investissement hautement spéculatif. Cependant, ce qui différencie réellement Ethereum de ses concurrents, c'est que les utilisateurs du réseau peuvent créer des applications qui "tournent" sur la blockchain Ethereum comme un logiciel "tournerait" sur un ordinateur (Upfolio, s.d.).

C'est notamment le cas de Upbots, une application de trading tout en un lancée sur Ethereum par Benjamin Duval, expert en crypto-monnaies que j'ai interviewé dans le cadre ce mémoire. Il explique notamment que la blockchain Ethereum est particulièrement attractive car il est facile et peu coûteux d'y développer des projets (Duval, 2021).

1.2 Fonctionnement et “smart-contracts”

Aussi étonnant que cela puisse paraître, Ethereum n'est ni contrôlé par son créateur Vitalik Buterin ni par toute autre entité centralisée. Le réseau est géré par la communauté de ses utilisateurs. Les utilisateurs de la blockchain Ethereum sont situés partout dans le monde et offrent bénévolement leurs ordinateurs pour aider à faire fonctionner le réseau. Sur celui-ci, les informations sont envoyées directement de personne à personne (et non de personne à entreprise à personne comme c'est le cas dans les modèles traditionnels). C'est ce qu'on appelle un système de pair à pair, ou encore “peer-to-peer” (P2P) (Upfolio, s.d.).

Les utilisateurs de la communauté Ethereum n'ont pas besoin de se connaître pour que le système fonctionne de manière sécurisée. On peut ainsi utiliser le réseau Ethereum sans avoir besoin de rencontrer ou même de faire confiance aux autres membres du réseau (Rodeck et Curry, 2021).

Comme expliqué ci-dessus, n'importe qui peut utiliser la blockchain Ethereum pour créer et exécuter des applications. On peut dès lors considérer Ethereum comme une plateforme technologique mise à la disposition du monde entier pour le développement de nouvelles applications. Étant donné que ce type applications n'a pas recours à un serveur central (tel que Google ou Facebook), elles sont connues sous le nom d'applications décentralisées (ou dApps). En d'autres termes, aucune autorité centrale n'est nécessaire pour les créer et les faire fonctionner (Upfolio, s.d.).

Les applications décentralisées fonctionnent automatiquement et sans intermédiaire, à l'aide de contrats intelligents, plus connus sous l'appellation de “smart-contracts”. Dans les systèmes contractuels classiques, les parties prenantes signent d'abord un accord, puis font confiance à un tiers, tel qu'un avocat ou un notaire, pour l'exécution du contrat. Le problème est que dans ce type de processus, la falsification des données par le tiers de confiance est possible. Avec les smart-contracts, les règles du contrat convenues au préalable sont traduites en code informatique et s'appliquent ensuite automatiquement. Une fois qu'un smart-contract est exécuté, la transaction est enregistrée et ne peut pas être modifiée ou altérée, ce qui élimine le risque de toute manipulation de données (Rodeck et Curry, 2021).

La blockchain Ethereum sert donc de plateforme sur laquelle il est facile d'enregistrer des smart-contracts. Ceux-ci permettent notamment la création d'applications décentralisées, l'échange d'argent et l'envoi d'informations.

Power Ledger (POWR) est un autre exemple d'application décentralisée développée sur la blockchain Ethereum. Il s'agit d'une plateforme lancée en mai 2016 qui a pour objectif de disrupter l'industrie énergétique mondiale en permettant aux membres du réseau de vendre et de distribuer de l'énergie solaire à leurs voisins sans l'aide d'intermédiaires. Cette initiative

encourage ainsi l'échange décentralisé d'énergie afin de rendre les marchés énergétiques plus efficents (Power Ledger, s.d.).

Power Ledger et Upbots ne sont que deux exemples parmi tant d'autres. On estime aujourd'hui que plus de 3000 applications décentralisées ont été développées sur la blockchain Ethereum, favorisant par la même occasion le développement de nombreux secteurs tels que la santé personnelle, l'économie collaborative, les assurances et d'autres marchés de pair à pair (Hertig, 2021).

1.3 Consommation énergétique

Tout comme Bitcoin, Ethereum est extrêmement énergivore. Ceci est dû au consensus Proof-of-Work sur lequel la blockchain Ethereum se base. Comme expliqué dans la première partie de ce mémoire, le consensus PoW génère une consommation d'électricité accrue car il nécessite une énorme puissance de traitement, et donc d'électricité, pour exécuter les calculs informatiques associés au processus de validation des transactions (de Vries, 2018).

Selon l'Ethereum Energy Consumption Index (2021), la consommation annuelle d'électricité du réseau Ethereum est de presque 43 TWh, ce qui est équivalent à la consommation annuelle d'un pays comme la Hongrie.

Sans remettre en question ce constat, Emilie Raffo (2021), responsable marketing et sales chez ChainSecurity (une spin-off de PwC spécialisée dans la sécurisation des blockchains) explique néanmoins que la consommation énergétique associée à la blockchain Ethereum et aux autres blockchains de type PoW doit être placée dans son contexte. En effet, selon elle, l'analyse d'un coût énergétique doit prendre en considération les bienfaits générés par l'objet étudié. Selon cette logique, nous ne devrions pas nous intéresser uniquement à la consommation énergétique d'une blockchain telle qu'Ethereum, mais plutôt à la balance entre les bienfaits de celle-ci et la contrepartie énergétique associée. De la même façon, nous pourrions nous demander si l'utilité des illuminations de Noël ou du divertissement fourni par Netflix en justifie la contrepartie énergétique. Cependant, comme le confirme Émilie Raffo (2021), la perception des bienfaits pour tout type de services ou de produits dépend de tout un chacun et est donc (au moins partiellement) subjective.

Par ailleurs, la dynamique du marché joue également un rôle important dans la consommation d'énergie associée aux crypto-monnaies, et donc à Ethereum. En effet, dans de nombreux cas, les baisses du marché qui font chuter le prix du Bitcoin ou de l'Ether conduisent les mineurs à ralentir ou à éteindre leurs matériels informatiques, car il n'est plus rentable de les faire fonctionner à ce prix. En novembre 2018, par exemple, Digiconomist estime que les mineurs d'Ether ont réduit de plus de moitié leur consommation d'énergie (d'environ 20 TWh à 10 TWh) en moins de vingt jours parce que le prix avait chuté.

En 2021, alors que le prix de l'Ether a de nouveau augmenté, la consommation d'énergie associée à la crypto-monnaie a également augmenté (Digiconomist, 2021).

1.4 Ethereum 2.0 : transition de PoW à PoS

Suite à certaines préoccupations concernant l'évolutivité et l'empreinte énergétique de la blockchain Ethereum, une importante mise à jour fut imaginée en 2018 par la communauté du réseau. Cette mise à niveau massive implique une réingénierie de l'ensemble de la plateforme Ethereum, qui aboutira au lancement d'une nouvelle version, plus évolutive : Ethereum 2.0. En réalité, il ne s'agit pas d'une seule mise à jour mais plutôt d'un ensemble de mises à niveau interconnectées et réalisées à différents moments étalés sur plusieurs années. Les dernières modifications devraient avoir lieu en 2022 (Ethereum, 2021).

Le principal changement consiste en une transition de la blockchain Ethereum vers un mécanisme de consensus Proof-of-stake (PoS). Comme expliqué dans la première partie de ce mémoire, le mécanisme PoS est une alternative au consensus PoW et stipule qu'une personne peut valider des transactions de blocs en fonction de la proportion de tokens qu'il détient. Comme on peut le lire sur le site d'Ethereum (2021), le consensus PoW engendre trois problèmes principaux :

- Un réseau encombré qui doit être décongestionné afin d'améliorer la vitesse et le nombre de transactions par minute que le réseau peut enregistrer ;
- Un manque d'évolutivité car il est de plus en plus difficile de faire fonctionner un nœud à mesure que le réseau s'étend ;
- Une consommation énergétique trop importante.

La transition vers le consensus PoS vise à répondre à ces problèmes en rendant le réseau Ethereum plus efficient et nettement moins énergivore. Vitalik Buterin et les développeurs du réseau estiment que cette transition permettrait à la blockchain Ethereum d'effectuer des transactions en utilisant seulement 1 % de l'énergie consommée auparavant (Fairley, 2019).

Cette différence de consommation entre le consensus PoW et le consensus PoS peut paraître étonnante au vu du fait que ces deux mécanismes utilisent la cryptographie. En réalité, ceci est dû au fait que dans une blockchain de type PoS, les mineurs n'ont pas besoin de résoudre les énigmes mathématiques extrêmement complexes associées au consensus PoW. La puissance de traitement (et donc l'électricité consommée) nécessaire à la validation des transactions est ainsi beaucoup plus faible (HQ, 2019).

Selon Benjamin Duval (2021), le consensus Proof-of-Stake, de même que les autres alternatives au mécanisme Proof-of-Work, vont sans doute prendre le dessus durant les

prochaines années car l'optimisation énergétique et l'évolutivité de la technologie sont deux des plus grandes priorités des développeurs blockchain actuels. Il précise toutefois que le consensus Proof-of-Stake a pour inconvénient qu'il tend à favoriser la concentration des richesses lorsque les tokens en circulation ne sont pas suffisamment distribués au sein du réseau. Ce désavantage tend à se dissiper à mesure que le réseau se développe et que la proportion de tokens détenus par chaque utilisateur diminue.

1.5 Évaluation de l'impact d'Ethereum sur les ODDs

Nous allons désormais analyser l'impact d'Ethereum sur le développement durable et plus précisément sur les ODDs. Pour ce faire, nous allons utiliser l'outil développé par UNSDSN et le centre de Göteborg pour le développement durable : le *SDG Impact Assessment Tool*. Afin d'assurer l'objectivité de notre analyse, nous avons recoupé les informations que nous avons pu trouver sur internet avec celles récoltées durant notre entretien avec Benjamin Duval, fondateur et CEO de Upbots, une application développée sur Ethereum.

L'impact d'Ethereum sur chacun des ODDs sera catégorisé comme suit : Positif direct / Négatif direct / Positif indirect / Négatif indirect / Neutre / Nécessite plus d'informations. Il est important de noter que pour cette analyse, nous prenons également en compte l'impact des différents types d'applications décentralisées (dApps) développées sur la blockchain Ethereum. Les résultats de cette analyse sont présentés ci-dessous.

Tableau 2 : Impact d'Ethereum sur les 17 Objectifs de développement durable

N° ODD	Type d'impact	Justification
	Positif indirect	<p>La finance décentralisée (DeFi), facilitée grâce à la blockchain Ethereum, est une alternative au système financier traditionnel et ne nécessite pas l'intervention d'intermédiaires tels que les banques. La DeFi donne ainsi accès à des opportunités d'investissement pour les populations qui étaient auparavant exclues des marchés financiers.</p> <p>Notons toutefois que le développement d'une blockchain de type PoW comme celle d'Ethereum (en attendant la transition vers le consensus PoS) a tendance à faire augmenter le prix de certains objets informatiques car ceux-ci peuvent être détournés de leur usage habituel pour être utilisés pour le minage (Duval, 2021).</p>

	<p>Nécessite plus d'informations</p>	<p>Les caractéristiques de transparence et de traçabilité font de la blockchain Ethereum une base sur laquelle peuvent se développer des projets visant à optimiser les chaînes de production de nourriture, de sorte à promouvoir l'agriculture responsable et à éviter la surproduction. Nous n'avons toutefois pas été en mesure de trouver un tel projet parmi les applications décentralisées développées sur Ethereum.</p>
	<p>Nécessite plus d'informations</p>	<p>Les caractéristiques de transparence et de traçabilité font de la blockchain Ethereum une base sur laquelle peuvent se développer des projets visant à optimiser l'envoi de médicaments à l'étranger de sorte à éviter la fraude et de renforcer l'impact sanitaire des aides pharmaceutiques à l'international (de la même façon que VenezVit). Nous n'avons toutefois pas été en mesure de trouver un tel projet parmi les applications décentralisées développées sur Ethereum.</p>
	<p>Positif indirect</p>	<p>Les caractéristiques de transparence et de sécurité font de la blockchain Ethereum une base sur laquelle peuvent se développer des projets visant par exemple à certifier les diplômes détenus par les étudiants. C'est notamment le cas du projet Etherproof.</p>
	<p>Nécessite plus d'informations</p>	<p>Les caractéristiques de transparence et de désintermédiation font de la blockchain Ethereum une base sur laquelle peuvent se développer des projets visant à assurer les principes de bonne gouvernance. Ceci inclut notamment la lutte pour l'égalité des genres. Nous n'avons toutefois pas été en mesure de trouver un tel projet parmi les applications décentralisées développées sur Ethereum.</p>
	<p>Nécessite plus d'informations</p>	<p>Les caractéristiques de traçabilité et de décentralisation font de la blockchain Ethereum une base sur laquelle peuvent se développer des projets visant à favoriser une gestion responsable de l'eau potable et à optimiser l'envoi de ressources sanitaires. Nous n'avons toutefois pas été en mesure de trouver un tel projet parmi les applications décentralisées développées sur Ethereum.</p>

 <p>7 ÉNERGIE PROPRE ET D'UN CÔTÉ ABORDABLE</p>	Négatif direct/positif indirect	<p>En tant que blockchain de type Proof-of-Work utilisé à large échelle, Ethereum est extrêmement énergivore. La consommation énergétique liée à son fonctionnement est toutefois supposée diminuer drastiquement suite à la transition vers le consensus Proof-of-Stake.</p> <p>Notons également que certaines applications décentralisées développées sur Ethereum, telles que Power Ledger (Voir point 1.2), permettent de rendre les marchés énergétiques plus efficents, ce qui génère un impact positif sur cet ODD.</p>
 <p>8 TRAVAIL DÉCENT ET CROISSANCE ÉCONOMIQUE</p>	Positif indirect	<p>Les caractéristiques de transparence et de désintermédiation font de la blockchain Ethereum une base sur laquelle peuvent se développer des projets visant à assurer les principes de bonne gouvernance, ce qui favorise une croissance économique durable. En outre, l'aspect disruptif de la blockchain Ethereum force le système financier traditionnel à rester compétitif, ce qui favorise également la croissance économique.</p> <p>Notons toutefois que le développement d'une blockchain comme celle d'Ethereum a tendance à faire augmenter le prix de certains objets informatiques car ceux-ci peuvent être détournés de leur usage habituel pour être utilisés pour le minage (Duval, 2021).</p>
 <p>9 INDUSTRIE, INNOVATION ET INFRASTRUCTURE</p>	Positif direct	<p>La blockchain Ethereum contribue directement à cet ODD en tant que plateforme technologique sur laquelle des milliers d'applications décentralisées peuvent être développées, favorisant ainsi l'innovation ouverte.</p>
 <p>10 INÉGALITÉS RÉDUITES</p>	Négatif indirect	<p>Les caractéristiques de transparence et de désintermédiation font de la blockchain Ethereum une base sur laquelle peuvent se développer des projets visant à assurer les principes de bonne gouvernance. Ceci inclut notamment la lutte contre les inégalités en tous genres. Nous n'avons toutefois pas été en mesure de trouver un tel projet parmi les applications décentralisées développées sur Ethereum.</p>

		<p>En outre, certaines études avancent que seule une partie de la population bénéficie réellement de la blockchain et des crypto-monnaies : les personnes qui sont éduquées à ce sujet et qui ont en leur possession le matériel informatique nécessaire. Dès lors, les bienfaits d'une blockchain comme Ethereum seraient répartis de manière inégale (Merry, 2018 et Duval, 2021).</p>
 11 VILLES ET COMMUNAUTÉS DURABLES	Nécessite plus d'informations	<p>Les caractéristiques de transparence et de désintermédiation font de la blockchain Ethereum une base sur laquelle peuvent se développer des projets visant à favoriser l'inclusion financière, l'économie collaborative et le développement de villes intelligentes. Nous n'avons toutefois pas été en mesure de trouver un tel projet parmi les applications décentralisées développées sur Ethereum.</p>
 12 CONSOMMATION ET PRODUCTION RESPONSABLES	Nécessite plus d'informations	<p>Les caractéristiques de transparence et de traçabilité font de la blockchain Ethereum une base sur laquelle peuvent se développer des projets visant à assurer les principes du commerce équitable et à optimiser les chaînes d'approvisionnement/production des produits alimentaires. Nous n'avons toutefois pas été en mesure de trouver un tel projet parmi les applications décentralisées développées sur Ethereum.</p>
 13 MESURES RELATIVES À LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES	Nécessite plus d'informations	<p>Les caractéristiques de transparence et de traçabilité font de la blockchain Ethereum une base sur laquelle peuvent se développer des projets visant à assurer une meilleure évaluation de l'empreinte carbone des entreprises, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique. Nous n'avons toutefois pas été en mesure de trouver un tel projet parmi les applications décentralisées développées sur Ethereum.</p>
 14 VIE AQUATIQUE	Neutre	<p>Ethereum et ses applications décentralisées n'ont a priori pas d'influence sur la biodiversité des océans.</p>

 15 VIE TERRESTRE	Neutre	Ethereum et ses applications décentralisées n'ont a priori pas d'influence sur la biodiversité terrestre.
 16 PAIX, JUSTICE ET INSTITUTIONS EFFICACES	Positif indirect	L'utilisation de la blockchain Ethereum permet la création d'organisations autonomes décentralisées (DAO). Celles-ci sont fondées sur des principes de bonne gouvernance tels que la transparence, la démocratie et la décentralisation. Ethereum contribue ainsi à cet ODD en favorisant les organisations transparentes, inclusives et responsables.
 17 PARTENARIATS POUR LA RÉALISATION DES OBJECTIFS	Positif direct	En tant que blockchain décentralisée et accessible partout dans le monde, Ethereum permet aux développeurs et aux organisations de collaborer au sein du réseau directement de pair à pair, et ce, sans que ceux-ci ne doivent avoir confiance entre eux ou ne soient proches géographiquement. Ethereum contribue ainsi directement à cet ODD en facilitant la collaboration et l'échange de pair à pair à l'international.

La figure ci-dessous est une synthèse des résultats de l'analyse précédente et nous permet d'avoir une vue d'ensemble sur ceux-ci.

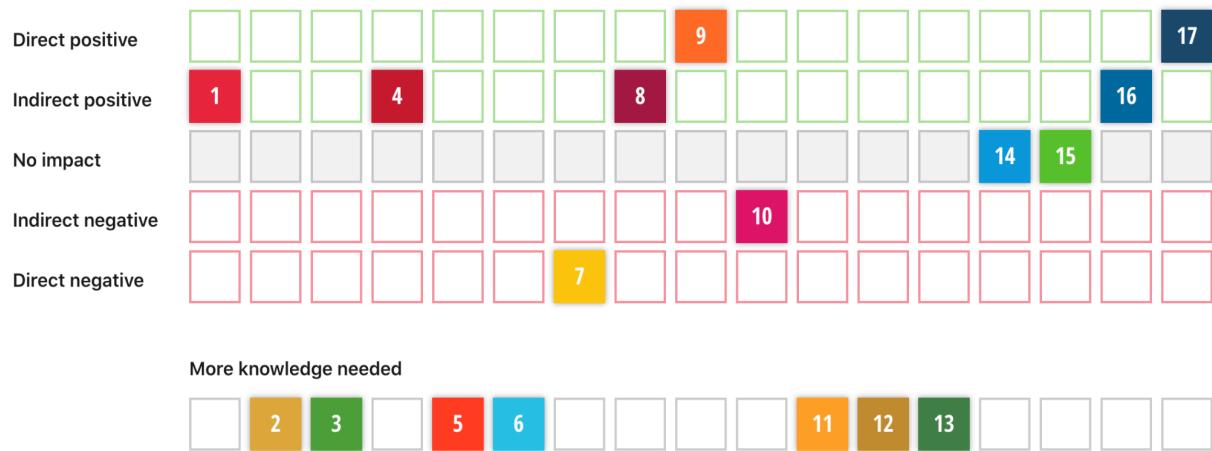


Figure 6 : Impact d'Ethereum sur les 17 Objectifs de développement durable

1.6 Évaluation de l'impact d'Ethereum sur les trois piliers du développement durable

Le développement durable est constitué de trois piliers principaux : la dimension sociale, écologique et économique (Purvis et al., 2018).

Afin de déterminer les piliers sur lesquels Ethereum a le plus d'influence, nous allons utiliser le *Global Sustainability Model*. Celui-ci consiste à catégoriser l'impact des organisations selon que celui-ci est plutôt social, écologique ou économique. Pour ce faire, nous allons sélectionner les ODDs sur lesquels Ethereum est influent (Voir Figure 6) et les classer en fonction de la dimension du développement durable à laquelle ils se rattachent le plus. Notons également que les ODDs sur lesquels Ethereum a une influence directe sont soulignés en gras. Les résultats sont synthétisés ci-dessous.

Tableau 3 : Impact d'Ethereum sur les 3 piliers du développement durable

Dimensions	Social	Écologique	Économique
N°ODD positif	1, 4, 16	7	8, 9, 17
N°ODD négatif	10	7	

Comme on peut le constater ci-dessus, l'influence d'Ethereum semble se concentrer sur la dimension sociale et économique du développement durable. En effet, six des sept impacts positifs générés par Ethereum sont catégorisés comme étant plutôt économiques ou sociaux. Notons également que les deux impacts positifs directs ont une incidence économique, ce qui n'est pas surprenant compte tenu du fait que la blockchain Ethereum permet le développement de la finance décentralisée, une alternative à la finance traditionnelle.

Par ailleurs, le seul impact négatif direct que nous avons identifié a une incidence écologique et porte sur l'ODD 7, à savoir l'importante consommation d'énergie nécessaire au fonctionnement de la blockchain Ethereum. Notons toutefois que le degré d'impact sur cet ODD est supposé diminuer drastiquement suite à la transition vers le consensus Proof-of-Stake, réputé bien moins énergivore. De plus, certaines applications décentralisées développées sur Ethereum ont pour objectif de contribuer positivement à cet ODD 7, ce qui compense partiellement l'impact négatif de la blockchain Ethereum. C'est notamment le cas de Power Ledger, l'application décentralisée présentée plus tôt dans ce mémoire.

Le seul impact négatif indirect que nous avons identifié est lié à la dimension sociale du développement durable et porte sur l'ODD 10, mettant en lumière les potentielles inégalités engendrées par le développement d'une blockchain comme celle d'Ethereum.

Il est également intéressant de constater que sept ODDs sur dix-sept "nécessitent plus d'informations" (Voir Figure 6). Il s'agit en réalité des objectifs sur lesquels Ethereum pourrait avoir un impact positif indirect en raison des applications décentralisées développées sur son réseau.

2. AxessImpact

Ce deuxième cas d'application est particulièrement illustratif de certaines caractéristiques phares de la blockchain, telles que la transparence et la traçabilité, appliquées cette fois à un projet dont l'objectif principal est de contribuer au développement durable.

2.1 Contexte et présentation

Basée à Genève, AxessImpact est une société internationale de conseil et de développement de projets, qui aide les émetteurs de CO₂, les investisseurs et tous types d'organisations à réduire, contrôler et compenser leur impact sur le climat et l'environnement (AxessImpact, 2021).

AxessImpact est née en 2021 d'un partenariat entre plusieurs organisations spécialisées dans des domaines différents mais complémentaires tels que la blockchain, l'étude de données satellitaires, la gestion de portefeuille d'investissement et l'évaluation d'impact. Je suis moi-même intervenu dans le processus de création de cette entreprise en tant que stagiaire dans le cadre de ma dernière année d'étude à l'ICHEC. J'ai contribué à l'élaboration du "Proof of Concept" (PoC) et à la réflexion stratégique liée au produit minimum viable (MVP) de l'organisation.

Le levier d'action principal d'AxessImpact se situe au niveau de la préservation de zones forestières. Comme expliqué dans la première partie de ce mémoire, les forêts constituent des puits de carbone fondamentaux pour la régulation du climat mondial (OMM, 2020). Par ailleurs, selon Pink (2018), la destruction de vastes zones forestières, causée notamment par la déforestation et les incendies de forêts, est désastreuse non seulement pour les espèces animales et végétales, mais aussi pour les communautés locales qui en dépendent. En outre, les arbres mourants rejettent leurs réserves de dioxyde de carbone dans l'air, ce qui augmente la quantité de gaz à effet de serre présent dans l'atmosphère (WWF, s.d.).

Sur base de ce constat, AxessImpact se présente comme une solution novatrice permettant la préservation des forêts et le développement des communautés qui en dépendent.

2.2 Fonctionnement

Pour mieux comprendre le degré d'intervention d'AxessImpact, nous allons nous pencher sur un schéma-type de cas d'application : l'élaboration d'un écosystème basé sur la blockchain permettant la préservation de forêts grâce à la valorisation du CO₂ capturé par les arbres (Voir Figure 7). Ce type de projet est actuellement en développement pour de larges zones forestières en Afrique et en Amérique Latine.

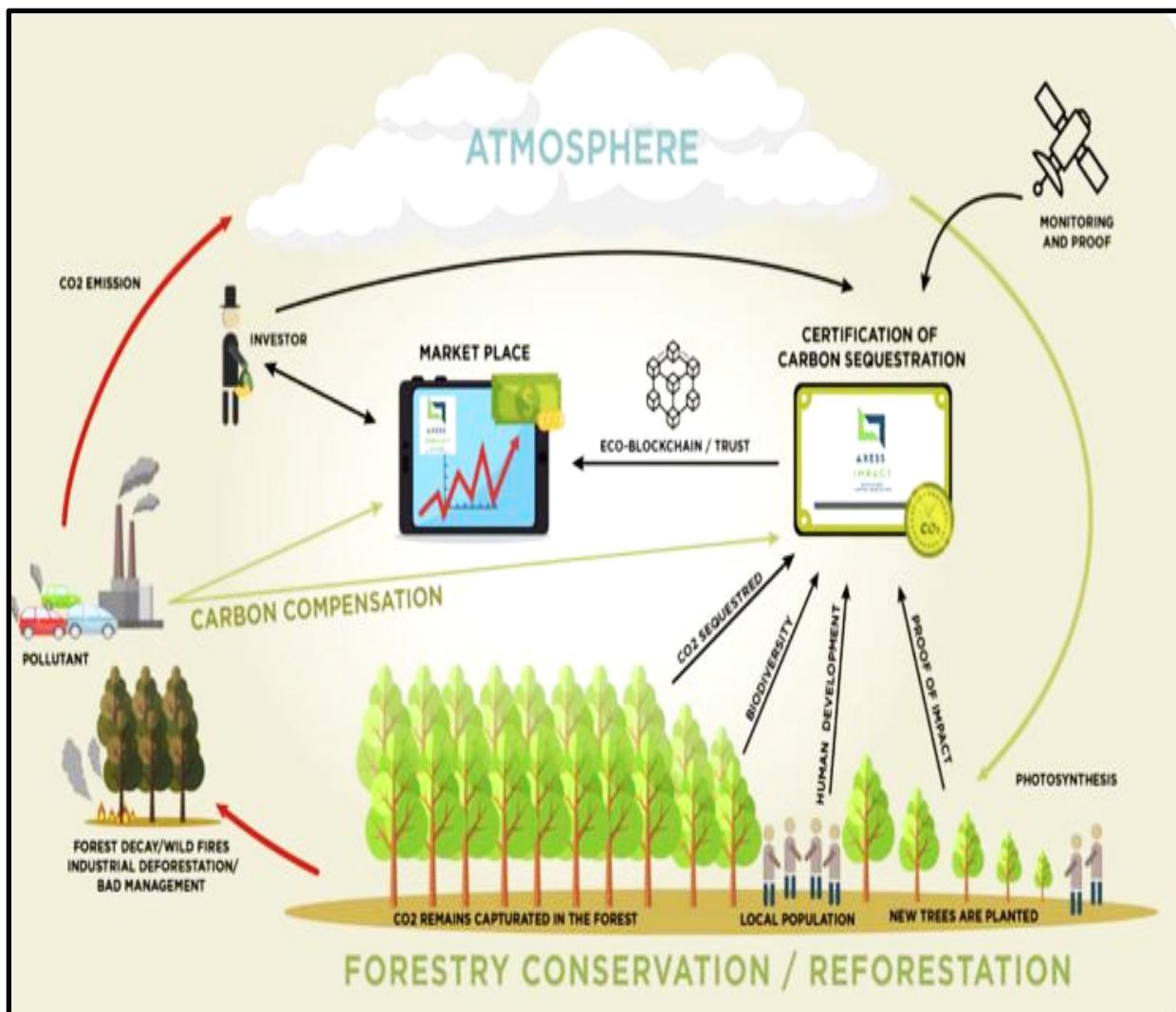


Figure 7 : Schéma de l'écosystème-type mis en place par AxessImpact

Le schéma ci-dessus illustre l'écosystème développé par AxessImpact permettant la préservation des forêts et le développement des communautés locales. Ce schéma doit être interprété comme suit :

- Le propriétaire (un particulier ou une institution publique) d'une zone forestière souhaite valoriser ses terres et les préserver.
- Il fait appel à AxessImpact pour s'en occuper et éviter que la zone forestière en question ne subisse les conséquences d'une mauvaise gestion, d'incendies non contrôlés ou de la déforestation.
- AxessImpact se charge de mesurer le CO2 capturé par les arbres situés dans la zone forestière en question. Pour ce faire, AxessImpact utilise des images satellites. L'analyse de celles-ci permet d'évaluer la quantité de CO2 capturé par les arbres et de contrôler l'évolution de la zone en termes de captation de dioxyde de carbone.

D'autres preuves d'impact telles que la préservation de la biodiversité, la reforestation ou le développement des communautés locales peuvent également être collectées grâce aux données satellitaires ou par l'intervention d'experts sur place.

- Toutes ces preuves d'impact sont enregistrées sur une blockchain afin d'en garantir la complète transparence et traçabilité. Elles sont ensuite agrégées et certifiées par AxessImpact.
- Les certificats de séquestration de CO2 peuvent alors être achetés par deux types de clients. Il y a tout d'abord les personnes/organisations souhaitant acheter les certificats pour simplement investir dans le CO2 en pariant sur une hausse du cours de celui-ci. Il est intéressant de noter que ce genre d'investissement devient de plus en plus populaire en raison d'une augmentation pressentie de la valeur du CO2 pour les années/décennies à venir (McKinsey & Company, 2021). Le deuxième type de clients potentiels sont les entreprises émettrices de CO2 souhaitant compenser (totalement ou partiellement) leurs émissions de carbone en achetant le certificat produit par AxessImpact. La demande pour ce genre de compensation carbone est également en nette croissance depuis quelques années en raison des engagements pris par certains pays et organisations en termes de réduction d'émission (McKinsey & Company, 2021).
- L'argent récolté grâce aux divers investissements est alors réinjecté dans le système afin de financer les efforts de préservation et de développement au sein de la zone forestière ciblée.

2.3 La valeur ajoutée de la blockchain pour AxessImpact

La blockchain est une partie intégrante du business model d'AxessImpact. Pour en déterminer la valeur ajoutée, nous allons utiliser le *Blockchain Value Framework*, un outil développé par le Forum Économique Mondial en collaboration avec Accenture.

La première étape de cette analyse consiste à identifier les points faibles/champs d'opportunités du secteur dans lequel AxessImpact est actif. Après en avoir discuté informellement avec plusieurs experts du secteur lors de mon stage, il semblerait que deux éléments soient particulièrement problématiques : le flou associé à l'évaluation d'impact et la tendance au « *greenwashing* » de la part d'organisations souhaitant communiquer sur leurs efforts de compensation carbone.

Selon Hödl (2018), l'évaluation d'impact est complexe et entravée par des difficultés méthodologiques. A ce jour, les pratiques d'évaluation peuvent encore être décrites comme fragmentées et limitées en termes de précision et de standardisation. En effet, il n'existe pas

d'exigences obligatoires, de méthodes ou de critères objectifs pour l'évaluation d'impact (Hödl, 2018).

Le deuxième point faible identifié est la tendance au « *greenwashing* ». Cela se produit lorsqu'une entreprise consacre du temps et de l'argent dans sa communication pour faire croire que ses produits ou services sont respectueux de l'environnement alors qu'ils ne le sont pas ou que leurs efforts ne s'appuient sur aucune preuve tangible ou ne sont pas certifiés par un tiers (Corporate Finance Institute, s.d.).

La deuxième étape du *Blockchain Value Framework* consiste à déterminer si certaines caractéristiques de la blockchain implémentée par AxessImpact peuvent permettre d'améliorer/résoudre les points faibles identifiés précédemment.

Dans l'écosystème de préservation de forêts illustré ci-dessus, l'utilisation de la blockchain permet de résoudre les deux problèmes précédemment identifiés. En effet, l'évaluation de l'impact sur les forêts est mesurée grâce aux données satellitaires enregistrées automatiquement sur la blockchain. De plus, ces données sont librement accessibles par toutes les parties prenantes. L'impact est ainsi évalué en temps réel et sur des critères objectifs et non falsifiables. Par ailleurs, les données enregistrées sur la blockchain sont ensuite agrégées dans un certificat qui peut être acheté par des entreprises souhaitant compenser leurs émissions de CO₂. Ce processus leur permet de baser leur communication à propos de leurs efforts environnementaux sur des preuves tangibles et certifiées par un tiers, ce qui résout le problème du « *greenwashing* ».

La troisième étape consiste à cibler (à l'aide de l'antisèche fournie par le *Blockchain Value Framework* (Voir ANNEXE 1)), les nouvelles capacités générées par la blockchain et associées aux différents points faibles préalablement identifiés. Dans le cas d'AxessImpact, les capacités liées à l'évaluation d'impact sont la traçabilité complète (// *full traceability*) et la non-falsification de preuves (// *evidence tampering*). Celle associée au « *greenwashing* » est la vision globale (// *holistic view*), ce qui signifie (au sens du *Blockchain Value Framework*) que toutes les parties prenantes ont accès à la même source d'information de sorte qu'il n'y ait pas d'asymétrie d'information.

La dernière étape consiste, quant à elle, à identifier les leviers de création de valeurs pour l'organisation (à l'aide de l'antisèche fournie par le *Blockchain Value Framework* (Voir ANNEXE 1)). Dans le cas d'AxessImpact, les leviers de valeurs associés à une meilleure évaluation d'impact sont la gestion des données (// *data management*) et la sécurité des données (// *data security*). Pour ce qui est de l'élimination du « *greenwashing* », les leviers de valeurs sont la transparence (// *transparency*), la confiance (// *trust*) et le partage de données (// *data sharing*).

Les résultats du *Blockchain Value Framework* appliqué à AxessImpact sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4 : Plus-value de la blockchain pour AxessImpact

Points faibles/ zones d'opportunités	Solutions apportées par la blockchain	Nouvelles capacités	Leviers de valeurs
Les méthodes d'évaluation d'impact sont trop floues et peu objectives.	L'impact est évalué en temps réel sur des critères objectifs et non falsifiables car les données sont automatiquement enregistrées dans la blockchain, sans qu'un tiers n'ait pu les modifier.	Traçabilité complète ----- Non-falsification de preuves	Gestion des données ----- Sécurité de données
Il y a une tendance au « <i>greenwashing</i> » de la part des organisations qui communiquent à propos de leurs efforts environnementaux/ de compensation carbone.	Les certificats basés sur les données enregistrées sur la blockchain permettent aux organisations de baser leur communication sur des preuves tangibles et certifiées.	Vision globale	Transparence ----- Confiance ----- Partage de données

2.4 Évaluation de l'impact d'AxessImpact sur les ODDs

Nous allons maintenant analyser l'influence d'AxessImpact sur les ODDs. Pour ce faire, nous allons utiliser le *SDG Impact Assessment Tool*. J'ai utilisé cet outil durant mon stage afin de mieux cibler le champ d'action d'AxessImpact. Pour ce faire, j'ai basé mon analyse sur mes connaissances de l'organisation et d'un projet-type tel que celui illustré précédemment par la Figure 7.

L'impact d'AxessImpact sur chacun des ODDs sera catégorisé comme suit : Positif direct / Négatif direct / Positif indirect / Négatif indirect / Neutre / Nécessite plus d'informations.

Les résultats de cette analyse sont présentés ci-dessous.

Tableau 5 : Impact d'AxessImpact sur les 17 Objectifs de développement durable

N° ODD	Type d'impact	Justification
	Positif indirect	Le développement des communautés locales fait partie des leviers d'action d'AxessImpact. Ceci inclut notamment la lutte contre la pauvreté.
	Positif indirect	Le développement des communautés locales fait partie des leviers d'action d'AxessImpact. Ceci inclut notamment la lutte contre la faim.
	Nécessite plus d'informations	Des efforts concernant la santé des communautés locales ne s'inscrivent pas encore dans l'optique de développement de celles-ci. Cependant, cela pourrait le devenir dans le futur.
	Nécessite plus d'informations	Le développement de l'éducation au sein des communautés locales ne s'inscrit pas encore dans l'optique d'AxessImpact, mais cela pourrait le devenir dans le futur.
	Nécessite plus d'informations	L'égalité entre les sexes ne s'inscrit pas encore dans l'optique de développement des communautés locales, mais ça pourrait le devenir dans le futur.
	Nécessite plus d'informations	L'accès à l'eau propre et à l'assainissement ne s'inscrit pas encore dans l'optique de développement des communautés locales, mais ça pourrait le devenir.
	Négatif direct	L'utilisation de la blockchain signifie qu'une relativement importante quantité d'énergie est consommée. Ceci dit, AxessImpact a recours à ce qu'on appelle une éco-blockchain. Ce type de blockchain a la particularité d'être nettement moins énergivore.

 8 TRAVAIL DÉCENT ET CROISSANCE ÉCONOMIQUE	Positif indirect	<p>Les efforts favorisant la croissance économique s'inscrivent dans la logique de développement des communautés locales.</p>
 9 INDUSTRIE, INNOVATION ET INFRASTRUCTURE	Positif direct	<p>Avec son business model durable et innovant basé sur la blockchain, AxessImpact influence directement l'ODD n°9.</p>
 10 INÉGALITÉS RÉDUITES	Nécessite plus d'informations	<p>Réduire les inégalités au sein des et entre les pays ne s'inscrit pas encore dans l'optique de développement des communautés locales, mais ça pourrait le devenir dans le futur.</p>
 11 VILLES ET COMMUNAUTÉS DURABLES	Neutre	<p>Étant donné que les projets d'AxessImpact ciblent les zones naturelles voire rurales, l'ODD 11 n'est aucunement influencé.</p>
 12 CONSOMMATION ET PRODUCTION RESPONSABLES	Positif indirect	<p>Bien que l'ODD 12 ne soit pas central aux projets d'AxessImpact, la préservation de forêts permet dans certains cas d'éviter le risque de la déforestation. De cette façon, AxessImpact contribue à une meilleure gestion des ressources naturelles (cible 12.4).</p>
 13 MESURES RELATIVES À LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES	Positif direct	<p>Le principal objectif d'AxessImpact est de protéger les puits de carbone naturels tels que les forêts. Une quantité plus importante de CO2 est ainsi séquestrée, ce qui diminue les effets du changement climatique.</p>
 14 VIE AQUATIQUE	Nécessite plus d'informations	<p>A ce jour, les projets d'AxessImpact se focalisent sur la préservation des forêts en tant que puits de carbone terrestres. Dans le futur, AxessImpact pourrait également s'intéresser aux puits de carbone présents dans les océans, tels que les baleines ou les coraux qui capturent d'importantes quantités de CO2.</p>
 15 VIE TERRESTRE	Positif direct	<p>L'objectif principal d'AxessImpact est de préserver les forêts, ce qui favorise également la pérennité de la biodiversité locale. L'ODD n°15 s'inscrit donc parfaitement dans cette optique.</p>

16 PAIX, JUSTICE ET INSTITUTIONS EFFICACES 	Neutre	Cet ODD cible une action gouvernementale ou institutionnelle. En tant qu'acteur non-institutionnel, AxessImpact n'a donc aucun impact sur cet objectif.
17 PARTENARIATS POUR LA RÉALISATION DES OBJECTIFS 	Positif direct	AxessImpact est une organisation à portée internationale. Par conséquent, la collaboration avec d'autres acteurs internationaux/locaux est nécessaire pour que les projets d'AxessImpact aboutissent.

La figure ci-dessous est une synthèse des résultats de l'analyse précédente et nous permet d'avoir une vue d'ensemble sur ceux-ci.

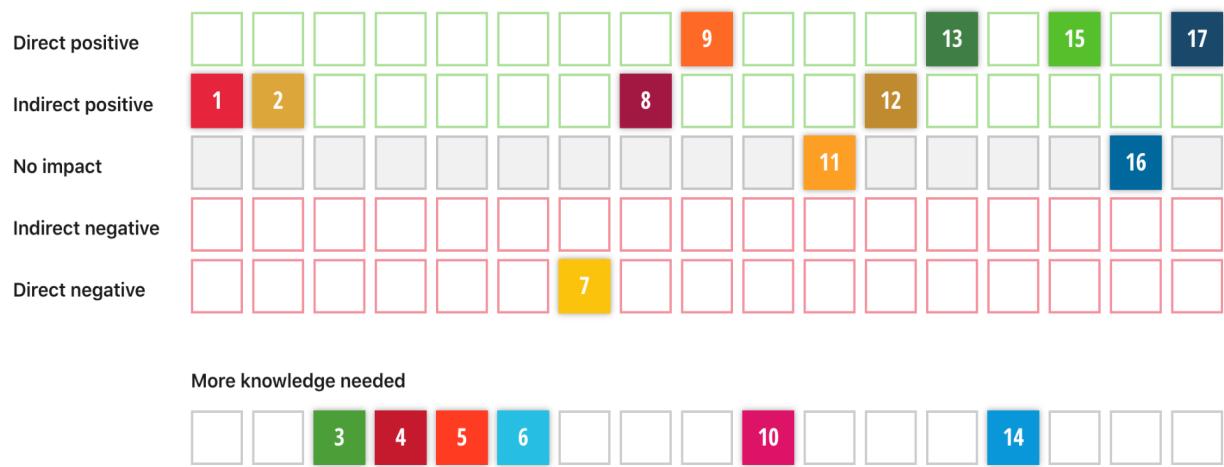


Figure 8 : Impact d'AxessImpact sur les 17 Objectifs de développement durable

2.5 Évaluation de l'impact d'AxessImpact sur les trois piliers développement durable

Afin de déterminer les dimensions sur lesquelles AxessImpact a le plus d'influence, nous allons utiliser le *Global Sustainability Model* développé par Oxford Economics. Celui-ci consiste à catégoriser l'impact des organisations selon que celui-ci est plutôt économique, social ou écologique. Pour ce faire, nous allons sélectionner les ODDs sur lesquels AxessImpact est influent (Voir Figure 8) et les classer en fonction de la dimension du développement durable à laquelle ils se rattachent le plus. Notons également que les ODDs sur lesquels AxessImpact a une influence directe sont soulignés en gras. Les résultats sont synthétisés ci-dessous.

Tableau 6 : Impact d'AxessImpact sur les 3 piliers du développement durable

Dimensions	Social	Écologique	Économique
N°ODD positif	2, 17	12, 13, 15	9, 1, 8
N°ODD négatif		7	

Comme on peut le constater ci-dessus, l'influence d'AxessImpact est répartie de manière relativement équilibrée entre les trois dimensions du développement durable. Notons toutefois que deux impacts positifs directs sur quatre ont une incidence écologique. Ceci semble logique étant donné que le projet-type d'AxessImpact illustré précédemment est focalisé sur la préservation de ressources naturelles. Il n'est donc pas étonnant de constater que l'impact soit relativement concentré sur ce pilier.

Par ailleurs, la seule conséquence négative directement imputable à AxessImpact porte sur l'ODD 7, à savoir la consommation énergétique inhérente à l'utilisation de la blockchain. Néanmoins, comme expliqué précédemment, AxessImpact a recours à une blockchain ayant la particularité d'être peu énergivore. Dès lors, l'impact écologique qui en découle est limité.

Sur le moyen ou long terme, cette concentration sur le pilier écologique pourrait s'équilibrer, voire pencher vers la dimension sociale car cinq des six ODDs nécessitant plus d'informations (Voir Figure 8) ont une incidence principalement sociale. Il s'agit en réalité de domaines dans lesquels la société AxessImpact peut avoir une influence positive si elle décide de les intégrer à son modèle en poursuivant ses efforts de développement des communautés locales.

3. Provenance

Ce troisième cas d'application illustre deux des trois aspects principaux présentés par le Forum Économique Mondial (2020) comme domaines où la blockchain peut avoir un impact positif sur le développement durable (Voir Point 2.7.2) : la mise en place de chaînes d'approvisionnement plus résilientes et transparentes (Voir Point 2.7.2.1) et l'incitation à l'approvisionnement et à la consommation responsables (Voir Point 2.7.2.3).

3.1 Contexte et présentation

Chaque jour, nous achetons et consommons des produits qui ont un impact sur notre planète. La plupart du temps, et comme nous l'avons constaté dans la première partie de ce mémoire, cet impact se situe tout au long des chaînes d'approvisionnement. Cependant, ces dernières sont souvent opaques, ce qui rend l'impact de certains produits abstrait aux yeux des consommateurs qui font alors des choix peu éclairés lors de leurs achats.

L'entreprise londonienne Provenance répond à ce problème en permettant aux marques de rendre leurs chaînes d'approvisionnement complètement transparentes, ce qui donne aux acheteurs et aux consommateurs le pouvoir de baser leurs décisions d'achat sur l'impact qu'ont les entreprises au travers de leurs activités, plutôt que sur le prix et la commodité des produits en question. Ceci permet de récompenser les entreprises socialement et écologiquement responsables (Provenance, s.d.).

Provenance s'est fait connaître en 2013 lorsque l'entreprise est devenue l'une des premières à avoir implémenté la blockchain dans son business model. Dans son *whitepaper* de l'époque, Provenance présentait son prototype de blockchain permettant aux produits d'être accompagnés de "passeports" numériques, afin d'en prouver l'authenticité et l'origine. Elle fut ainsi une des premières entreprises à utiliser la technologie blockchain pour assurer le suivi des produits de cette manière. Cette approche, révolutionnaire à l'époque, a ensuite servi d'exemple pour de nombreuses entreprises et est aujourd'hui utilisée dans de multiples secteurs (Provenance, s.d.).

Plus concrètement, Provenance étiquette des produits (alimentaires ou textiles par exemple) au moyen de techniques d'identification par radiofréquence (RFID) garantissant un approvisionnement éthique et sûr. A mesure que les produits changent de main, toute information associée à chaque étape de la chaîne d'approvisionnement est automatiquement ajoutée à la blockchain. Le client final peut ensuite vérifier les origines et l'impact des produits grâce à une application mobile. Provenance affirme travailler de cette façon avec plus de cent entreprises, dont de grandes marques comme Sainsbury's (Volpicelli, 2018).

3.2 La valeur ajoutée de la blockchain pour Provenance

La blockchain fait partie intégrante du business model de Provenance. Pour en déterminer la valeur ajoutée, nous allons utiliser le *Blockchain Value Framework*, comme nous l'avons fait pour AxessImpact.

La première étape de cette analyse consiste à identifier les points faibles/champs d'opportunités du secteur dans lequel Provenance est actif, chose que nous avons déjà effectuée dans la première partie de ce mémoire aux Points 2.7.2.1 et 2.7.2.3. Les deux principaux problèmes identifiés dans cette partie étaient les suivants : les chaînes d'approvisionnement sont souvent trop opaques et peu efficientes ; les consommateurs ont accès à trop peu d'informations concernant les produits qu'ils achètent.

La deuxième étape du *Blockchain Value Framework* consiste à déterminer si certaines caractéristiques de la blockchain implémentée par Provenance peuvent permettre d'améliorer/résoudre les points faibles identifiés préalablement.

Premièrement, et comme expliqué précédemment, l'utilisation de la blockchain permet d'assurer la transparence des chaînes d'approvisionnement et la traçabilité des produits qui y transitent. La blockchain les rend également plus efficientes car les erreurs tout au long des chaînes d'approvisionnement sont plus facilement identifiables et sont donc résolues plus rapidement et à moindre coût (Voir Point 2.7.2.1).

Par ailleurs, comme nous l'avons constaté au Point 2.7.2.3, la blockchain rend les informations (retracant l'histoire d'un produit) immuables et accessibles aussi bien pour les producteurs que pour les consommateurs (MacMillan, 2019). Cet aspect (qui vient s'ajouter à la transparence des chaînes d'approvisionnement) permet de conscientiser les consommateurs à propos des produits qu'ils achètent. Ceux-ci sont alors mieux informés, ce qui favorise une attitude plus responsable dans le cadre de leur consommation (Forum Économique Mondial, 2020).

La troisième étape consiste à cibler (à l'aide de l'antisèche fournie par le *Blockchain Value Framework*), les nouvelles capacités générées par la blockchain et associées aux différents points faibles préalablement identifiés. Dans le cas de Provenance, les capacités liées à l'opacité et au manque d'efficience des chaînes d'approvisionnement sont la traçabilité complète (// *full traceability*), la non-falsification de preuves (// *evidence tampering*) et l'efficience (// *efficiency*). Celle associée au manque d'informations disponibles à propos des produits achetés par les consommateurs est la vision globale (// *holistic view*), ce qui signifie (au sens du *Blockchain Value Framework*) que toutes les parties prenantes ont accès à la même source d'information de sorte qu'il n'y ait pas d'asymétrie d'information.

La dernière étape consiste, quant à elle, à identifier les leviers de création de valeurs pour l'organisation (à l'aide de l'antisèche fournie par le *Blockchain Value Framework*). Dans le cas de Provenance, les leviers de valeurs associés à la résolution des problèmes d'opacité et de manque d'efficience des chaînes d'approvisionnement sont la traçabilité (// *track & trace*) et l'auditabilité (// *auditability*). Pour ce qui est du manque d'informations disponibles à propos des produits achetés par les consommateurs, les leviers de valeurs sont la transparence (// *transparency*), la confiance (// *trust*) et le partage de données (// *data sharing*).

Les résultats du *Blockchain Value Framework* appliqué à Provenance sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 7 : Plus-value de la blockchain pour Provenance

Points faibles/ zones d'opportunités	Solutions apportées par la blockchain	Nouvelles capacités	Leviers de valeurs
Les chaînes d'approvisionnement sont souvent trop opaques et peu efficientes.	L'utilisation de la blockchain permet d'assurer la transparence et l'efficience des chaînes d'approvisionnement.	Traçabilité complète ----- Non-falsification de preuves ----- Efficience	Traçabilité ----- Sécurité de données
Les consommateurs ont accès à trop peu d'informations concernant les produits qu'ils achètent.	La blockchain rend les informations relatives aux produits immuables et accessibles aux consommateurs. Par conséquent, ces derniers peuvent prendre leurs décisions d'achat en étant mieux informés	Vision globale	Transparence ----- Confiance ----- Partage de données

3.3 Évaluation de l'impact de Provenance sur les ODDs

Nous allons désormais analyser l'influence de Provenance sur les ODDs. Pour ce faire, nous allons utiliser le *SDG Impact Assessment Tool*. Afin d'assurer l'objectivité de notre analyse, nous avons recoupé les informations que nous avons pu trouver sur internet avec celles récoltées durant un entretien avec Émilie Raffo, responsable marketing et sales chez ChainSecurity (une spin-off de PwC spécialisée dans la sécurisation des blockchains). Lorsque

nous travaillions ensemble chez CryptoLake Consulting, Emilie Raffo et moi-même nous étions déjà intéressés à Provenance dans le cadre de diverses recherches.

L'impact de Provenance sur chacun des ODDs sera catégorisé comme suit : Positif direct / Négatif direct / Positif indirect / Négatif indirect / Neutre / Nécessite plus d'informations. Les résultats de cette analyse sont présentés ci-dessous.

Tableau 8 : Impact de Provenance sur les 17 Objectifs de développement durable

N° ODD	Type d'impact	Justification
1 PAS DE PAUVRETÉ 	Neutre	La lutte contre la pauvreté ne fait pas partie des leviers d'action de Provenance.
2 FAIM «ZÉRO» 	Neutre	La lutte contre la faim ne fait pas partie des leviers d'action de Provenance.
3 BONNE SANTÉ ET BIEN-ÊTRE 	Positif indirect	Grâce aux services de Provenance, les consommateurs ont accès à plus d'informations à propos des produits qu'ils achètent. Ceux-ci sont alors conscientisés et peuvent prendre des décisions d'achat plus éclairées et responsables, ce qui favorise indirectement la consommation de produits meilleurs pour la santé.
4 ÉDUCATION DE QUALITÉ 	Neutre	La promotion de l'éducation ne fait pas partie des leviers d'action de Provenance.
5 ÉGALITÉ ENTRE LES SEXES 	Positif indirect	Provenance assure la transparence tout au long des chaînes d'approvisionnement. Par conséquent, les marques ayant recours aux services de Provenance ont intérêt à être exemplaires. Ceci inclut notamment l'égalité des sexes au travail (égalité salariale, non-discrimination contre les femmes, etc.)
6 EAU PROPRE ET ASSAINISSEMENT 	Neutre	L'accès à l'eau propre n'est pas dans les leviers d'action de Provenance.

 7 ÉNERGIE PROPRE ET D'UN CÔTÉ ABORDABLE	Négatif direct	<p>L'utilisation de la blockchain par Provenance implique automatiquement une consommation énergétique accrue.</p>
 8 TRAVAIL DÉCENT ET CROISSANCE ÉCONOMIQUE	Positif direct	<p>En assurant la transparence des chaînes d'approvisionnement, Provenance favorise les marques qui offrent de bonnes conditions de travail à leurs employés. Ceci a pour effet de lutter contre les inégalités salariales, le travail infantile, l'esclavagisme moderne, le non-respect des conditions de sécurité au travail, etc.</p>
 9 INDUSTRIE, INNOVATION ET INFRASTRUCTURE	Positif direct	<p>Grâce à son modèle basé sur la blockchain, Provenance contribue directement au développement d'infrastructures innovantes et responsables. En effet, l'entreprise basée à Londres favorise l'accès à l'information pour les consommateurs finaux, ce qui incite les marques concernées à rendre leurs chaînes d'approvisionnement plus transparentes et responsables.</p>
 10 INÉGALITÉS RÉDUITES	Neutre	<p>La réduction des inégalités au sein et entre les pays ne fait pas partie des leviers d'action de Provenance.</p>
 11 VILLES ET COMMUNAUTÉS DURABLES	Neutre	<p>Le développement de villes et de communautés durables ne fait pas partie des leviers d'action de Provenance.</p>
 12 CONSOMMATION ET PRODUCTION RESPONSABLES	Positif direct	<p>Un des objectifs principaux de Provenance est de conscientiser les entreprises et les consommateurs finaux vis-à-vis de leurs modes de production et de consommation, ce qui tend à les rendre plus efficents et responsables.</p>
 13 MESURES RELATIVES À LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES	Nécessite plus d'informations	<p>La lutte contre le changement climatique ne fait pas réellement partie des leviers d'action de Provenance. Ceci dit, des modes de production et de consommation plus responsables pourraient contribuer à la lutte contre le</p>

		changement climatique. Plus d'informations seraient nécessaires pour en évaluer l'influence exacte.
	Positif indirect	Provenance incite les entreprises à rendre les chaînes d'approvisionnement plus responsables. Ceci s'applique notamment aux entreprises qui se doivent d'exploiter les ressources marines de façon responsable dans le cadre de leur chaîne de production/approvisionnement.
	Positif indirect	Provenance incite les business à rendre les chaînes d'approvisionnement plus responsables. Ceci s'applique notamment aux entreprises qui se doivent d'exploiter les ressources terrestres de façon responsable dans le cadre de leur chaîne de production/approvisionnement.
	Neutre	Cet ODD cible une action gouvernementale ou institutionnelle. En tant qu'acteur non-institutionnel, Provenance n'a donc pas impact sur cet objectif.
	Positif indirect	Provenance collabore avec les entreprises souhaitant rendre leurs chaînes d'approvisionnement les plus transparentes possible. Sans ce type de partenariat, les services de Provenance n'auraient que peu d'impact.

La figure ci-dessous est une synthèse des résultats de l'analyse précédente et nous permet d'avoir une vue d'ensemble sur ceux-ci.

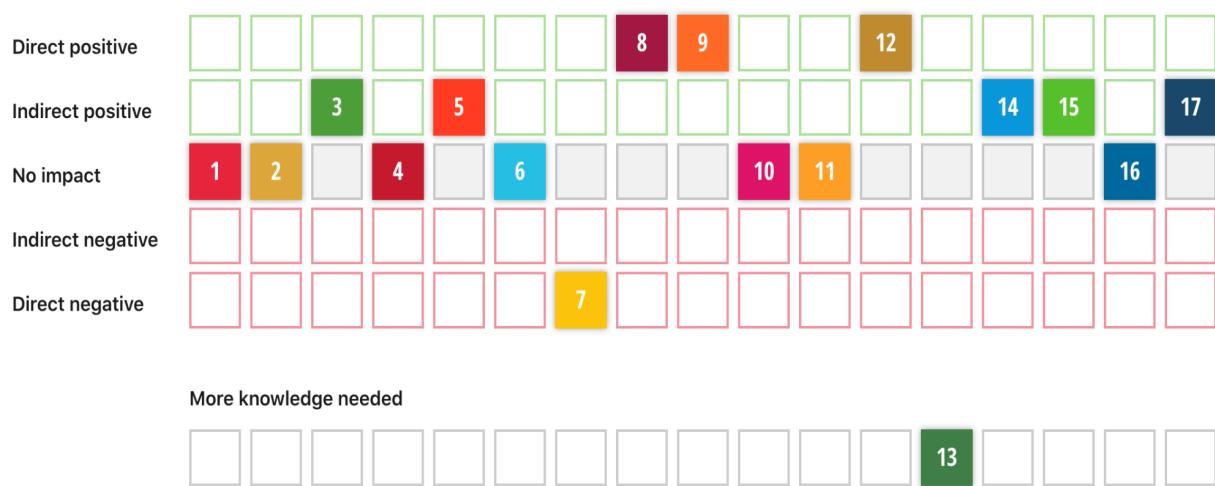


Figure 9 : Impact de Provenance sur les 17 Objectifs de développement durable

3.4 Évaluation de l'impact de Provenance sur les trois piliers du développement durable

Afin de déterminer les dimensions sur lesquelles Provenance a le plus d'influence, nous allons utiliser le *Global Sustainability Model*. Celui-ci consiste à catégoriser l'impact des organisations selon que celui-ci est plutôt économique, social ou écologique. Pour ce faire, nous allons sélectionner les ODDs sur lesquels Provenance est influent (Voir Figure 9) et les classer en fonction de la dimension du développement durable à laquelle ils se rattachent le plus. Notons également que les ODDs sur lesquels Provenance a une influence directe sont surlignés en gras. Les résultats sont synthétisés ci-dessous.

Tableau 9 : Impact de Provenance sur les 3 piliers du développement durable

Dimensions	Social	Écologique	Économique
N°ODD positif	3, 5, 8	14, 15	9, 12, 17
N°ODD négatif		7	

Comme on peut le constater ci-dessus, l'influence de Provenance est répartie de manière relativement équilibrée entre les trois dimensions du développement durable. Notons toutefois que deux impacts positifs directs sur trois ont une incidence économique : l'ODD 9 et l'ODD 12. Ceci semble logique étant donné que les leviers d'action principaux de Provenance sont focalisés sur la transparence des chaînes d'approvisionnement et sur la conscientisation vis-à-vis des modes de production et de consommation. Il n'est donc pas étonnant de constater que l'impact soit relativement concentré sur ce pilier.

En outre, Provenance influence positivement huit ODDs sur dix-sept. La seule conséquence négative directement imputable à Provenance est encore une fois l'ODD 7, à savoir la consommation énergétique liée à l'utilisation de la blockchain.

4. AID:Tech

Le dernier cas d'application analysé dans le cadre de ce mémoire se focalise sur l'entreprise AID:Tech. Ce cas d'application illustre l'autre domaine principal ciblé par le Forum Économique Mondial (2020) : la création d'institutions publiques plus fortes et responsables (Voir Point 2.7.2.2).

4.1 Contexte et présentation

Comme expliqué dans l'introduction de ce mémoire, lors de l'été 2020, j'ai décidé d'effectuer un stage de trois mois à temps partiel chez VenezVit, une start-up à but non lucratif basée à Paris et se spécialisant dans la logistique pharmaceutique. Cette start-up propose à ses clients (principalement des organisations humanitaires et gouvernementales) un service intégrant la blockchain qui permet d'optimiser la logistique et la traçabilité des médicaments envoyés à l'étranger, empêchant ainsi la contrefaçon et la fraude. Grâce à cette expérience, j'ai réalisé que la blockchain avait un rôle crucial à jouer dans l'optimisation des transferts internationaux de ressources (notamment financières ou pharmaceutiques). Il m'a donc semblé intéressant d'analyser AID:Tech, une entreprise qui est active dans ce secteur et qui opère à plus grande échelle que VenezVit.

AID:Tech est une entreprise irlandaise fondée en 2014 qui utilise la technologie blockchain pour résoudre les problèmes auxquels sont confrontés les gouvernements, les ONGs, les entreprises et les organisations caritatives lorsqu'ils doivent transférer des ressources financières ou sanitaires vers leurs bénéficiaires (AID:Tech, s.d.).

Au cœur de la plateforme mise en place par AID:Tech se trouve l'identité digitale. Nous vivons dans une société où tout ce que nous faisons dépend de notre identité, et sans preuve de celle-ci, nous n'aurions accès qu'à très peu de services (Anwar, 2019). AID:Tech digitalise les identités en enregistrant les informations relatives à celles-ci sur la blockchain, de sorte que les personnes mal desservies puissent bénéficier d'une preuve infalsifiable de leur identité à tout moment. Ceci permet une distribution traçable, transparente et sécurisée des données et des paiements directement aux bénéficiaires détenteurs d'une identité digitale (NGI, 2019).

Les champs d'application de AID:Tech sont assez vastes et vont de l'optimisation de l'aide sociale et des soins de santé jusqu'aux transferts de fonds, en passant par la traçabilité de dons caritatifs. AID:Tech estime que sa plateforme basée sur l'identité numérique est ainsi une passerelle vers l'inclusion financière et la promotion d'organisations transparentes et responsables (AID:Tech, s.d.).

AID:Tech est notamment connue pour avoir été la première entreprise au monde à fournir une aide internationale en utilisant la technologie blockchain en 2015. A l'époque, la guerre civile en Syrie faisait rage et de nombreux syriens s'étaient réfugiés au Liban pour fuir leur pays natal. Pour répondre aux besoins de ces personnes mal desservies, AID:Tech a collaboré avec la Croix Rouge irlandaise afin de leur venir en aide. Cinq cents identités digitales ont alors été créées pour les réfugiés syriens, assurant ainsi l'efficacité de la distribution de ressources et la capacité à lutter contre la fraude. Toutes les tentatives de fraude aux points de transmission (considérés comme étant à risque) des ressources ont effectivement été déjouées grâce au système mis en place. De plus, la plateforme de AID:Tech a permis aux bureaux irlandais et libanais de la Croix-Rouge d'obtenir un aperçu en temps réel de la répartition et de l'utilisation des ressources distribuées. L'équivalent de plus de 10 000\$ ont été distribués avec succès lors de cette opération (AID:Tech, s.d.).

AID:Tech s'est également démarquée en 2019 pour avoir intégré les smart-contracts dans ses services. En association avec le Département Américain de la Sécurité Intérieure (DHS) et l'Agence Fédérale de Gestion des Urgences (FEMA), la technologie de AID:Tech fut alors déployée pour un financement basé sur les prévisions (forecast-based financing) de catastrophes naturelles. Dans un premier temps, un smart-contract fut écrit sur la blockchain. Le contrat stipulait qu'à chaque fois qu'un événement météorologique prédéfini se produirait, le smart-contract s'exécuterait automatiquement. Ainsi, un événement tel qu'une probabilité accrue que la mousson se produise au Kansas causait l'exécution du smart-contract. Certaines ressources étaient alors automatiquement distribuées à un groupe prédéterminé de personnes s'étant préalablement créé une identité digitale sur la plateforme de AID:Tech. La population bénéficiaire pouvait par exemple recevoir des bons d'achat pour de l'eau potable. Les administrateurs disposaient ensuite d'enregistrements complets et en temps réel de tous les actifs ayant été distribués (tels que 100.000 bons d'achat) et de toutes les transactions ayant eu lieu (telles que 90.000 bouteilles d'eau achetées grâce aux bons). Ces données ont également pu servir de base d'analyse pour de futurs déploiements (AID:Tech, s.d.).

En 2021, AID:Tech est désormais un leader du marché en tant que fournisseur de solutions de confiance avec des déploiements en Europe, aux États-Unis, en Afrique et en Asie. En outre, depuis 2015, l'entreprise irlandaise a utilisé la blockchain pour de nombreuses opérations et dans de nombreux domaines tels que l'envoi de fonds vers l'étranger, l'assistance sociale, l'administration de soins de santé, l'aide caritative et la micro-assurance (NGI, 2019).

4.2 La valeur ajoutée de la blockchain pour AID:Tech

Au même titre que les organisations précédemment étudiées, la blockchain fait partie intégrante du business model de AID:Tech. Pour en déterminer la valeur ajoutée, nous allons utiliser le *Blockchain Value Framework*, comme nous l'avons fait pour AxessImpact et Provenance.

La première étape de cette analyse consiste à identifier les points faibles/champs d'opportunités du secteur dans lequel AID:Tech est actif, chose que nous avons déjà partiellement effectuée dans la première partie de ce mémoire au Point 2.7.2.2. Premièrement, nous avons constaté qu'une grande partie de la population non bancarisée ne dispose pas de documents d'identité car ceux-ci sont souvent chers d'accès. En effet, les systèmes d'identité traditionnels sont fragmentés, peu sûrs et exclusifs. Ceci a pour conséquence que les personnes touchées par ce problème restent mal desservies car la preuve d'identité est fondamentale pour bénéficier des services publics et financiers élémentaires (Anwar, 2019). L'autre problème principal que nous avons identifié est, quant à lui, lié à la fraude et la corruption auxquelles sont confrontées certaines organisations gouvernementales et ONGs lors de transferts de ressources vers leurs différents bénéficiaires. Selon le Fonds Monétaire International (FMI) (2018), la meilleure façon de lutter contre la fraude et la corruption est de mettre en place des institutions solides, responsables et transparentes dont la légitimité ne puisse être remise en cause.

La deuxième étape du *Blockchain Value Framework* consiste à déterminer si certaines caractéristiques de la blockchain implémentée par AID:Tech peuvent permettre d'améliorer ou résoudre les points faibles identifiés précédemment.

Tout d'abord, comme expliqué au Point 5.4.1, la plateforme AID:Tech permet d'enregistrer des identités sur la blockchain. Ce type d'identité digitale ne nécessite pas de documents traditionnels, ce qui facilite l'accès à l'identité pour les personnes mal desservies et favorise l'inclusion financière. Par ailleurs, grâce à la blockchain, les identités digitales ne peuvent pas être modifiées ou piratées, ce qui les rend plus sûres que les systèmes d'identité traditionnels (Ali, 2021).

En outre, la technologie blockchain sur laquelle se base AID:Tech permet également de lutter contre la fraude et la corruption. En effet, comme nous avons pu le constater dans la première partie de ce mémoire au Point 2.7.2.2, certaines caractéristiques intrinsèques de la blockchain telles que la transparence, la traçabilité, la sécurité et la désintermédiation font de cette technologie un réel atout contre les problèmes cités ci-dessus. De plus, l'utilisation de la blockchain dans ce contexte favorise les principes de bonne gouvernance, en incitant les organisations qui les implémentent à agir de façon responsable et en toute transparence (Cullel, 2019).

La troisième étape consiste à cibler (à l'aide de l'antisèche fournie par le *Blockchain Value Framework*), les nouvelles capacités générées par la blockchain et associées aux différents points faibles préalablement identifiés. Dans le cas de AID:Tech, les capacités liées à la résolution du problème d'accès à l'identité sont la traçabilité complète (// *full traceability*), l'identité renforcée (// *enhanced identity*) et le contrôle (// *control*) dont les détenteurs d'une

identité digitale bénéficieront sur leurs informations personnelles. Celles associées à la solution contre la fraude et la corruption sont la non-falsification de preuves (*// evidence tampering*) et la vision globale (*// holistic view*).

La dernière étape consiste, quant à elle, à identifier les leviers de création de valeurs pour l'organisation (à l'aide de l'antisèche fournie par le *Blockchain Value Framework*). Dans le cas de AID:Tech, les leviers de valeurs associés à la résolution du problème d'accès à l'identité sont la traçabilité (*// track & trace*), la sécurité des données (*// data security*), l'authentification (*// authentication*) et la gestion de l'identité (*// identity management*). Pour ce qui est de la solution contre la fraude et la corruption, les leviers de valeurs sont la sécurité des données (*// data security*), la traçabilité (*// track and trace*), la transparence (*// transparency*) et la confiance (*// trust*).

Les résultats du *Blockchain Value Framework* appliqué à AID:Tech sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 10 : Plus-value de la blockchain pour AID:Tech

Points faibles/ zones d'opportunités	Solutions apportées par la blockchain	Nouvelles capacités	Leviers de valeurs
Les systèmes d'identité traditionnels sont souvent fragmentés, peu sûrs et exclusifs.	L'utilisation de la blockchain permet de créer des identités digitales infalsifiables et facilement accessibles pour les personnes mal desservies, favorisant ainsi l'inclusion financière.	Traçabilité complète ----- Identité renforcée ----- Contrôle	Traçabilité ----- Sécurité de données ----- Authentification ----- Gestion de l'identité
Il y a un grand risque de fraude et de corruption lié aux transferts de ressources.	Certaines caractéristiques de la blockchain telles que la transparence, la traçabilité, la sécurité et la désintermédiation font de cette technologie un réel atout dans la lutte contre la fraude et la corruption, favorisant également les principes de bonne gouvernance.	Non-falsification de preuves ----- Vision globale	Transparence ----- Confiance ----- Traçabilité ----- Sécurité des données

4.3 Évaluation de l'impact de AID:Tech sur les ODDs

Nous allons désormais analyser l'influence de AID:Tech sur les ODDs. Pour ce faire, nous allons utiliser le *SDG Impact Assessment Tool*. Tout comme pour Provenance, afin d'assurer l'objectivité de notre analyse, nous avons recoupé les informations que nous avons pu trouver sur internet avec celles récoltées durant l'entretien avec Émilie Raffo. Lorsque nous travaillions ensemble chez CryptoLake Consulting, Émilie Raffo et moi-même nous étions déjà intéressés à AID:Tech dans le cadre de diverses recherches.

L'impact de AID:Tech sur chacun des ODDs sera catégorisé comme suit : Positif direct / Négatif direct / Positif indirect / Négatif indirect / Neutre / Nécessite plus d'informations. Les résultats de cette analyse sont présentés ci-dessous.

Tableau 11 : Impact de AID:Tech sur les 17 Objectifs de développement durable

N° ODD	Type d'impact	Justification
	Positif direct	La création d'identités digitales est au cœur de la proposition de valeur de AID:Tech. Celles-ci ont notamment pour avantage de faciliter l'accès aux services financiers de base ainsi que l'envoi de ressources aux plus démunis. AID:Tech contribue ainsi directement à la lutte contre la pauvreté.
	Positif indirect	La création d'identités digitales est au cœur de la proposition de valeur de AID:Tech. Celles-ci ont notamment pour avantage de faciliter l'envoi de ressources alimentaires aux plus démunis. AID:Tech contribue ainsi indirectement à la lutte contre la faim.
	Positif indirect	La création d'identités digitales est au cœur de la proposition de valeur de AID:Tech. Celles-ci ont notamment pour avantage de faciliter l'accès et l'envoi de ressources pharmaceutiques aux plus démunis. AID:Tech contribue ainsi indirectement au bien-être et à la santé des personnes concernées.
	Neutre	L'éducation ne fait pas partie des leviers d'action de AID:Tech.

 <p>5 ÉGALITÉ ENTRE LES SEXES</p>	<p>Nécessite plus d'informations</p>	<p>Grâce à la transparence apportée aux organisations par AID:Tech, les principes de bonne gouvernance sont encouragés. Parmi ceux-ci se trouve l'égalité entre les sexes. Cet aspect n'a pas encore fait partie des objectifs réalisés dans le cadre des opérations menées par l'entreprise irlandaise, mais il pourrait le devenir dans le futur.</p>
 <p>6 EAU PROPRE ET ASSAINISSEMENT</p>	<p>Positif indirect</p>	<p>Le modèle mis en place par AID:Tech facilite la distribution de ressources. Dans certains cas, les ressources en question peuvent prendre la forme de bons pour l'achat d'eau potable. Ce fut notamment le cas en 2019 lors d'une opération menée par AID:Tech au Kansas dans le cadre d'une aide humanitaire accordée en raison de catastrophes naturelles.</p>
 <p>7 ÉNERGIE PROPRE ET D'UN COÛT ABDORABLE</p>	<p>Négatif direct</p>	<p>L'utilisation de la blockchain signifie qu'une relativement importante quantité d'énergie est consommée.</p>
 <p>8 TRAVAIL DÉCENT ET CROISSANCE ÉCONOMIQUE</p>	<p>Positif indirect</p>	<p>Le modèle d'identités digitales mis en place par AID:Tech favorise l'inclusion financière. L'entreprise irlandaise contribue ainsi indirectement à la croissance économique car les détenteurs d'une identité digitale ont plus facilement accès aux services financiers.</p>
 <p>9 INDUSTRIE, INNOVATION ET INFRASTRUCTURE</p>	<p>Positif direct</p>	<p>Grâce à son modèle basé sur la blockchain, AID:Tech contribue directement au développement d'infrastructures innovantes, inclusives et durables.</p>
 <p>10 INÉGALITÉS RÉDUITES</p>	<p>Positif indirect</p>	<p>Le modèle de AID:Tech basé sur les identités digitales permet de rendre la distribution de ressources plus transparente et traçable. Par conséquent, ce système assure que les ressources distribuées parviennent aux bons destinataires, ce qui permet d'éviter la fraude, la corruption et d'autres inégalités.</p>
 <p>11 VILLES ET COMMUNAUTÉS DURABLES</p>	<p>Positif indirect</p>	<p>Le modèle mis en place par AID:Tech contribue à l'inclusion financière et à la protection de certaines communautés vis-à-vis de catastrophes naturelles et/ou humaines (guerre civile, immigration, etc.). Par</p>

		conséquent, l'entreprise irlandaise contribue indirectement au développement de villes et de communautés responsables et inclusives.
 12 CONSUMPTION ET PRODUCTION RESPONSABLES	Neutre	La consommation et la production responsables ne font pas partie des leviers d'action de AID:Tech.
 13 MESURES RELATIVES À LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES	Positif indirect	Un des principaux leviers d'action de AID:Tech est l'envoi de ressources vers les communautés touchées par les conséquences de diverses catastrophes naturelles. De cette façon, l'entreprise irlandaise contribue à la limitation des impacts du changement climatique sur les communautés concernées.
 14 VIE AQUATIQUE	Neutre	La protection et la conservation de la biodiversité marine ne font pas partie des leviers d'action de AID:Tech.
 15 VIE TERRESTRE	Neutre	La protection et la conservation de la biodiversité terrestre ne font pas partie des leviers d'action de AID:Tech.
 16 PAIX, JUSTICE ET INSTITUTIONS EFFICACES	Positif direct	AID:Tech collabore avec de multiples organisations/institutions afin d'optimiser la distribution de ressources vers leurs destinataires. Ceci permet de lutter contre la fraude et la corruption en rendant les organisations/institutions partenaires plus transparentes.
 17 PARTENARIATS POUR LA RÉALISATION DES OBJECTIFS	Positif direct	Toutes les opérations menées par AID:Tech ont été réalisées en collaboration avec de multiples organisations telles que la Croix Rouge irlandaise, Microsoft, la Banque Mondiale des Femmes, PharmAccess et le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD). Grâce à ces partenariats, AID:Tech contribue directement à l'ODD 17.

La figure ci-dessous est une synthèse des résultats de l'analyse précédente et nous permet d'avoir une vue d'ensemble sur ceux-ci.

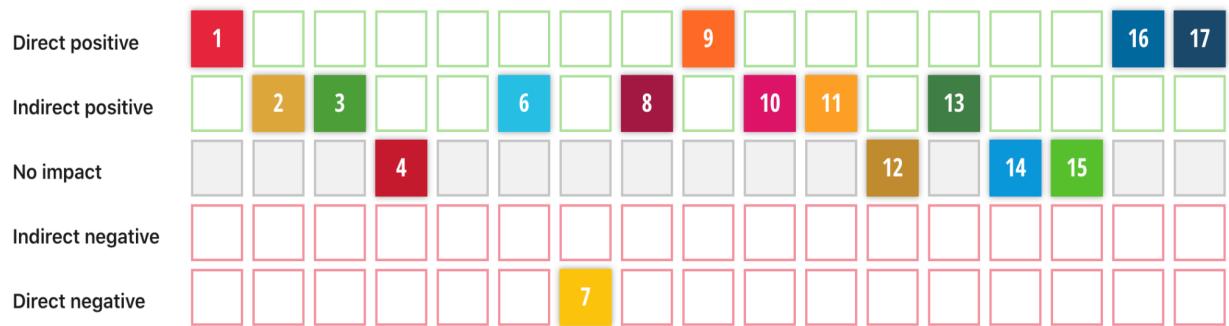


Figure 10 : Impact de AID:Tech sur les 17 Objectifs de développement durable

4.4 Évaluation de l'impact de AID:Tech sur les trois piliers du développement durable

Afin de déterminer les dimensions sur lesquelles AID:Tech a le plus d'influence, nous allons utiliser le *Global Sustainability Model*. Celui-ci consiste à catégoriser l'impact des organisations selon que celui-ci est plutôt, social, écologique ou économique. Pour ce faire, nous allons sélectionner les ODDs sur lesquels AID:Tech est influent (Voir Figure 10) et les classer en fonction de la dimension du développement durable à laquelle ils se rattachent le plus. Notons également que les ODDs sur lesquels AID:Tech a une influence directe sont soulignés en gras.

Les résultats sont synthétisés ci-dessous.

Tableau 12 : Impact de AID:Tech sur les 3 piliers du développement durable

Dimensions	Social	Écologique	Économique
N°ODD positif	1, 2, 3, 6, 10, 11, 16	13, 14, 15	8, 9, 17
N°ODD négatif		7	

Comme on peut le constater ci-dessus, l'influence de AID:Tech se concentre principalement sur la dimension sociale du développement durable. En effet, deux des quatre ODDs sur lesquels AID:Tech a une influence positive directe ont une incidence sociale, de même que cinq des neuf ODDs impactés de façon indirectement positive. Ceci semble logique étant donné que les leviers d'action principaux de AID:Tech sont focalisés sur la création d'identités digitales et la distribution de ressources vers ceux qui en ont besoin. Il n'est donc pas étonnant de constater que l'impact soit concentré sur le pilier social.

En outre, AID:Tech influence positivement treize ODDs sur dix-sept, soit le nombre le plus élevé d'ODDs impactés positivement parmi les cas étudiés dans le cadre de ce mémoire. La seule conséquence négative directement imputable à AID:Tech porte encore une fois sur l'ODD 7, à savoir la consommation énergétique liée à l'utilisation de la blockchain.

5. Agrégation des résultats

Nous allons désormais procéder à une agrégation des résultats issus de l'analyse des cas d'application présentés dans le cadre ce mémoire. Pour ce faire, les résultats obtenus pour chaque organisation seront rassemblés en fonction de l'outil d'analyse utilisé. De cette façon, nous pourrons déterminer si certaines tendances se dégagent ou non.

5.1 Blockchain Value Framework

Tableau 13 : Agrégation des résultats du *Blockchain Value Framework*

Dimensions clés	Leviers de valeur	AxessImpact	Provenance	AID:Tech
Amélioration de la qualité et de la profitabilité	Audit (//auditability)			
	Respect de la législation (//compliance)			
	Paiements (//payments)			
	Standardisation (//standardization)			
	Gestion des données (//data management)			
	Traçabilité (//track & trace)			
	Propriété/titularité (//ownership)			
	Réconciliation (//reconciliation)			
	Automatisation des processus (//process automation)			
	Sécurité des données (//data security)			
Transparence accrue entre les parties prenantes	Partage des données (//data sharing)			
	Transparence (//transparency)			
	Confiance (//trust)			
	Résilience (//resilience)			
Réinvention des produits et des processus	Authentification (//authentication)			
	Nouveaux partenariats (//new or enhanced partnerships)			
	Nouveaux produits et services (//new or enhanced products and services)			
	Gestion de l'identité (//identity management)			
	Création de marchés (//marketplace creation)			

Ci-dessus se trouve un premier tableau récapitulatif. Celui-ci rassemble les résultats issus des cas d'application pour lesquels le *Blockchain Value Framework* a été utilisé. Les cellules grisées représentent les leviers de valeur qu'AxessImpact, Provenance et AID:Tech ont développés grâce à l'utilisation de la blockchain.

Comme on peut le constater, il y a des similitudes entre les différents cas d'application. Par exemple, la sécurité des données, la transparence et la confiance sont des leviers de valeurs qui sont présents chez les trois organisations étudiées. La traçabilité et le partage de données, quant à eux, se retrouvent parmi deux d'entre elles. Ceci semble indiquer qu'à l'heure actuelle, la plus-value associée à l'utilisation de la blockchain est souvent liée à la transparence, la traçabilité, la sécurité et la confiance. Ces caractéristiques permettent notamment aux organisations qui en bénéficient d'améliorer la qualité de leurs produits/services et de renforcer leur profitabilité. Elles favorisent également les relations de confiance grâce à la transparence accrue entre les différentes parties prenantes.

Il est intéressant de faire le lien entre ces résultats et le modèle SOI développé par Adams et al. (2015) qui est illustré par la Figure 3 au Point 1.3.3 de la première partie de ce mémoire. Ce modèle présentait les trois types d'innovations selon leur potentiel de transformation durable : l'optimisation opérationnelle, la transformation organisationnelle et la création de systèmes.

Comme expliqué ci-dessus et illustré par le Tableau 13, la plus-value de la blockchain pour les trois organisations étudiées à l'aide du *Blockchain Value Framework* est focalisée sur deux dimensions principales. La première est l'amélioration de la qualité et de la profitabilité. Ceci s'apparente à de l'optimisation opérationnelle et est donc associé au premier niveau du modèle SOI. La deuxième est la transparence accrue entre les parties prenantes et reflète le deuxième niveau du modèle SOI, la transformation organisationnelle. Ceci nous indique que la plus-value apportée par la blockchain permet bel et bien à AxessImpact, Provenance et AID:Tech d'accroître leur potentiel de transformation durable. Ce dernier serait toutefois encore plus important si plus de leviers de valeurs associés à la blockchain reflétaient la troisième dimension-clé du Framework (c.-à-d. la réinvention des produits et des processus), et donc également le troisième et dernier niveau du modèle SOI, la création de systèmes.

Comme on peut le lire sur l'antisèche du *Blockchain Value Framework* (Voir ANNEXE 1), les projets que l'on peut catégoriser dans cette troisième dimension sont ceux présentant des éléments de tokénisation (//tokenization), d'identité renforcée (//enhanced identity) et d'organisation autonome décentralisée (//decentralized autonomous organisation). Sur base de ce constat, il semblerait que parmi les organisations étudiées, seul AID:Tech puisse être catégorisé comme tel car deux de ses six leviers de valeur appartiennent à la troisième dimension du Framework. Dès lors, AID:Tech est, en théorie, actuellement celle qui a le plus grand potentiel de transformation durable.

5.2 SDG Impact Assessment Tool

Ci-dessous se trouve un deuxième tableau récapitulatif. Celui-ci rassemble les résultats issus de l'analyse des quatre cas d'application au travers du *SDG Impact Assessment Tool*.

Tableau 14 : Agrégation des résultats du *SDG Impact Assessment Tool*

N° ODD	Ethereum		AxessImpact		Provenance		AID:Tech		% des cas où l'ODD est impacté	
	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
1									75%	/
2									50%	/
3									50%	/
4									25%	/
5									25%	/
6									25%	/
7									25%	100%
8									100%	/
9									100%	/
10									25%	25%
11									25%	/
12									50%	/
13									50%	/
14									25%	/
15									50%	/
16									50%	/
17									100%	/

 = impact positif direct
 = impact positif indirect
 = impact négatif direct
 = impact négatif indirect

Le tableau ci-dessus illustre assez clairement le potentiel de la blockchain en termes de contribution aux objectifs de développement durable. En effet, les potentiels bienfaits (en vert) générés grâce à l'utilisation de cette technologie semblent largement surpasser la contrepartie environnementale (en orange) qui y est associée.

Comme on peut le constater, chacun des dix-sept ODDs est impacté positivement par au moins une des quatre organisations étudiées. Les ODDs n° 4 (éducation de qualité), 5 (égalité entre les sexes), 6 (eau propre et assainissement), 7 (énergie propre et d'un coût abordable), 10 (inégalités réduites), 11 (villes et communautés durables) et 14 (vie aquatique) sont impactés positivement par une organisation sur quatre. Les ODDs n° 2 (faim « zéro »), 3

(bonne santé et bien-être), 12 (consommation et production responsables), 13 (lutte contre le changement climatique), 15 (vie terrestre) et 16 (paix, justice et institutions efficaces) sont impactés positivement par deux organisations sur quatre. L'ODD n° 1 (pas de pauvreté) est impacté positivement par trois organisations sur les quatre analysées. Quant aux ODDs n°8 (travail décent et croissance économique), 9 (industrie, innovation et infrastructure) et 17 (partenariats pour la réalisation des objectifs), ils sont impactés positivement par chacune des organisations étudiées.

Seuls les ODDs n°7 (énergie propre et d'un coût abordable) et 10 (inégalités réduites) sont impactés négativement par au moins une organisation sur quatre. L'ODD n° 7 est impacté négativement par les quatre organisations. Ceci n'est pas étonnant au vu du caractère énergivore de la blockchain. Notons toutefois que le degré d'impact sur cet ODD est supposé diminuer grâce au développement de blockchains moins énergivores.

5.3 Global Sustainability Model

Ci-dessous se trouve le dernier tableau récapitulatif. Celui-ci rassemble les résultats issus de l'analyse des quatre cas d'application au travers du *Global Sustainability Model*.

Tableau 15 : Agrégation des résultats du *Global Sustainability Model*

	Nombre d'ODDs influencés selon la dimension du développement durable							
	Social		Écologique		Économique		Total	
	+	-	+	-	+	-	+	-
Ethereum	3	1	1	1	3	/	7	2
AxessImpact	2	/	3	1	3	/	8	1
Provenance	3	/	2	1	3	/	8	1
AID:Tech	7	/	3	1	3	/	13	1
Total	15	1	9	4	12	0	36	5

Comme on peut le constater ci-dessus, l'influence des quatre organisations analysées est répartie de manière relativement équilibrée entre les trois dimensions principales du développement durable. Notons toutefois que la dimension sociale est celle qui semble être la plus impactée positivement par les organisations étudiées (15), suivie respectivement par la dimension économique (12) et la dimension écologique (9). La dimension écologique est celle qui est la plus impactée négativement (4). Ceci est dû à la consommation énergétique inhérente à l'utilisation de la blockchain.

Par ailleurs, le rapport entre le nombre d'ODDs impactés positivement et le nombre d'ODDs impactés négativement illustre bien le potentiel de la blockchain en tant qu'allié du développement durable. En effet, comme on peut le constater dans ce tableau récapitulatif, la somme des nombres d'ODDs impactés positivement par les organisations étudiées est équivalente à 36 (soit une moyenne de 9 par organisation) tandis que la somme des nombres d'ODDs impactés négativement est de 5 (soit une moyenne 1,25 par organisation).

Conclusion générale, limites et recommandations

L'objectif principal de ce mémoire était d'explorer l'inédite frontière entre la blockchain et le développement durable. Pour ce faire, nous avons d'abord procédé à une analyse de la littérature se concentrant sur la question de recherche suivante : « Comment la blockchain peut-elle contribuer à l'atteinte des Objectifs de développement durable émis par l'ONU malgré la consommation énergétique qui y est associée ? »

Suite à cette première phase exploratoire, nous avons sélectionné quatre cas d'application. Ceux-ci ont été choisis de manière à être le plus représentatifs possible du domaine étudié. Ils ont été analysés au travers de trois outils différents :

- Le *Blockchain Value Framework* qui nous a permis de déterminer la plus-value de la blockchain pour les organisations analysées.
- Le *SDG Impact Assessment Tool* qui nous a permis d'évaluer l'impact de chaque organisation sur les ODDs.
- Le *Global Sustainability Model* qui nous a permis de catégoriser les impacts environnementaux des organisations étudiées selon que ceux-ci sont plutôt sociaux, écologiques ou économiques.

Pour y voir plus clair et déterminer si certaines tendances se dégageaient, nous avons terminé notre processus d'analyse en agrégeant les résultats issus de l'étude des quatre cas d'application. Il en résulte que la blockchain peut bel et bien contribuer aux trois piliers principaux du développement durable et impacter positivement chacun des dix-sept ODDs émis par l'ONU.

En outre, l'étude de cas multiples a confirmé que la principale contrepartie environnementale de la blockchain est la consommation énergétique qui y est associée. Néanmoins, tant l'analyse de la littérature que l'étude du cas de la blockchain Ethereum semblent démontrer qu'il s'agit d'un problème propre aux blockchains de type Proof-of-Work. Avec l'émergence de nouveaux consensus nettement moins énergivores, tel que le consensus Proof-of-Stake, le problème énergétique tant reproché à la blockchain et aux crypto-monnaies devrait progressivement s'estomper. Cet avis est également partagé par Benjamin Duval et Émilie Raffo, les deux experts que nous avons interviewés dans le cadre de cette analyse.

Cette conclusion doit cependant être placée dans son contexte en raison de certaines limites associées à la méthodologie de ce mémoire. En effet, seuls quatre cas d'application ont été analysés. Bien que ceux-ci soient représentatifs du domaine de recherche, l'étude d'autres cas d'application pourrait donner lieu à des résultats contrastés. Par ailleurs, les outils d'analyse

utilisés dans le cadre de ce mémoire ont une incidence principalement qualitative et ne permettent donc pas de réellement quantifier ou mesurer le degré l'impact de la blockchain sur les ODDs.

Par conséquent, il serait judicieux de recouper la lecture de ce mémoire avec des analyses quantitatives complémentaires. De plus, nous recommanderions aux futurs étudiants, chercheurs ou autres passionnés de procéder à des analyses de cas complémentaires et à les étaler dans le temps. Ceci permettrait d'étudier l'évolution de l'impact environnemental de la blockchain au fil des années, et d'étendre l'échantillon d'analyse afin d'obtenir des résultats encore plus proches de la réalité du terrain.

D'un point de vue personnel, j'estime que la rédaction de ce mémoire m'a beaucoup apporté. Il m'a notamment permis d'approfondir mes connaissances dans ce domaine qui me passionne depuis déjà plusieurs années. Il m'a également permis de discuter avec des experts que je n'aurais pas rencontrés autrement. Et finalement, ce mémoire m'a fait réaliser que je voulais faire de cet intérêt pour la blockchain et les problématiques environnementales un élément-clé dans mes futurs choix de carrière.

Bibliographie

Adams, R. (2015). *Sustainability-oriented Innovation : A Systematic Review*. Wiley Online Library. Récupéré le 13 février 2021 de

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ijmr.12068>

AID : Tech. (s. d.). *AID : Tech / Identity for Digital Finance*. Aid.Technology. Récupéré le 11 avril 2021 de <https://www.aid.technology>

Ali, M. (2021, 28 mars). *How Blockchain Identity Can Promote Financial Inclusion*. Linkedin. Récupéré le 15 mars 2021 de <https://www.linkedin.com/pulse/how-blockchain-identity-can-promote-financial-ali-mohammed/>

Anwar, H. (2019, 2 octobre). *Blockchain for Digital Identity : The Decentralized and Self-Sovereign Identity (SSI)*. 101 Blockchains. Récupéré le 11 février 2021 de <https://101blockchains.com/digital-identity/>

Bateman, A., & Bonanni, L. (2019, août 20). *What Supply Chain Transparency Really Means*. Harvard Business Review. Récupéré le 20 février 2021 de <https://hbr.org/2019/08/what-supply-chain-transparency-really-means>

Benduski, M. (2020, 9 décembre). *Paris Agreement vs Kyoto Protocol [Comparison Chart]*. Care About Climate. Récupéré le 7 janvier 2020 de <https://www.careaboutclimate.org/blog/paris-agreement-vs-kyoto-protocol-comparison-chart>

Bengtsson, M., Alfredsson, E., Cohen, M., Lorek, S., & Schroeder, P. (2018, 25 mai). *Transforming systems of consumption and production for achieving the sustainable development goals : moving beyond efficiency*. Sustainability Science. Récupéré le 06 mars 2021 de https://link.springer.com/article/10.1007/s11625-018-0582-1?error=cookies_not_supported&code=c59c4eb0-9f48-404c-a42e-0b74e69b857c

BitPanda Academy. (s. d.). *How does a blockchain work?* BitPanda. Récupéré le 8 avril 2021 de <https://www.bitpanda.com/academy/en/lessons/how-does-a-blockchain-work/>

Brakeville, S., & Perepa, B. (2019, 1 juin). *Blockchain Basics : Introduction to Distributed Ledgers*. IBM Developer. Récupéré le 26 mars 2021 de <https://developer.ibm.com/technologies/blockchain/tutorials/cl-blockchain-basics-intro-bluemix-trs/>

Britannica. (s. d.). *Paris Agreement / Summary & Facts*. Encyclopedia Britannica. Récupéré le 7 mars 2021 de <https://www.britannica.com/topic/Paris-Agreement-2015>

Brosens, T. (2019, 17 septembre). *Why Bitcoin transactions are more expensive than you think*. ING Think. Récupéré le 5 février 2021 de <https://think.ing.com/opinions/why-bitcoin-transactions-are-more-expensive-than-you-think>

Builtin. (s. d.). *What Is Blockchain Technology ? How Does It Work ? | Built In*. Récupéré le 8 avril 2021 de <https://builtin.com/blockchain>

CBECI. (2021). *Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI)*. <https://cbeci.org/>

Chamberland, G. (1995). *20 formules pédagogiques (FORMULES PEDAGOGIQUES) (French Edition)*. Presses de l'Université du Québec.

Chen, D. (2021, 23 février). *Legal Challenges Of Blockchain Technology - Unstoppable Domains*. Medium. Récupéré le 8 mars 2021 de <https://medium.com/unstoppabledomains/legal-challenges-of-blockchain-technology-e4ab66e84dec>

Claude, G. (2020, 11 février). *L'étude de cas : qu'est-ce que c'est ?* Scribbr. Récupéré le 12 avril 2021 de <https://www.scribbr.fr/methodologie/etude-de-cas/>

CoinMarketCap. (2021a). *Cours du Power Ledger (POWR), Graphiques, Capitalisation*. Récupéré le 3 mai 2021 de <https://coinmarketcap.com/fr/currencies/power-ledger/>

CoinMarketCap. (2021b). *Ethereum price today, ETH live marketcap, chart, and info*. Récupéré le 8 avril 2021 de <https://coinmarketcap.com/currencies/ethereum/>

Commission Européenne. (2019, 15 novembre). *Paris Agreement*. Climate Action - European Commission. Récupéré le 23 avril 2021 de https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en

Consensys. (s. d.). *Blockchain for Digital Identity : Real World Use Cases*. Récupéré le 19 juin 2021 de <https://consensys.net/blockchain-use-cases/digital-identity/>

Corporate Finance Institute. (s. d.). *Greenwashing*. Récupéré le 16 mars 2021 de <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/knowledge/other/greenwashing/>

Cullel, L. M. (2019a, juin 11). *Blockchain Technology and the UN : The Sustainable Development Goals*. National Crowdfunding & Fintech Association of Canada. Récupéré le 8 avril 2021 de <https://ncfacanada.org/blockchain-technology-and-the-un-the-sustainable-development-goals/>

Cullel, L. M. (2019b, décembre 23). *BlockChain for SDG Use Case*. Blockchain For SDG - Blog and Forum for Blockchain and the SDG. Récupéré le 12 mars 2021 de <https://blockchain4sdg.com/category/blockchain-for-sdg-use-case/>

Cullel, L. M. (2021, 3 avril). *Blockchain and the Sustainable Development Goals - BlockX Labs*. Medium. Récupéré le 24 février 2021 de <https://blockxlabs.medium.com/blockchain-and-the-sustainable-development-goals-c51c52e0af28>

David, M. (2018, 8 janvier). *Fonctionnement d'une blockchain*. Ippon | Cabinet de conseil et expertise en technologies | Discovery to Delivery. Récupéré le 7 janvier 2021 de <https://blog.ippon.fr/2018/01/08/fonctionnement-dune-blockchain/>

de Felippi, P. (2017, 15 mars). *What Blockchain Means for the Sharing Economy*. Harvard Business Review. Récupéré le 11 avril 2021 de <https://hbr.org/2017/03/what-blockchain-means-for-the-sharing-economy>

Deloitte. (s. d.). *La blockchain expliquée. . . en moins de 100 mots*. Deloitte Switzerland. Récupéré le 7 février 2021 de <https://www2.deloitte.com/ch/fr/pages/strategy-operations/articles/blockchain-explained.html>

Deloitte. (2018). *Inclusion Through Distribution*. Deloitte China. Récupéré le 16 avril 2021 de <https://www2.deloitte.com/cn/en/pages/financial-services/articles/how-blockchain-supports-financial-inclusion.html>

de Meijer, C. (2021, 28 février). *Blockchain Technology Challenges : new third-generation solutions*. Finextra Research. Récupéré le 22 avril 2021 de <https://www.finextra.com/blogposting/19949/blockchain-technology-challenges-new-third-generation-solutions>

de Vries, A. (2018, 16 mai). *Bitcoin's Growing Energy Problem*. Cell. Récupéré le 8 janvier 2021 de [https://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351\(18\)30177-6?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2542435118301776%3Fshowall%3Dtrue](https://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351(18)30177-6?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2542435118301776%3Fshowall%3Dtrue)

de Vries, A. (2019). *Renewable Energy Will Not Solve Bitcoin Sustainability Problem*. ScienceDirect. Récupéré le 2 avril 2021 de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S254243511930087X>

Digiconomist. (2019). *Bitcoin Energy Consumption Index*. Récupéré le 18 mai 2021 de <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption>

Digiconomist. (2021). *Ethereum Energy Consumption Index*. Récupéré le 18 mai 2021 de <https://digiconomist.net/ethereum-energy-consumption/>

ECOSOC Youth Forum. (2017). *Role of Technology in Implementing and Monitoring the SDGs*. Nation Unies. Récupéré le 10 mars 2021 de <https://www.un.org/ecosoc/sites/www.un.org.ecosoc/files/files/en/2017doc/Role-of-technology-in-implementing-the-SDGs.pdf>

Eisenhardt, K. M. (1989). *Building Theories from Case Study Research*. Academy of Management.

Ethereum. (2021). *Ethereum 2.0 (Eth2) vision*. Ethereum.Org. Récupéré le 8 avril 2021 de <https://ethereum.org/en/eth2/vision/>

European Environment Agency. (2021). *Blockchain and the environment*. Récupéré le 9 janvier 2021 de <https://www.eea.europa.eu/publications/blockchain-and-the-environment/blockchain-and-the-environment>

Eurostat. (2021). *Production brute et nette d'électricité et de chaleur secondaire par type de centrale et type d'opérateur*. Récupéré le 11 mai 2021 de https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg_ind_peh&lang=fr

Fairley, P. (2019, 2 janvier). *Ethereum Plans to Cut Its Absurd Energy Consumption by 99 Percent*. IEEE Spectrum. Récupéré le 8 avril 2021 de <https://spectrum.ieee.org/ethereum-plans-to-cut-its-absurd-energy-consumption-by-99-percent>

Fonds Monétaire International. (2018, 7 mai). *There's a reason for the lack of trust in government and business : corruption*. IMF. Récupéré le 21 avril 2021 de <https://www.imf.org/en/News/Articles/2018/05/07/theres-a-reason-for-the-lack-of-trust-in-government-and-business-corruption>

Forcam. (2020, août 11). *What is Traceability in Production & Why is it Important?* Récupéré le 10 février 2021 de <https://forcam.com/en/what-is-traceability/>

Frankenfield, J. (2021a, avril 21). *Proof of Stake (PoS)*. Investopedia. Récupéré le 27 mai 2021 de <https://www.investopedia.com/terms/p/proof-stake-pos.asp>

Frankenfield, J. (2021b, juillet 22). *Proof of Work (PoW)*. Investopedia. Récupéré le 27 mai 2021 de <https://www.investopedia.com/terms/p/proof-work.asp>

Gaur, V., & Gaiha, A. (2020). *Building a Transparent Supply Chain*. Harvard Business Review. Récupéré le 8 avril 2021 de <https://hbr.org/2020/05/building-a-transparent-supply-chain>

GIEC. (2019). *Réchauffement planétaire de 1,5 °C*. ipcc. Récupéré le 12 mars 2021 de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_fr.pdf

Great Lakes Institute of Management. (2019, 7 septembre). *Can Blockchain revolutionize Financial inclusion?* Récupéré le 20 janvier 2021 de <https://blog.greatlakes.edu.in/chennai/can-blockchain-revolutionize-financial-inclusion/>

Harapko, S. (2021, 18 février). *How COVID-19 impacted supply chains and what comes next*. EY. Récupéré le 8 avril 2021 de https://www.ey.com/en_gl/supply-chain/how-covid-19-impacted-supply-chains-and-what-comes-next

Hay, A. (2020, 8 juillet). *Crypto and Network Effects - Coinmonks*. Medium. Récupéré le 30 mai 2021 de <https://medium.com/coinmonks/crypto-and-network-effects-e66e69e754d3>

Head, B., & Alford, J. (2015). *Wicked problems : implications for public policy and management*. The University of Queensland. Récupéré le 8 avril 2021 de <https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:364774>

Hertig, A. (2021, 23 mars). *Which Crypto Projects Are Based on Ethereum?* CoinDesk. Récupéré le 21 mai 2021 de <https://www.coindesk.com/which-crypto-dapps-are-on-ethereum>

Herweijer, C. (2019, 24 septembre). *Why tech will be key in our quest to hit the SDGs*. World Economic Forum. Récupéré le 28 mai 2021 de <https://www.weforum.org/agenda/2019/09/technology-global-goals-sustainable-development-sdgs/>

Hödl, L. (2018, 23 juillet). *Blockchain for Impact Assessment — Introduction : Blockchain Use Cases for Environmental Sustainability*. Medium. Récupéré le 16 mars 2021 de <https://medium.com/@hoedllena/blockchain-for-impact-assessment-introduction-blockchain-use-cases-for-environmental-3658c73d3caf>

HQ, L. (2019, 5 décembre). *Why Is Proof of Stake Better for the Environment?* Medium. Récupéré le 21 mai 2021 de <https://medium.com/luniehq/why-is-proof-of-stake-better-for-the-environment-8ac074721930>

IBM. (2018). *Blockchain and GDPR How blockchain could address five areas associated with GDPR compliance*. Récupéré le 5 janvier 2021 de https://iapp.org/media/pdf/resource_center/blockchain_and_gdpr.pdf

Jung, T. J. (2019, 15 avril). *How transparency through blockchain helps the cybersecurity community*. Blockchain Pulse : IBM Blockchain Blog. Récupéré le 13 février 2021 de <https://www.ibm.com/blogs/blockchain/2019/04/how-transparency-through-blockchain-helps-the-cybersecurity-community/>

Kamiya, G. (2019, 5 juillet). *Bitcoin energy use - mined the gap – Analysis*. IEA. Récupéré le 24 mai 2021 de <https://www.iea.org/commentaries/bitcoin-energy-use-mined-the-gap>

Koomey, J. (2019). *Estimating Bitcoin Electricity Use : A Beginner's Guide*. Coin Center. Récupéré le 7 janvier 2021 de <https://www.coincenter.org/estimating-bitcoin-electricity-use-a-beginners-guide/>

KYC-CHAIN. (2020, 21 janvier). *Cryptocurrency Regulations Around the World*. Récupéré le 21 mai 2021 de <https://kyc-chain.com/cryptocurrency-regulations-around-the-world/>

Ladiray, M. (2021, 15 janvier). *WhatsApp : le RGPD suffira-t-il à protéger nos données personnelles ?* TOM.travel. Récupéré le 27 mars 2021 de <https://www.tom.travel/2021/01/15/danger-donnees-personnelles-nouvelles-cgu-de-whatsapp/>

Leparmentier, A. (2021, 13 mai). *Elon Musk annonce qu'il n'acceptera plus de bitcoins pour payer ses Tesla et bouscule la cryptomonnaie*. Le Monde.fr. Récupéré le 7 mai 2021 de https://www.lemonde.fr/economie/article/2021/05/13/elon-musk-annonce-qu-il-n-acceptera-plus-de-bitcoins-pour-payer-ses-teslas-et-bouscule-la-cryptomonnaie_6080069_3234.html

MacMillan, K. (2019, 25 novembre). *The Potential for Blockchain to accelerate progress on SDG 12 on Responsible Consumption and Production*. Blockchain & Climate Institute. Récupéré le 21 mai 2021 de <https://blockchainclimate.org/the-potential-for-blockchain-to-accelerate-progress-on-sdg-12-on-responsible-consumption-and-production/>

Massessi, D. (2019, 6 janvier). *Blockchain Consensus And Fault Tolerance In A Nutshell*. Medium. Récupéré le 3 avril 2021 de <https://medium.com/coinmonks/blockchain-consensus-and-fault-tolerance-in-a-nutshell-765de83b8d03>

Matthews, H. L. B. A. (2021, 22 juin). *The 16 Most Sustainable Cryptocurrencies for 2021*. LeafScore. Récupéré le 17 avril 2021 de <https://www.leafscore.com/blog/the-9-most-sustainable-cryptocurrencies-for-2021/>

McKinsey & Company. (2021, 19 février). *A blueprint for scaling voluntary carbon markets to meet the climate challenge*. Récupéré le 3 mars 2021 de

<https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/a-blueprint-for-scaling-voluntary-carbon-markets-to-meet-the-climate-challenge>

Merry, A. (2018, 29 octobre). *Women Worldwide Struggle to Access Banking Services. Bitcoin Is Only Making That Worse*. Time. Récupéré le 19 janvier 2021 de <https://time.com/5431809/blockchain-financial-inclusion-gender-gap/>

Mougayar, W. (2016, mai). *The Business Blockchain : Promise, Practice, and Application of the Next Internet Technology*. Wiley.Com. Récupéré le 3 avril 2021 de <https://www.wiley.com/en-us/The+Business+Blockchain%3A+Promise%2C+Practice%2C+and+Application+of+the+Next+Internet+Technology-p-9781119300311>

Nakamoto, S. (2008). *Bitcoin : A Peer-to-Peer Electronic Cash System*. bitcoin.org. Récupéré le 30 mars 2021 de <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>

National Law Review. (2020, 20 février). *Blockchain 51% Attacks – Lessons Learned for Developers and Trading Platform Operators*. The National Law Review. Récupéré le 3 juin 2021 de <https://www.natlawreview.com/article/blockchain-51-attacks-lessons-learned-developers-and-trading-platform-operators>

Nations Unies. (s. d.-a). *Les Objectifs de développement durable*. Développement durable. Récupéré le 9 février 2021 de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/objectifs-de-developpement-durable/>

Nations Unies. (s. d.-b). *Sustainable consumption and production*. United Nations Sustainable Development. Récupéré le 8 avril 2021 de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-consumption-production/>

NCP Wallonie. (s. d.). *Horizon 2020 : The 7 societal challenges*. Récupéré le 7 janvier 2021 de <https://www.ncpwallonie.be/en/project-horizon2020-challenges>

NGI. (2019, 20 décembre). *AID:Tech*. Next Generation Internet. Récupéré le 3 avril 2021 de <https://www.ngi.eu/blockchainsforsocialgood/2019/12/20/aidtech/>

Niranjanamurthy, M., Nithya, B., & Jagannatha, S. (2018). *Analysis of Blockchain technology : pros, cons and SWOT / Semantic Scholar*. Semantic Scholar. Récupéré le 10 janvier 2021 de <https://www.semanticscholar.org/paper/Analysis-of-Blockchain-technology%3A-pros%2C-cons-and-Niranjanamurthy-Nithya/2defd8715cf0690f81c3c5ed293a69e47a6f13c7>

Nyman Gibson Miralis. (2020, 18 mars). *Bitcoin, the blockchain and corruption / NGM Lawyers*. Nyman Gibson Miralis Criminal Defence Lawyers. Récupéré le 22 avril 2021 de <https://ngm.com.au/bitcoin-blockchain-and-corruption/>

OCDE. (s. d.). *OECD iLibrary / OECD Digital Economy Papers*. OECD iLibrary. Récupéré le 13 janvier 2021 de https://www.oecd-ilibrary.org/science-and-technology/oecd-digital-economy-papers_20716826

OCDE. (2012, 23 novembre). *Conférence des Nations Unies sur le changement climatique, Doha (COP18) - OCDE*. Récupéré le 13 janvier 2021 de <https://www.oecd.org/fr/environnement/cop18conferencesurlechangementclimatique-doha.htm>

Orcutt, M. (2020, 2 avril). *How secure is blockchain really?* MIT Technology Review. Récupéré le 4 mars 2021 de <https://www.technologyreview.com/2018/04/25/143246/how-secure-is-blockchain-really/>

Organisation Météorologique Mondiale (OMM). (2020, 8 décembre). *2020 on track to be one of three warmest years on record*. World Meteorological Organization. Récupéré le 23 janvier 2021 de <https://public.wmo.int/en/media/press-release/2020-track-be-one-of-three-warmest-years-record>

Parlement Européen. (2018). *Distributed ledger technologies and blockchains : building trust with disintermediation*. European Parliament. Récupéré le 7 mai 2021 de https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-8-2018-0373_EN.pdf?redirect

Peltier, E., & Sengupta, S. (2021, 20 février). *U.S. formally rejoins the Paris climate accord*. The New York Times. Récupéré le 11 janvier 2021 de <https://www.nytimes.com/2021/02/19/world/us-rejoins-paris-climate-accord.html>

Pink, B. J. (2018, 26 juin). *3 ways climate change affects tropical rainforests*. Conservation.Org. Récupéré le 13 janvier 2021 de <https://www.conservation.org/blog/3-ways-climate-change-affects-tropical-rainforests#>

Power Ledger. (s. d.). *Technology*. Récupéré le 8 mai 2021 de <https://www.powerledger.io/platform>

Programme des Nations Unies pour le développement. (2019). *Au-delà des Bitcoins*. UNDP. Récupéré le 20 février 2021 de <https://feature.undp.org/beyond-bitcoin/fr/>

Provenance. (s. d.). *About Provenance : Our Vision & Mission*. Récupéré le 5 avril 2021 de <https://www.provenance.org/about>

Purvis, B., Mao, Y., & Robinson, D. (2018, 3 septembre). *Three pillars of sustainability : in search of conceptual origins*. Sustainability Science. Récupéré le 13 janvier 2021 de https://link.springer.com/article/10.1007/s11625-018-0627-5?error=cookies_not_supported&code=83d03094-729e-4630-bbf2-eec687c4c66b

PwC. (s. d.). *Blockchain – an opportunity for energy producers and consumers?* Récupéré le 19 mars 2021 de <https://www.pwc.com/gx/en/industries/assets/pwc-blockchain-opportunity-for-energy-producers-and-consumers.pdf>

PwC. (2017). *Use Cases for Blockchain Technology in Energy & Commodity Trade*. Récupéré le 3 janvier 2021 de <https://www.pwc.com/gx/en/industries/assets/blockchain-technology-in-energy.pdf>

Quiniou, M. (2019). *Blockchain : The Advent of Disintermediation (Innovation, Entrepreneurship and Management)* (1^{re}éd.). Wiley-ISTE.

Rekhi, S. (2016, 16 mai). *6 Major Macro-Economic Issues*. Economics Discussion. Récupéré le 12 mars 2021 de <https://www.economicsdiscussion.net/macroeconomics/6-major-macro-economic-issues/20641>

Research Institute for Cryptoeconomics. (2019). *BLOCKCHAIN, WEB3 & THE SDGS*. epub. Récupéré le 24 janvier 2021 de https://epub.wu.ac.at/7464/1/SustainableDevelopment%20Report_BlockchainWeb3_SDGs.pdf?fbclid=IwAR04LogFFOwDYCTsvCBloisLBjDUr4-ymC9qLKkh8O9tHoPyYtmbH2vrj_Q

Robinson, J. (2018). *REDD+ Unchained : Blockchain and Climate Change Mitigation – Ecosphere+*. Récupéré le 10 décembre 2020 de <https://ecosphere.plus/2018/11/05/redd-unchained-blockchain-and-climate-change-mitigation-2/>

Rodeck, D., & Curry, B. (2021, 26 mars). *What Is Ethereum And How Does It Work?* Forbes Advisor. Récupéré le 23 mai 2021 de <https://www.forbes.com/advisor/investing/what-is-ethereum-ether/>

Rokkex. (2019, 15 mars). *PoS, PoW, and 12 Other Blockchain Protocols You Didn't Know About*. Medium. Récupéré le 13 janvier 2021 de <https://medium.com/hackernoon/pos-pow-and-12-other-blockchain-protocols-you-didnt-know-about-3634b089d119>

Sangokoya, D., & Ajoku, L. (2018, 25 avril). *From trade unions to NGOs : we all need a say in how tech is governed*. World Economic Forum. Récupéré le 4 juin 2021 de

<https://www.weforum.org/agenda/2018/04/civil-society-tech-progress-fourth-industrial-revolution/>

SDG Compass. (s. d.). *Learn More About the SDGs*. Récupéré le 25 février 2021 de <https://sdgcompass.org/sdgs/>

Sedlmeir, J., Buhl, H. U., Fridgen, G., & Keller, R. (2020). *The Energy Consumption of Blockchain Technology : Beyond Myth*. Springer. Récupéré le 18 janvier 2021 de <https://link.springer.com/article/10.1007/s12599-020-00656-x>

Seppälä, J. (2016, 26 octobre). *The role of trust in understanding the effects of blockchain on business models*. Aalto University. Récupéré le 28 mars 2021 de <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/23302>

Seth, S. (s. d.). *Could Blockchain Bring in Financial Inclusion?* Teknospire. Récupéré le 8 avril 2021 de <https://teknospire.com/blockchain-bring-financial-inclusion/>

Simplilearn. (2021, 9 avril). *What is Ethereum : Understanding Its Features and Applications*. Simplilearn.Com. Récupéré le 4 février 2021 de <https://www.simplilearn.com/tutorials/blockchain-tutorial/what-is-ethereum>

Statista. (2021, 29 juillet). *Energy consumption of a Bitcoin (BTC, BTH) and VISA transaction as of July 29, 2021*. Récupéré le 13 janvier 2021 de <https://www.statista.com/statistics/881541/bitcoin-energy-consumption-transaction-comparison-visa/>

Sustainable Development Goals Knowledge Platform. (2016). *Expert Group Meeting on Exponential Technological Change, Automation, and Their Policy Implications for Sustainable Development . . . Sustainable Development Knowledge Platform*. Récupéré le 20 juin 2021 de <https://sustainabledevelopment.un.org/unsystem/index.php?page=view&type=13&nr=2042&menu=23>

Swan, M. (2015). *Blockchain : Blueprint for a New Economy Paperback*. o'reilly media ; 1 edition (february 8, 2015).

Tapscott, D., & Tapscott, A. (2018). *Blockchain Revolution : How the Technology Behind Bitcoin and Other Cryptocurrencies is Changing the World [Paperback] [Jun 14, 2018] Tapscott, Don, Tapscott, Alex*. Portfolio Penguin.

Tout sur le Bitcoin. (s. d.). *Qu'est-ce qui différencie la Preuve de Travail de la Preuve d'Enjeu*? Récupéré le 15 mars 2021 de <https://www.toutsurbitcoin.fr/quest-ce-qui-differencie-preuve-de-travail-et-preuve-denjeu.htm>

Transparency-One. (s. d.). *3 ways transparency can help achieve the UN Sustainable Development Goals*. Récupéré le 8 août 2021 de <https://www.transparency-one.com/fr/3-ways-transparency-can-help-achieve-un-sustainable-development-goals/>

UNDP. (2015). *Sustainable Development Goals*. United Nations Development Programme. Récupéré le 3 mai 2021 de <https://www.undp.org/sustainable-development-goals>

UNFCCC. (s. d.-a). *L'Accord de Paris*. Récupéré le 4 janvier 2021 de <https://unfccc.int/fr/processus-et-reunions/l-accord-de-paris/l-accord-de-paris>

UNFCCC. (s. d.-b). *What is transparency and reporting?* Récupéré le 7 février 2021 de <https://unfccc.int/process-and-meetings/transparency-and-reporting/the-big-picture/what-is-transparency-and-reporting>

United Nations. (2020). *Recover Better*. UN. Récupéré le 13 janvier 2021 de https://www.un.org/development/desa/en/wp-content/uploads/2020/07/RECOVER_BETTER_0722-1.pdf

Université Catholique de Louvain. (2008). *ETUDE DE CAS*. UCL. Récupéré le 12 juin 2021 de https://sites.uclouvain.be/36inspirations/Methodes/Entrees/2008/4/23_ETUDE_DE_CAS.html

University of Gävle. (s. d.). *Economic sustainability*. Högskolan i Gävle. Récupéré le 30 mars 2021 de <https://www.hig.se/Ext/En/University-of-Gavle/About-the-University/Environmental-Work/What-is-sustainable-development-at-HiG/Economic-sustainability.html>

UNRISD. (2016). *Policy Innovations for Transformative Change*. Récupéré le 2 mai 2021 de [https://www.unrisd.org/80256B42004CCC77/\(httpInfoFiles\)/60FCBDD8C641F3D2C125804F0032FFDF/\\$file/Flagship2016_Overview.pdf](https://www.unrisd.org/80256B42004CCC77/(httpInfoFiles)/60FCBDD8C641F3D2C125804F0032FFDF/$file/Flagship2016_Overview.pdf)

UNSDSN. (2021, 18 février). *SDG Impact Assessment Tool*. Récupéré le 11 novembre 2020 de <https://resources.unsdsn.org/sdg-impact-assessment-tool>

Upfolio. (s. d.). *Ethereum Explained - Illustrated Beginner's Guide*. Récupéré le 22 avril 2021 de <https://www.upfolio.com/ultimate-ethereum-guide>

van der Pol, R. (2018, août 31). *Blockchain for change*. Erasmus University Thesis Repository. Récupéré le 13 janvier 2021 de <http://hdl.handle.net/2105/46073>

Volpicelli, G. (2018, 10 mars). *Does blockchain offer hype or hope?* The Guardian. Récupéré le 21 juin 2021 de <https://www.theguardian.com/technology/2018/mar/10/blockchain-music-imogen-heap-provenance-finance-voting-amir-taaki>

Warren, J. (2010). *Environnement, Social et Economique : les 3 piliers du Développement Durable*. Green Materials. Récupéré le 8 mars 2021 de <https://www.greenmaterials.fr/environnement-social-et-economique-les-3-piliers-du-developpement-durable/#:~:text=par%20Jeremy%20Warren-,Environnement%2C%20Social%20et%20Economique%20%3A%20les%203%20piliers%20du%20D%C3%A9veloppement%20Durable,futures%20de%20r%C3%A9pondre%20aux%20leurs>

Wigand, R. (1995). *Electronic markets and virtual value chains on the information superhighway : Benjamin, R. and Wigand, R.* *Sloan Management Review* 36 (2), 62–72 (Winter 1995). ScienceDirect. Récupéré le 18 janvier 2021 de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0024630195916148?via%3Dhub>

Wilcox, L. (2020, 7 octobre). *The consensus on consensus mechanisms : PoW vs PoS vs DPoS and more*. Luno. Récupéré le 17 avril 2021 de <https://www.luno.com/blog/en/post/the-consensus-on-consensus-mechanisms-pow-vs-pos-vs-dpos-and-more>

World Bank. (2017). *The unbanked*. Récupéré le 23 juin 2021 de <https://globalindex.worldbank.org/chapters/unbanked>

World Economic Forum. (2019, 24 septembre). *Why tech will be key in our quest to hit the SDGs*. Récupéré le 10 janvier 2021 de <https://www.weforum.org/agenda/2019/09/technology-global-goals-sustainable-development-sdgs/>

World Economic Forum. (2020, 27 septembre). *3 ways blockchain can accelerate sustainable development*. Récupéré le 26 février 2021 de <https://www.weforum.org/agenda/2020/09/3-ways-blockchain-can-contribute-to-sustainable-development/>

World Economic Forum & Accenture. (2019). *Building Value with Blockchain Technology : How to Evaluate Blockchain's Benefits*. weforum. Récupéré le 29 janvier 2021 de http://www3.weforum.org/docs/WEF_Building_Value_with_Blockchain.pdf

World Population Review. (2021). *Inflation Rate By Country 2021*. Récupéré le 10 avril 2021 de <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/inflation-rate-by-country>

WWF. (s. d.). *Effects Of Climate Change*. Récupéré le 15 mars 2021 de <https://www.wwf.org.uk/learn/effects-of/climate-change#climate-change-and-oceans>

Yin, R. K. (2003). *Case Study Research : Design and Methods (Applied Social Research Methods)* (3^e éd.). SAGE Publications, Inc.

Young, D., & Woods, W. (2019, 2 mai). *Innovation Is the Only Way to Win the SDG Race*. BCG Global. Récupéré le 7 janvier 2021 de <https://www.bcg.com/publications/2019/innovation-win-sdg-race>