

Technologie blockchain et durabilité environnementale

Contexte

Les notes prospectives (Foresight Briefs) publiées par le Programme des Nations Unies pour l'environnement sont destinées à mettre en lumière un point chaud des changements environnementaux, présenter un sujet scientifique émergent ou étudier une question environnementale actuelle. Elles donnent au public la possibilité de découvrir ce qui se passe dans son environnement en mutation, de comprendre les conséquences de ses choix quotidiens et de réfléchir aux orientations futures des politiques. Le présent numéro 19 de la série examine comment les possibilités révolutionnaires offertes par la technologie blockchain peuvent contribuer à renforcer la durabilité environnementale.

Résumé

La technologie blockchain (mot anglais signifiant « chaîne de blocs ») fait partie des nombreuses technologies émergentes susceptibles de contribuer à la résolution de certains des problèmes environnementaux auxquels nous sommes actuellement confrontés. Ses applications dans ce domaine s'articulent autour des axes suivants : contrôle et suivi des chaînes d'approvisionnement, déploiement d'instruments financiers innovants, échanges pair-à-pair de valeurs converties en jetons (« valeurs jetonisées »), mise en œuvre de systèmes énergétiques décentralisés, et gestion de ressources communes. Elle pourrait également s'avérer utile pour surveiller le respect des accords multilatéraux sur l'environnement (AME) par les différents intervenants et les progrès accomplis dans la réalisation des objectifs de développement durable (ODD). Pour la faire adopter à grande échelle, il faudra toutefois relever les défis actuels et à venir, non seulement en poursuivant sa mise au point, mais aussi en mettant en place divers mécanismes propres à améliorer sa compréhension par les décideurs, les scientifiques et les concepteurs de solutions faisant appel à ses fonctionnalités.

Introduction

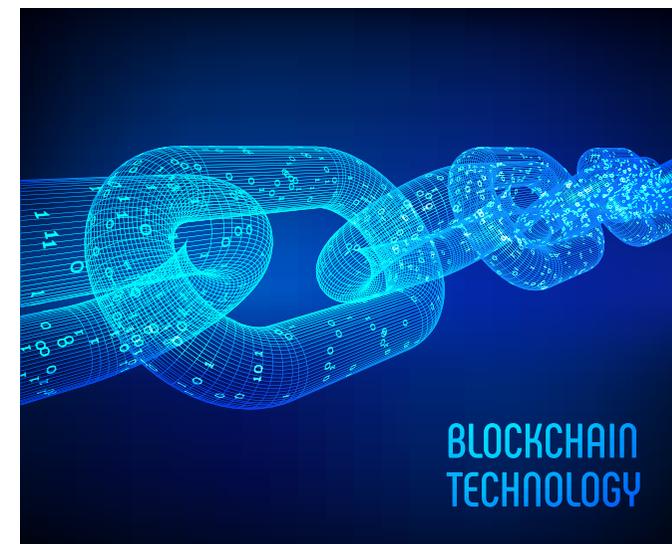
Depuis l'envolée des prix des cryptomonnaies en 2017, la plupart des gens associent la blockchain à ces dernières. Toutefois, depuis quelques années, de plus en plus de chercheurs font valoir que cette technologie pourrait constituer une solution pour faire avancer le développement durable, y compris son volet environnemental axé sur la durabilité. Le Programme de développement durable à l'horizon 2030 et l'Accord de Paris sur le climat offrent aux organismes des Nations Unies et autres organisations des occasions sans précédent de répondre aux besoins des gouvernements et de la société civile, tout en posant un certain nombre de défis inédits. La blockchain est considérée comme une technologie de rupture prometteuse pouvant contribuer à apporter les innovations nécessaires pour relever plusieurs de ces défis¹.

Le concept de blockchain a fait son apparition en 2008 sous la forme d'une monnaie numérique cryptée et décentralisée²

. La technologie sous-jacente est aujourd'hui au cœur d'enjeux qui dépassent le cadre des cryptomonnaies et pourrait bien modifier les modes d'interaction entre les institutions, les personnes et les machines. Toutefois, on ne sait toujours pas avec certitude quel sera son impact. Diverses parties prenantes, notamment des entités du



© VAlex / Shutterstock.com



© Lurii Motov / Shutterstock.com

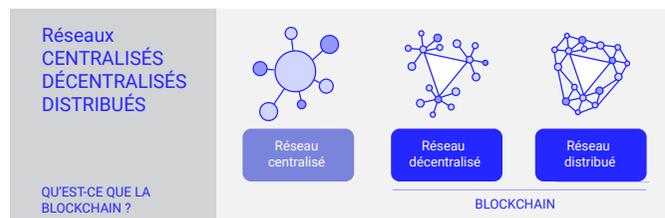
secteur industriel, des gouvernements et des organisations à but non lucratif, escomptent que la blockchain, et d'autres technologies émergentes telles que l'intelligence artificielle (IA) et l'Internet des objets (IoT), auront des effets transformateurs dans toutes les branches d'activité et au sein de la société (Hedenborg, 2018 ; Gartner, 2019).

La présente note prospective examine la façon dont la blockchain pourrait contribuer à renforcer la gestion de la durabilité environnementale. Elle fait fond sur des cas d'utilisation dans le domaine de l'environnement pour analyser les principales caractéristiques de cette technologie, notamment en ce qui concerne la tenue de registres, la transparence, les transferts de valeurs, la création d'écosystèmes de jetons et la réduction des coûts. Elle se penche également sur les défis liés aux applications connexes et donne des orientations destinées à améliorer les politiques portant sur cette technologie.

1 Il convient de noter que la chaîne de blocs n'est pas la solution miracle aux problèmes environnementaux auxquels nous sommes actuellement confrontés, mais plutôt un levier qui, à certains égards, peut aider à les surmonter.
2 Le bitcoin et l'éther sont des exemples bien connus de monnaie numérique.

Importance de la blockchain

Le manque de confiance à l'égard des règles régissant l'échange et la possession de ressources engendre des difficultés à assurer la préservation des écosystèmes et la gestion des ressources naturelles (Le Sève, Mason et Nassiry, 2018). La blockchain est un système de registre distribué fonctionnant sur des millions d'appareils connectés via Internet à un réseau distribué (**Figure 1**). Chaque bloc de données ou d'informations introduit dans le registre est relié aux blocs existants de façon à créer une chaîne de blocs, et se voit attribuer une signature unique générée à partir de la séquence de données qu'il contient. Au sein du registre distribué, toutes les valeurs, notamment l'argent, les titres fonciers, l'électricité et même les votes, peuvent être stockées et transférées de manière sécurisée. La blockchain constitue le premier support numérique de la valeur, tout comme Internet a été le premier support numérique de l'information (Tapscott, D. et Tapscott, A., 2016).



© art_inside / Shutterstock.com, adapted by Truong et al 2016

Figure 1 : Illustration des concepts de systèmes décentralisés et distribués reposant sur la blockchain

Le système de registre partagé blockchain offre une protection contre la falsification ou la fraude, ce qui permet de tenir des registres fiables et transparents des transactions (Le Sève, Mason et Nassiry, 2018). Une transaction ajoutée à la blockchain est horodatée, authentifiée au moyen de contrats intelligents (Geiregat, 2018)³ et stockée de manière immuable sans intervention d'une autorité centrale. Les contrats intelligents ont pour avantage de réduire les coûts opérationnels liés à l'exécution de processus manuels et informatiques complexes,

³ Un contrat intelligent peut être décrit comme un matériel et/ou un logiciel déclenchant, vérifiant et/ou enregistrant des actes juridiquement pertinents assujettis à des événements prédéterminés et numériquement certifiés, qui permet(tent), selon les circonstances, de conclure des contrats juridiquement contraignants.



© jsabirova / Shutterstock.com, tel qu'adapté par hackernoon et blockgeeks

Figure 2 : Avantages des contrats intelligents

qui nécessitent la conclusion d'accords faisant intervenir plusieurs intermédiaires et entités (Szabo, 1997) (**Figure 2**). Ils permettent en outre d'automatiser l'exécution des accords contraignants passés entre entités. Ils amélioreront l'efficacité et la transparence des évaluations de l'impact de nos comportements, des échanges de valeurs et de la tenue des registres de transactions dans de nombreux secteurs. Leur adoption génère également des retombées de grande ampleur propres à révolutionner la gestion de l'environnement naturel et de ses ressources (Jensen et Campbell, 2019).

Mettre la blockchain au service de la gestion de l'environnement

La présente section évalue les utilisations qui pourraient être faites de la technologie blockchain face aux questions environnementales qui se posent à l'échelle mondiale. Compte tenu des caractéristiques de la blockchain, les applications fondées sur cette technologie peuvent contribuer à renforcer la gestion de l'environnement selon les cinq axes suivants : 1) tenue de registres ; 2) transparence ; 3) transfert de valeurs ; 4) création d'écosystèmes de jetons ; et 5) réduction des coûts.

Tenue de registres

Il est primordial que les données environnementales soient enregistrées et gérées de manière sécurisée. Toutefois, cet élément n'est déterminant que dans certains cas spécifiques, car

d'autres systèmes ne faisant pas appel à la technologie blockchain permettent aussi de stocker les données en toute sécurité. Le suivi et l'établissement de rapports au titre des conventions, ainsi que les évaluations de l'impact sur l'environnement et l'élaboration des politiques de gestion de l'environnement dépendent tous de la disponibilité de données environnementales fiables et de qualité. En outre, les informations ayant trait aux actifs environnementaux doivent être sécurisées car elles constituent des preuves de propriété pour les États, les entreprises et les peuples autochtones. Des informations sur les titres fonciers et la propriété des actifs sont, par exemple, indispensables pour l'initiative REDD+ (mécanisme de réduction des émissions résultant du déboisement et de la dégradation des forêts), comme l'est l'enregistrement de données sur les échanges de droits d'émission de carbone⁴, la santé et les services écosystémiques, ainsi que les paiements relatifs à ces services (PSE) pour l'élaboration des politiques concernant ces paiements.

La vulnérabilité des systèmes d'enregistrement sur support papier et des systèmes d'enregistrement centralisés doit être prise en compte. Par exemple, le tremblement de terre qui a frappé Haïti en 2010 a détruit des bâtiments municipaux abritant des archives papier, notamment des titres de propriété foncière. Un système de tenue de registres blockchain pourrait dans de tels cas offrir des possibilités d'éviter une perte d'informations. Son registre partagé permet à de multiples acteurs d'avoir à n'importe quel moment la même vue de son état, avec un référentiel immuable (Meunier, 2018). Il permet ainsi la création d'un registre fiable des titres fonciers. Même en cas de catastrophe naturelle causant des dégâts matériels importants, les bases de données blockchain peuvent être gérées en toute sécurité. Grâce aux systèmes de gestion des données offerts par cette technologie, il n'est plus nécessaire de tenir des registres centralisés. Une fois introduites dans la blockchain, les données sont horodatées, authentifiées et stockées de manière immuable. Il en résulte que les solutions fondées sur cette technologie peuvent offrir une plateforme collaborative et inaltérable permettant d'archiver les données de manière décentralisée (Meunier, 2018). L'utilisation de ces plateformes d'information décentralisées peut également contribuer à l'élimination des silos de données fragmentées.

⁴ En outre, l'enregistrement sur chaîne de blocs du budget carbone mondial pourrait s'avérer utile, car le potentiel cryptographique de cette technologie rend sa falsification improbable.

Transparence

La transparence est l'un des éléments clés de la bonne gouvernance et constitue une condition préalable à l'application du principe de responsabilité dans les secteurs public et privé. Elle permet d'instaurer un climat de confiance au sein de la population (Transparency International, 2009). Des systèmes de gouvernance transparents permettent de donner de la clarté aux procédures et processus et garantissent aux citoyens un accès facile, rapide et précis à l'information publique (Suk Kim, 2005). La transparence assurée par la diffusion d'informations occupe une place de plus en plus importante au cœur de la gouvernance environnementale mondiale de façon à garantir une gouvernance responsable, légitime et efficace (Gupta, 2008). Les solutions blockchain fournissent une source de données immuable et un registre traçable et vérifiable permettant de savoir « qui échange quoi, et avec qui » (Le Sève et al., 2018).

Dans les chaînes d'approvisionnement en ressources naturelles, la transparence est, par exemple, primordiale non seulement pour la préservation du patrimoine environnemental, mais aussi pour la prévention des conflits et la sécurité humaine. Il est important de

noter que la technologie blockchain permet de vérifier l'origine des marchandises, mais pas de suivre leur parcours, si on l'emploie pour conserver les informations pertinentes. Par conséquent, il convient de la combiner avec des outils de surveillance et de localisation pour pouvoir obtenir des informations sur les mécanismes, les itinéraires et les conditions de transport à tous les niveaux de la chaîne d'approvisionnement et, ainsi, rendre plus transparentes les opérations liées à l'approvisionnement d'un produit donné. Dans un exemple d'utilisation, le Fonds mondial pour la nature (WWF), en partenariat avec ConsenSys, s'en sert pour faire cesser la pêche illicite au thon, en enregistrant des informations sur la chaîne d'approvisionnement, depuis le navire jusqu'au distributeur, afin de ne laisser aux opérateurs du secteur aucune possibilité de pêche illicite, non déclarée et non réglementée et de violation des droits fondamentaux (WWF, 2018). Une autre application permet d'assurer la traçabilité des produits chimiques, ce qui contribue à asseoir la confiance des consommateurs. Compte tenu des règlements en vigueur en matière d'environnement, à l'exemple de la Directive relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques (RoHS) ou du Règlement concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions

applicables à ces substances (REACH), les fabricants de produits finis doivent gérer l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement non seulement pour rationaliser les coûts, mais aussi pour se conformer aux dispositions desdits règlements.

La technologie blockchain pourrait également permettre d'assurer une plus grande transparence dans l'application des accords multilatéraux sur l'environnement (AME), qui nécessite de recueillir et de vérifier de très nombreuses données. Il est possible d'opérer une transformation du système de contrôle du respect des AME en tirant parti de la traçabilité des matériaux. Le secrétariat de la Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction (CITES) est au fait des possibilités offertes par les systèmes blockchain en ce qui concerne la gestion du commerce international des espèces menacées et de leurs produits dérivés, dont il a la charge et qui, actuellement, fait intervenir beaucoup de documents sur papier. Ces systèmes peuvent constituer un moyen de remédier aux risques de manipulation et d'erreur induits par le dispositif d'autorisation sur support papier en remplaçant ce dernier par une solution fondée sur un registre immuable regroupant les autorisations traitées conformément à l'accord CITES (Busse et al., 2019). Ils pourraient aider à assurer un suivi transparent des données environnementales et à faire le point sur la concrétisation des engagements pris. Des systèmes analogues pourraient être appliqués à d'autres secrétariats de traités relevant du PNUE.

En outre, les ODD pourraient servir de langage commun et de point d'ancrage pour renforcer l'interconnectivité des données hétérogènes dans le cadre du contrôle et du suivi des chaînes d'approvisionnement. Positionnée à l'intersection de l'ODD 1 (Pas de pauvreté), de l'ODD 12 (Consommation et production durables) et de l'ODD 15 (Vie terrestre), la blockchain pourrait par exemple permettre d'offrir un complément de revenu aux ramasseurs et ramasseuses de déchets du secteur informel qui vivent le plus souvent sous le seuil de pauvreté et sont fortement exposés aux contaminants et aux matières dangereuses. Les déchets collectés (électroniques ou plastiques) pourraient être acheminés vers un partenaire local indépendant, puis livrés à des entreprises clientes afin d'optimiser le potentiel de circularité des matériaux récupérés par leur réutilisation dans de nouveaux produits. En échange, les entreprises pourraient payer un prix plus élevé que ceux du marché, ce qui permettrait aux entreprises sociales d'offrir des compensations financières appréciables aux ramasseurs et ramasseuses de déchets. Un système de suivi blockchain peut aider à surveiller les effets des substances dangereuses tout au long de la

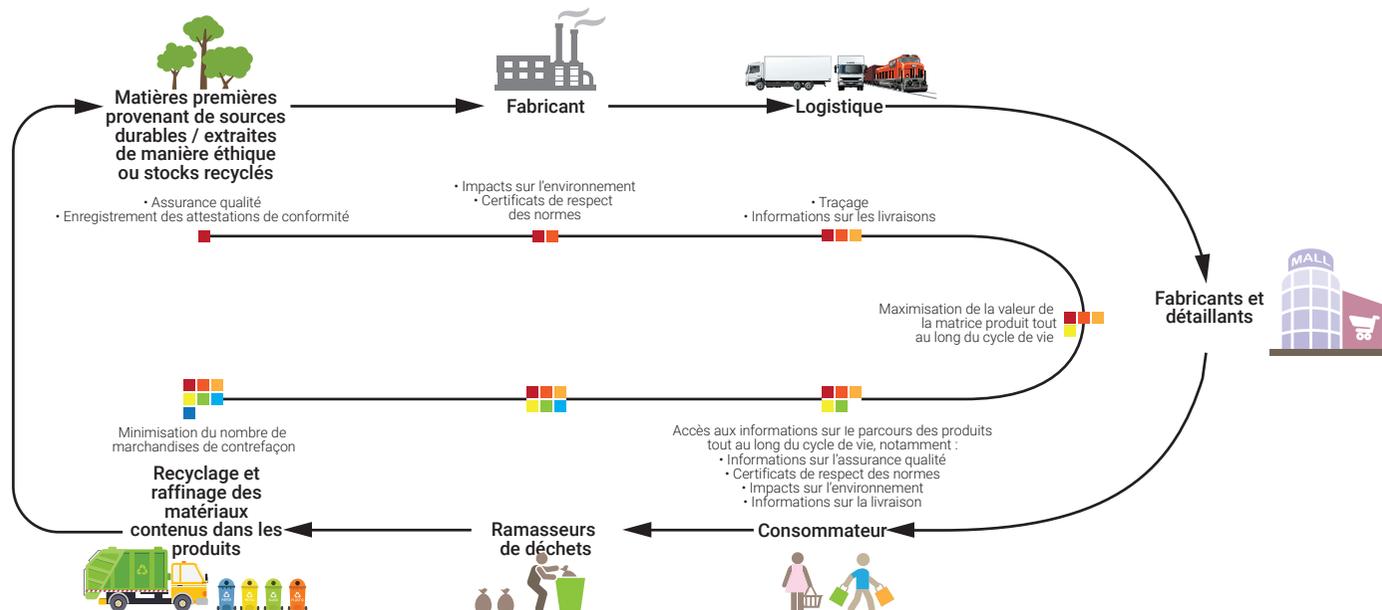


Figure 3 : Aperçu général de ce à quoi pourrait ressembler une chaîne d'approvisionnement appuyée par la technologie blockchain)

Source : par les auteurs



© elenabsl / Shutterstock.com

chaîne d'approvisionnement, à assurer la séparation des éventuels contaminants et à mettre en place un mécanisme prévoyant l'attribution de récompenses sous forme de jetons aux ramasseurs et ramasseuses de déchets, ainsi qu'aux autres intermédiaires impliqués, ce qui aura pour effet d'accroître le recyclage.

Transfert de valeurs

Le transfert de valeurs, à l'exemple des paiements transfrontières, était auparavant un processus qui passait par de nombreuses étapes et impliquait un grand nombre de personnes. Il en est ainsi de l'échange de crédits d'émission de carbone, qui fait intervenir diverses entités. Par exemple, les activités liées à la vérification des projets et à la validation des transferts de crédits dans le cadre du Mécanisme pour un développement propre (MDP) du Protocole de Kyoto peuvent prendre des années et s'appuient sur de nombreux registres aux échelons national et mondial. Les solutions blockchain pourraient être exploitées pour transposer à une plus grande échelle le transfert direct de valeurs de pair à pair (P2P), grâce à leur registre partagé décentralisé, qui rend possible l'autorisation et le règlement de telles transactions sans autorité centrale, comme le montrent les cryptomonnaies (Meunier, 2018). La plateforme CarbonX (lancée par ConsenSys) offre un exemple de transfert de valeurs. Ses fonctionnalités de sourçage et de conversion des compensations des émissions de carbone en jetons cryptographiques stockés

sur une blockchain privée permettent de valider la provenance de toutes les transactions et d'en garantir la sécurité et la transparence. CarbonX est la première plateforme P2P d'échange de crédits d'émission de carbone qui, reposant sur la blockchain d'Ethereum, achète des compensations des émissions de carbone dans le cadre du programme REDD+ appuyé par les Nations Unies. Elle certifie les réductions des émissions de gaz à effet de serre obtenues par les projets de réhabilitation des forêts et des écosystèmes menés partout dans le monde et convertit les crédits connexes en cryptomonnaie, sous la forme de jetons appelés CxT. Ces jetons sont ensuite vendus aux détaillants et aux fabricants, qui les utilisent pour inciter les consommateurs à faire des choix plus durables⁵. Des études sont également menées sur la possibilité d'utiliser la technologie blockchain pour développer le marché de droits d'émission de carbone au titre de l'article 6 de l'Accord de Paris (Dong et al., 2018). Le recours à cette technologie pourrait renforcer la confiance des participants dans le système d'échange de droits d'émission en permettant le suivi et l'échange d'unités de réduction des émissions dans le cadre des mécanismes d'attribution de crédits carbone, tels que les démarches concertées visées au paragraphe 2 de l'article 6 de l'Accord de Paris, les programmes volontaires, et les mécanismes bilatéraux et infranationaux. Un registre partagé permettra de remédier au risque de double comptabilisation des réductions d'émissions. Il pourrait également améliorer la transparence dans l'attribution de droits d'émission aux émetteurs participant au programme d'échange de droits d'émission adopté au titre du mécanisme de plafonnement et d'échange.

La blockchain est par ailleurs compatible avec l'Internet des objets (IoT), qui mutualise, via Internet, les dispositifs informatiques intégrés dans des objets du quotidien, leur donnant ainsi l'aptitude d'échanger des données sans aucune intervention humaine, ce qui permettrait de transférer des valeurs environnementales sous forme d'actifs virtuels au moyen de contrats intelligents déployés sur des réseaux P2P. Les ressources environnementales deviendraient de cette façon des actifs transférables via l'IoT. Les contrats intelligents, qui sont en fait des couches ajoutées aux réseaux blockchain et de l'IoT, sont capables de gérer les interactions fondées sur les données. Par exemple, la ville de Fremantle (Australie) utilise la plateforme Powerledger, qui permet aux distributeurs d'énergie et à leurs clients d'échanger des ressources énergétiques et hydriques aux fins de la mise en place d'une stratégie des villes intelligentes (Power Ledger, 2018). Le système blockchain sous-jacent facilite les échanges entre pairs d'électricité

⁵ <https://www.carbonx.ca/>

issue de sources renouvelables en permettant aux habitants de vendre directement leur surplus d'énergie solaire au lieu de le vendre au réseau énergétique classique. Les microréseaux énergétiques communautaires fondés sur la blockchain permettent en substance aux consommateurs locaux de réaliser des échanges d'énergie, en enregistrant les informations connexes d'une manière sécurisée qui en garantit l'invulnérabilité (Andoni et al., 2019).

Écosystèmes de jetons

Inciter les gens à adopter des comportements individuels durables peut se révéler difficile en l'absence d'un mécanisme de suivi et d'évaluation des changements sur ce plan. Des limitations technologiques ont jusqu'ici entravé les efforts de gestion vérifiable et transparente de la durabilité environnementale. La technologie blockchain pourrait toutefois fournir une solution. Des jetons y sont souvent utilisés pour représenter sous forme numérique des actifs comme, par exemple, des matières premières, des actions et même des produits physiques (Union européenne [UE], 2019). Il est possible d'assurer le suivi de ces jetons et de les échanger sur des réseaux blockchain gérés de manière sécurisée. La « jetonisation » des ressources naturelles et les récompenses pour participation au mécanisme de consensus peuvent constituer des incitations à se joindre au réseau et à opérer au sein du système. Elles favorisent également l'« effet de réseau », qui renforce l'écosystème. Les écosystèmes « jetonisés » sur blockchain sont utilisés pour encourager des changements de comportement positifs.

Une autre application de la blockchain susceptible d'entraîner des changements de comportement consisterait à suivre, mesurer et récompenser les comportements écologiquement durables. Par exemple, RecycleToCoin est une application mobile qui a pour objet de récompenser le recyclage de 90 % des plastiques, notamment des bouteilles en polyéthylène téréphtalate (PET), mais aussi des canettes en aluminium et des boîtes de conserve en acier. Les données sont introduites dans un système de données blockchain auquel toutes les parties prenantes peuvent accéder de façon à en garantir la transparence. À l'issue du recyclage, les citoyens et citoyennes se voient attribuer des points qui peuvent être échangés contre des récompenses, notamment des cartes-cadeaux électroniques ou d'autres cadeaux offerts par les partenaires participants⁶

⁶ <https://www.recycling-magazine.com/2017/11/11/first-recycling-initiative-blockchain/>

L'« économie des jetons » est également appliquée à la collecte et à l'échange de données. Bien que les entreprises produisent de grandes quantités de données, elles ont souvent du mal à trouver des moyens sûrs et fiables de les partager. La plateforme Ocean Protocol offre un écosystème blockchain qui permet un tel partage. Son système de jetons favorise les échanges de données entre fournisseurs et utilisateurs.

Le protocole sous-jacent est principalement axé sur l'échange de données à l'appui du développement d'applications dans le domaine de l'intelligence artificielle (IA), en vue de répondre aux nouveaux besoins en matière de données qui se font jour, en particulier dans ce secteur. Il renforce l'utilisation de l'IA en stockant les métadonnées, en reliant les actifs et les services et en offrant un cadre d'octroi de licences. Il permet également aux utilisateurs de monétiser leurs données tout en préservant leur confidentialité et en gardant le contrôle sur celles-ci⁷

Les écosystèmes jetonisés sont en outre utilisés pour démocratiser les plateformes d'investissement par le lancement d'offres initiales de jetons (ICO) et le développement de cryptomonnaies s'intégrant au réseau blockchain sous forme de jetons liés à des actifs ou informations d'ordre environnemental. En raison du durcissement des réglementations nationales en vigueur concernant les ICO, la communauté blockchain s'intéresse de plus en plus aux applications possibles des offres de jetons d'investissement (STO) comme solutions de remplacement pour le transfert des valeurs jetonisées. En effet, comme les STO sont conformes aux réglementations financières en vigueur, elles permettent aux investisseurs d'acheter des titres financiers jetonisés (Schletz, Nassiry et Lee, 2020). Elles prennent donc peu à peu de l'envergure dans les applications liées à la durabilité environnementale. Par exemple, la banque multinationale espagnole BBVA s'est servie d'une plateforme blockchain pour négocier les termes d'une obligation verte structurée⁸. Les STO pourraient être appliquées à l'émission de telles obligations.

Selon HSBC et la Sustainable Digital Finance Alliance (SDFA), les Philippines ont publié un cadre réglementant les jetons d'investissement et régissant la comptabilisation des actifs numériques, qui fait apparaître une volonté de promouvoir les investissements verts destinés à la lutte contre les catastrophes naturelles d'origine climatique (HSBC et SDFA, 2019). Les institutions

financières et les gouvernements se penchent de plus en plus sur les possibilités d'utiliser la technologie blockchain pour révolutionner les modèles de financement.

Réduction des coûts

Les opérations liées au traitement de grands ensembles de données mondiales prennent beaucoup de temps, mais des applications blockchain peuvent être utilisées pour réaliser des gains d'efficacité opérationnelle.

Un rapport de McKinsey (Carson et al., 2018) estime que la valeur stratégique à court terme de la blockchain réside principalement dans la réduction des coûts. L'élimination des intermédiaires et de la charge administrative liée à l'archivage peut contribuer à faire baisser les coûts associés à la gestion des données et au traitement des transactions.

Par exemple, le Programme alimentaire mondial de l'Organisation des Nations Unies (PAM) a utilisé la blockchain d'Ethereum dans le cadre d'un programme pilote baptisé « Building Blocks » pour transférer des fonds au moyen de bons ou de cartes de paiement prépayées, permettant ainsi à des personnes vivant en Jordanie et au Pakistan d'acheter par elles-mêmes des denrées alimentaires.

Cette initiative a permis de réduire les frais associés aux transferts monétaires et entraîné une diminution de 98 % des coûts, car les transactions de pair à pair (P2P) permettent de se passer des intermédiaires, tels que les banques et autres institutions, qui procèdent habituellement à des vérifications coûteuses. En outre, la technologie blockchain joue ici un rôle crucial en permettant de répertorier les propriétaires des actifs sans passer par une autorité centrale. Il est possible de la sorte d'accélérer les transactions tout en réduisant les risques de fraude ou d'erreur dans la gestion des données grâce à la protection des données des bénéficiaires, en contrôlant les risques financiers et en assurant un déploiement plus rapidement des opérations d'aide face aux situations d'urgence⁹. Il convient toutefois de noter que la blockchain reste une structure de données fortement consommatrice de ressources et à faible rendement de calcul. Elle permet de dégager des gains d'efficacité opérationnelle dans certains cas précis. Les problèmes qu'elle pose sont examinés plus en détail dans la section suivante. Une économie numérique bâtie sur la blockchain et d'autres



Figure 4 : Économie numérique verte

technologies émergentes contribuerait à accroître l'efficacité de l'aide internationale en faveur de la durabilité environnementale, en réduisant les coûts de distribution des ressources financières, en améliorant la transparence tout au long du parcours des fonds, depuis les donateurs jusqu'aux bénéficiaires visés, et en réduisant les coûts liés à l'établissement de rapports à plusieurs niveaux grâce à la capacité d'autovérification de cette technologie. On peut voir sur la Figure 4 une représentation graphique montrant à quoi pourrait ressembler l'économie numérique verte.

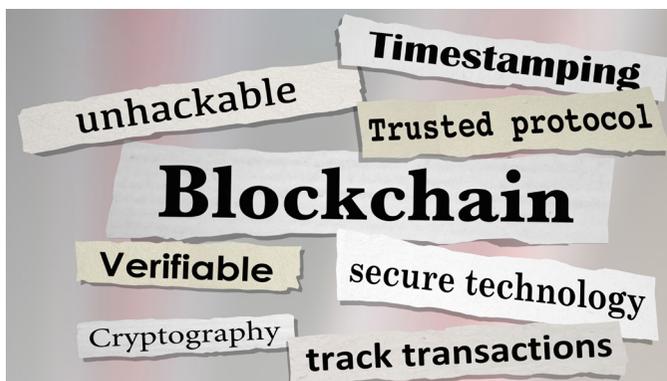
Défis posés par la technologie blockchain

Pour l'heure, la plupart des cas d'utilisation sont soit au stade de la conception, soit en phase pilote, et seul un petit nombre sont pleinement opérationnels. Les applications blockchain actuellement consacrées à l'environnement s'articulent autour des thématiques suivantes : échanges de ressources naturelles ou de permis entre pairs, contrôle et suivi des chaînes d'approvisionnement, nouveaux modèles de financement, et mise en place de systèmes énergétiques décentralisés. Il reste

⁷ <https://oceanprotocol.com/>

⁸ <https://www.bbva.com/en/bbva-issues-the-first-blockchain-supported-structured-green-bond-for-mapfre/>

⁹ <https://innovation.wfp.org/project/building-blocks>



© IQoncept / Shutterstock.com

toutefois des défis à relever, car la technologie en est encore à ses balbutiements. Bien qu'elle puisse contribuer à stimuler l'innovation en matière de gestion de l'environnement, son adoption à grande échelle dépend du succès des efforts déployés pour maîtriser certains des risques encourus et mettre à l'essai son utilisation en combinaison avec d'autres technologies, existantes ou émergentes. Certains des défis précités sont examinés ci-après. Il ne s'agit pas d'une liste exhaustive mais d'une illustration des obstacles à surmonter.

Consommation d'énergie

La création d'un nouveau bloc au sein d'une chaîne nécessite une grande quantité d'énergie, notamment lors de l'exécution du processus de validation des transactions à l'aide des mécanismes de consensus, tels que les algorithmes de preuve de travail (PoW), utilisés pour le réseau Bitcoin (Ge et al., 2017).

Selon les estimations, le « minage » du Bitcoin (processus par lequel les transactions sont vérifiées et ajoutées à une chaîne de blocs) consommerait plus de 58 TWh d'électricité par an, soit l'équivalent de la consommation énergétique annuelle totale de la Suisse (Baraniuk, 2019)

Les opérations de minage à grande échelle sont souvent réalisées dans des régions où les prix de l'électricité sont plus bas et bénéficient de fortes subventions. La densité de puissance requise lors du minage peut être extrêmement élevée, en particulier si l'on y ajoute l'énergie nécessaire pour limiter l'échauffement du matériel. L'une des solutions à ce problème pourrait être de passer au « minage vert », consistant à recourir à des énergies renouvelables, qui fait l'objet d'un

intérêt croissant et a donné lieu à des investissements à hauteur de 134 millions de dollars en 2018 (Climate-KIC, 2018).

Les cas d'utilisation de la blockchain dans le domaine de l'environnement, qui sont évoqués dans la présente note prospective, reposent sur d'autres mécanismes de consensus, tels que les algorithmes de preuve d'enjeu (PoS) ou de preuve d'autorité (PoA), moins gourmands en énergie. L'équipe chargée du développement d'Ethereum travaille à une version 2.0 du protocole de ce réseau qui, entre autres mises à niveau, fait appel à la PoS au lieu de la PoW. Par conséquent, les mécanismes de consensus sont encore sujets à des évolutions qui peuvent, selon le cas, entraîner une baisse de la consommation d'énergie pour les blockchains utilisées à des fins commerciales et déployées à grande échelle. En revanche, les systèmes « privés » ou « sans permission », tels que Hyperledger Fabric, ne suscitent pas de conflits liés à la consommation d'énergie grâce à leur nombre réduit de nœuds complets (Franke et al., 2020).

Extensibilité

Le niveau de maturité insuffisant de la technologie blockchain constitue un obstacle aux efforts déployés pour que les applications à grande échelle respectent les normes de viabilité environnementale. Par exemple, l'intégration d'applications blockchain à la gestion des réseaux d'électricité supposerait un ajustement en temps réel de l'offre et de la demande. Il serait difficile d'y parvenir sans augmenter la vitesse de transaction dans les cas d'applications générant d'immenses quantités de données. Le traitement des transactions blockchain assure la préservation du caractère immuable du réseau en copiant les données de chaque transaction sur tous les nœuds, mais est un processus qui prend du temps. En conséquence, ce traitement se heurte à plusieurs défis associés à la vitesse et à la mise à l'échelle (Brody, 2018). Le réseau Bitcoin, par exemple, ne peut pas traiter plus de sept transactions par seconde, en raison de la taille maximale que le protocole impose pour les blocs. Quant à la blockchain d'Ethereum, sa limite de calcul par bloc codée en dur lui permet actuellement de prendre en charge environ 15 transactions par seconde (Ge et al., 2017). La révolution que connaissent les mécanismes de consensus pourrait potentiellement améliorer l'extensibilité des transactions blockchain, de la même manière que pour la consommation d'énergie.

Interopérabilité

Plusieurs plateformes blockchain ont été mises au point, mais la question de leur interopérabilité est loin d'être résolue (UE, 2019), car elles suivent une grande diversité de choix technologiques, la technologie blockchain étant encore à un stade précoce de son

développement. Si elles ne fonctionnent pas en synergie, le potentiel de la blockchain ne pourra être pleinement exploité. Par exemple, le secteur de l'énergie et le secteur des transports sont étroitement liés. L'adoption accélérée de la mobilité électrique et la demande croissante des consommateurs en termes de transparence des transactions nécessitent de renforcer l'interopérabilité des systèmes d'infrastructure (Organisation de coopération et de développement économiques [OCDE], 2019). Il est indispensable d'assurer l'opérabilité intersectorielle des plateformes pour pouvoir appliquer les technologies numériques aux infrastructures durables.

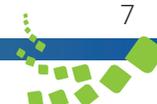
Réglementation

Le manque d'appui juridique et réglementaire a actuellement une incidence sur la trajectoire de développement de la technologie (Yeoh, 2017). Le passage à l'échelle commerciale des cas d'utilisation de la blockchain ne peut se faire sans répondre aux préoccupations d'ordre réglementaire relatives à différentes questions telles que la confidentialité, le transfert d'argent/de valeur, la lutte contre le blanchiment d'argent et la communication d'informations. Par exemple, le Règlement général sur la protection des données (RGPD) de l'UE impose des limites strictes pour ce qui est du stockage et de la sauvegarde des données personnelles. Le stockage immuable des données personnelles au sein des chaînes de blocs pourrait ainsi aller à l'encontre du « droit à l'oubli numérique » du RGPD (Miliard, 2018).

Cas d'utilisation limités dans le monde du Sud¹⁰

Si les spécialistes de l'environnement s'intéressent de plus en plus aux possibilités offertes par les technologies novatrices face aux défis environnementaux, le nombre de cas d'utilisation de la technologie blockchain dans le monde du Sud reste encore limité. De nombreuses entreprises et organisations à but non lucratif, et parfois même le secteur public, ont commencé à mettre à l'essai des applications blockchain pour remédier aux problèmes de durabilité rencontrés dans les pays développés. Afin d'accélérer l'adoption à grande échelle des technologies émergentes pour le bien de la société, il est essentiel d'examiner les questions soulevées par la blockchain en tenant compte des spécificités du monde du Sud. Les enseignements tirés des premiers cas peuvent aider à caractériser les défis à relever pour pouvoir utiliser cette technologie dans le monde du Sud. Par exemple, plusieurs initiatives ont été lancées au Ghana depuis 2014 en vue d'explorer les possibilités offertes par un système blockchain d'enregistrement des titres fonciers. Le

¹⁰ Le monde du Sud regroupe les petits États insulaires en développement (PEID), les pays les moins avancés (PMA), les pays en développement sans littoral (PDSL), et les pays émergents et en transition.



Gouvernement ghanéen a signé avec IBM un mémorandum d'accord visant à accélérer le développement de ce système cadastral. En Géorgie, pays en transition, plus de 1,5 million de titres fonciers ont été enregistrés, en 2018, sur un système blockchain (Eder, 2019). En comparant les situations de ces deux pays, Shang et Price (2019) ont fait ressortir que l'acquisition d'une compréhension approfondie de la technologie par les parties prenantes et les universitaires concernés joue un rôle essentiel dans le succès des projets publics fondés sur cette technologie. Il est également important de noter que l'augmentation du nombre de cas d'utilisation dans les pays du Sud implique de s'assurer que la blockchain s'appuie sur un volume suffisant de données et de transactions. La technologie blockchain, qui fournit des solutions de gestion des informations, des données et des valeurs, ne règle pas en elle-même les problèmes liés à la collecte des données (Schmidt et Sandner, 2017). Il est donc essentiel de garantir la mise à disposition de quantités suffisantes de données validées qui pourront être utilisées dans la blockchain, ce qui continue de soulever des difficultés dans le monde du Sud. Enfin, il existe également, au sein de la majorité des pays du Sud, une fracture numérique (Organisation des Nations Unies, 2017)¹¹, qui peut entraver l'innovation au service de l'évolution de leur économie numérique.

La levée des obstacles décrits ci-dessus pourrait s'avérer cruciale pour l'application à plus grande échelle de la technologie blockchain dans le domaine de la durabilité environnementale. Cette technologie est toujours en pleine évolution et il faudra un certain temps avant qu'elle atteigne sa pleine maturité. Selon le rapport de Gartner sur le cycle de la hype (Figure 5), après les attentes exagérées qu'elle a suscitées dans les années 2010, la blockchain a sombré dans « le gouffre de la désillusion » en raison du décalage persistant entre la réalité et le battage médiatique et du fait que la plupart des projets d'entreprises fondés sur cette technologie en sont encore au stade expérimental (Gartner, 2019). Mais l'analyse de Gartner suggère également que la technologie blockchain pourrait devenir pleinement extensible et opérationnelle sur le plan technique d'ici la fin des années 2020 grâce au nombre grandissant d'expérimentations et de projets innovants qui l'utilisent. De plus, pour maximiser les avantages offerts par la blockchain, il est nécessaire d'assurer le développement simultané d'autres technologies, notamment l'Internet des objets, l'intelligence artificielle et l'informatique quantique. Outre les avancées dans ces domaines, la mise en place d'une réglementation appropriée est également essentielle pour progresser sur la voie de la viabilité environnementale avec les autres technologies émergentes. Afin d'être en mesure d'exploiter pleinement le potentiel de ces

¹¹ Digital disparity between developed and developing countries based on education skills, internet connectivity, and language barriers.

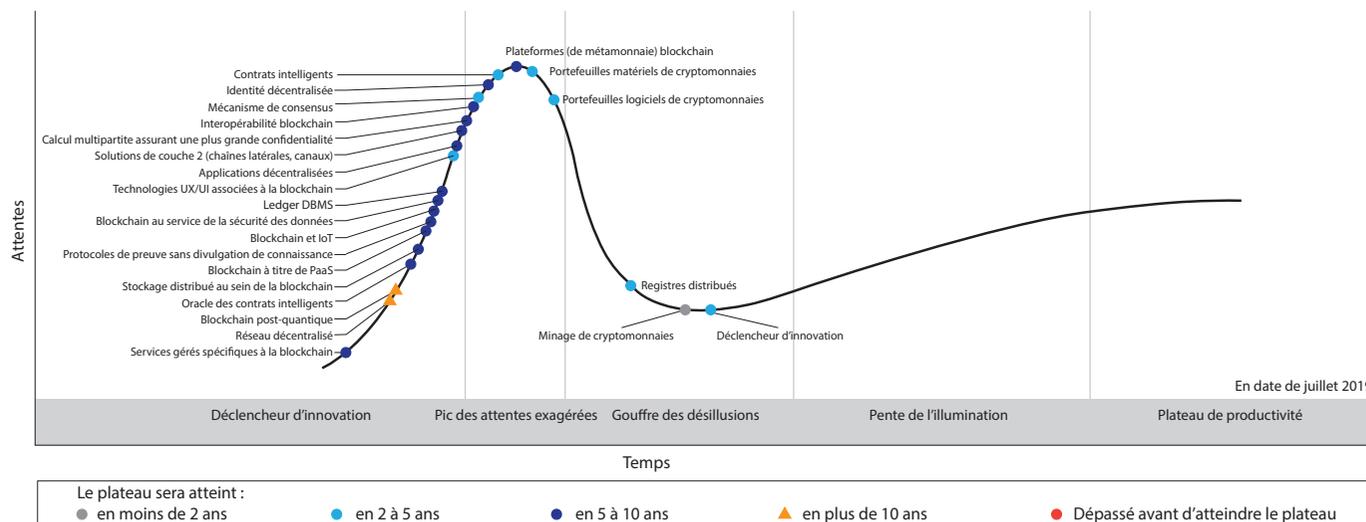


Figure 5 : Cycle de la hype propre à la technologie blockchain

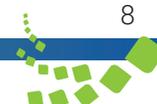
Source : par Gartner 2019

technologies, il est important que les décideurs prennent en compte les enseignements tirés des cas d'utilisation et des projets pilotes.

Implications sur le plan des politiques

Les défis dont s'accompagne la technologie blockchain occultent, pour le moment, ses possibilités révolutionnaires, qui ont fait naître des applications démontrant et explorant comment s'en servir pour améliorer les conditions environnementales et sociales sur notre planète. Cela dit, il est impératif d'évaluer les conséquences imprévues qu'elle peut entraîner, notamment au moyen de diverses techniques de prospective contribuant à renforcer les capacités d'anticipation pour être en mesure de comprendre et de relever les défis à venir. Le nombre insuffisant de spécialistes qui possèdent une bonne connaissance tant de cette technologie que des questions environnementales empêche par ailleurs les acteurs concernés de comprendre convenablement son potentiel en matière de durabilité environnementale. Même si elle en est encore à un stade précoce de son développement, il est important de reconnaître les possibilités qu'elle peut créer, s'agissant du bien de notre planète. Afin de relever les défis précités et de promouvoir son application à la réalisation des objectifs environnementaux que nous nous sommes fixés, il est proposé de lancer les initiatives suivantes :

- **Dialogues à l'échelle mondiale sur la technologie blockchain centrés autour de l'environnement naturel.** Les décideurs, les scientifiques et les concepteurs blockchain peuvent adopter une vision commune en tirant parti de l'acquisition d'une compréhension approfondie et pratique de la blockchain et de son utilisation en combinaison avec d'autres technologies émergentes. Cela contribuera à améliorer les activités de gestion de l'environnement dans des domaines tels que le suivi des chaînes d'approvisionnement, la distribution de l'énergie, la surveillance des émissions et les échanges de droits d'émission de carbone, ou à atteindre des cibles liées aux objectifs du Programme 2030 et à d'autres accords multilatéraux sur l'environnement. Par ces dialogues, les secteurs public et privé pourraient s'entraider en échangeant leurs vues sur les aspects tant positifs que négatifs de l'utilisation de la blockchain pour traiter des questions précises de gestion de la durabilité environnementale. Une telle démarche contribuerait à aider les pays à façonner un environnement porteur comprenant des lois, des règlements et des instruments de gouvernance en vue de la création d'applications significatives de la blockchain axées sur le milieu naturel. Il importe également de faire le point sur les résultats obtenus dans le cadre des applications lancées à titre pilote et de partager les retours d'expérience ;



- Mise en place de cadres juridiques et réglementaires cohérents.** L'absence de cadres juridiques, de normes et de règlements régissant la technologie blockchain fait qu'il est difficile d'étendre le déploiement des solutions qui y ont recours. Cette situation engendre une certaine confusion au sein de la communauté blockchain au sujet des moyens à mettre en œuvre pour garantir le respect des lois en vigueur concernant la sécurité et la confidentialité des données. Les décisionnaires doivent déterminer s'il convient de modifier ces lois pour faciliter l'utilisation des modèles décentralisés. De plus en plus de gouvernements procèdent à un examen des risques posés par la technologie blockchain et de son potentiel, et prévoient ensuite d'élaborer des lois et règlements y afférents. Le secteur privé a engagé des travaux sur l'application de la blockchain à l'appui de la durabilité environnementale. Pour appuyer l'évolution future des modèles d'activité axés sur la technologie blockchain, il est impératif d'évaluer et de formuler des politiques, règlements et lois d'application. Il est également important d'établir des liens plus étroits entre les décisionnaires et les experts de la blockchain intervenant sur des questions spécifiques afin de favoriser l'apprentissage mutuel. Dans cette perspective, les organisations internationales pourraient réunir les parties prenantes pour appuyer l'élaboration de cadres directifs en vue de faciliter la création d'un environnement propice à une innovation utilisant la technologie blockchain. Il est également important de favoriser la réalisation de travaux d'étude et de recherche sur la gouvernance de la blockchain et sur l'impact que cette technologie pourrait avoir sur la société et l'environnement ;

- Mise à l'essai de technologies innovantes dans des environnements contrôlés.** Les pays pourraient mettre en place des environnements contrôlés ou des dispositifs d'expérimentation réglementaire conçus pour permettre la mise à l'essai de la blockchain et d'autres technologies innovantes. Ces espaces peuvent contribuer au déploiement rapide et évolutif de nouvelles technologies. Une telle interface pilote peut également être mise à profit afin d'examiner si les résultats des travaux de recherche peuvent s'appliquer en milieux réels. Ces expérimentations pourraient par la suite servir à mieux faire comprendre aux parties prenantes les différentes chaînes de blocs. Les organismes de réglementation de plusieurs pays, tels que l'Australie et Singapour, donnent déjà l'impulsion nécessaire pour accélérer l'innovation dans le domaine de la blockchain en mettant en place des dispositifs d'expérimentation réglementaire conçus pour faciliter la mise à l'essai et le pilotage des projets connexes (Cognizant, 2017) ;
- Mise en place ou renforcement des centres, pôles et accélérateurs nationaux de l'innovation.** Cette initiative vise à multiplier le nombre de cas d'utilisation et à financer des activités destinées à mieux comprendre les caractéristiques et l'intérêt de la blockchain et d'autres technologies émergentes. Ces centres d'innovation pourraient permettre d'accroître et de renforcer les capacités des acteurs locaux à concevoir et exploiter des projets à l'échelle locale et à les intégrer dans les infrastructures blockchain existantes tout en assurant leur interopérabilité. Une telle évolution pourrait s'appuyer sur la

mise au point de prototypes locaux ou la transposition à plus grande échelle de solutions blockchain éprouvées et bénéfiques pour le milieu naturel ; l'étude et l'identification de blockchains et de mécanismes de consensus spécifiques pouvant offrir une extensibilité tout en garantissant une consommation d'énergie réduite ; et la facilitation de l'amélioration des politiques dans le cadre de processus participatifs associant les décisionnaires, le secteur privé et les communautés locales afin de permettre la concrétisation de réalisations équitables.

Conclusion

Le grand potentiel offert par les chaînes de blocs en ce qui concerne la tenue de registres, la transparence, le transfert de valeurs, les écosystèmes de jetons et la réduction des coûts montre que cette technologie peut contribuer à relever les défis environnementaux mondiaux et à traiter des questions telles que les changements climatiques, l'énergie, la préservation de la biodiversité, la sécurité de l'approvisionnement en eau, la durabilité des océans et la pollution de l'air. La technologie blockchain, qui n'en est encore qu'aux premiers stades de son développement, est mise en œuvre de concert par des entreprises, des start-ups et des organismes pour traiter diverses questions environnementales et sociales. Le déploiement à grande échelle de solutions blockchain respectueuses de l'environnement pourrait contribuer à relever certains des défis rencontrés. Quelques problèmes systémiques freinent toutefois son adoption ou son intégration. Par conséquent, des recherches techniques supplémentaires sont nécessaires pour étudier et lever les obstacles qui empêchent d'adopter et de déployer efficacement cette technologie. Les gains que peuvent apporter les moyens d'action innovants, la mise en place de cadres juridiques et réglementaires, et le partage des connaissances entre les décisionnaires, les scientifiques et les praticiens de la blockchain offrent des possibilités de faire face aux problèmes mondiaux liés à l'environnement.

Illustration des avantages de la technologie blockchain mettant en scène une agricultrice et son client

CONFIANCE



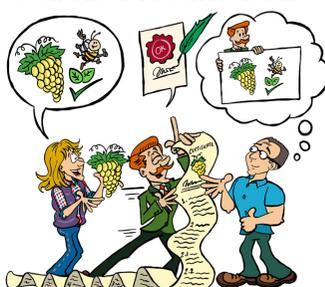
... le concept de confiance

ABSENCE DE CONFIANCE



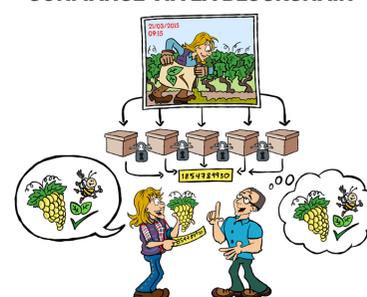
... le concept d'absence de confiance.

CONFIANCE VIA UN NOTAIRE



... le concept de confiance via un notaire.

CONFIANCE VIA LA BLOCKCHAIN



... comment la blockchain peut contribuer à instaurer la confiance

Remerciements

Auteurs

Auteurs principaux : Toyo Kawabata (PNUE), Minang Acharya (PNUE)

Coauteurs : Tsubasa Enomoto (PNUE), Sai Aashirvad Konda (Institut de hautes études internationales et du développement, Genève)

Réviseurs

Réviseurs internes : Benjamin Simmons (Plateforme de connaissances sur la croissance verte), Sandor Frigiyik, Angeline Djampou, Virginia Gitari, Samuel Opiyo (PNUE)

Réviseurs externes : Ana Cardoso (Partenariat PNUE-Université technique du Danemark) et Marco Christian Schletz (Partenariat PNUE-Université technique du Danemark)

Équipe Foresight Briefs du PNUE : Alexandre Caldas, Sandor Frigiyik, Audrey Ringler, Erick Litswa, Pascal Muchesia

Contact

unep-foresight@un.org

Avertissement

Les appellations employées dans la présente publication et les éléments qui y figurent n'impliquent de la part du PNUE ou des organismes de coopération aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones mentionnés, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

© Cartes, photos et illustrations comme spécifié.

Anna Kucherova/Shutterstock.com



Les notes prospectives du PNUE peuvent être consultées en ligne ou téléchargées à l'adresse

<https://wesr.unep.org/foresight>

Alerte précoce, questions émergentes et perspectives d'avenir

Références

- Andoni, M., Robu, V., Flynn, D., Abram, S., Geach, D., Jenkins, D. et al. (2019). Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 100. p. 143 à 174.
- Baraniuk, C. (2019). Bitcoin's energy consumption 'equals that of Switzerland'. *BBC News*, 3 juillet.
- Brody, P.R. (2018). How blockchains will industrialize a renewable grid. In *Transforming Climate Finance and Green Investment with Blockchains*. Marke, A. (dir. publ.). Elsevier, chapitre 6, p. 83 à 91.
- Busse, A., Eberhardt, J., Frost, S., Kim, D.-H., Weilbier, T., Renner, L. et al. (2019). A Response to the United Nations CITES blockchain challenge: Incremental and integrative PoA-based permit exchange. *Conférence internationale de l'IEEE sur la technologie de la chaîne de blocs et les cryptomonnaies (ICBC)*, tenue en 2019. IEEE, p. 320 à 328. https://depositonce.tu-berlin.de/bitstream/11303/9170/4/busse_eta_2019.pdf.
- Carson, B., Romanelli, G., Walsh, P. et Zhumaev, A. (2018). Blockchain beyond the hype: What is the strategic business value? *McKinsey Digital*, 19 juin. <https://www.mckinsey.com/business-functions/mckinsey-digital/our-insights/blockchain-beyond-the-hype-what-is-the-strategic-business-value>.
- Climate-KIC (2018). *Distributed Ledger Technology for Climate Action Assessment*. <https://www.climate-kic.org/wp-content/uploads/2018/11/DLT-for-Climate-Action-Assessment-Nov-2018.pdf>.
- Cognizant (2017). *The Future of Blockchain in Asia-Pacific*. Digital Systems & Technology. Chine. <https://www.cognizant.com/whitepapers/the-future-of-blockchain-in-asia-pacific-codex3240.pdf>.
- Dong, X., Mok, R.C.K., Tabassum, D., Guigon, P., Ferreira, E., Sinha, C.S. et al. (2018). *Blockchain and Emerging Digital Technologies for Enhancing post-2020 Climate Markets*. Washington, D.C. : Banque mondiale. <http://documents.worldbank.org/curated/en/942981521464296927/Blockchain-and-emerging-digital-technologies-for-enhancing-post-2020-climate-markets>.
- Eder, G. (2019). Digital transformation: Blockchain and land titles. *Forum mondial de l'OCDE 2019 sur l'intégrité et la lutte contre la corruption*. Paris, Centre de conférences de l'OCDE. https://www.oecd.org/corruption/integrity-forum/academic-papers/Georg%20Eder-%20Blockchain%20-%20Ghana_verified.pdf.
- Fonds mondial pour la nature (2018). How blockchain & a smartphone can stamp out illegal fishing and slavery in the tuna industry. <https://www.wwf.org.au/news/news/2018/how-blockchain-and-a-smartphone-can-stamp-out-illegal-fishing-and-slavery-in-the-tuna-industry#gs.aoz56y>.
- Franke, L.A., Schletz, M. et Salomo, S. (2020). Designing a Blockchain Model for the Paris Agreement's Carbon Market Mechanism. *Sustainability*, vol. 12, no 3, article 1068. <https://doi.org/10.3390/su12031068>.
- Gartner (2019). Hype cycle for blockchain business. <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2019-09-12-gartner-2019-hype-cycle-for-blockchain-business-shows>.
- Ge, L., Brewster, C., Spek, J., Smeenk, A., Top, J., van Diepen, F. et al. (2017). Blockchain for Agriculture and Food: Findings from the Pilot Study. *Wageningen: Wageningen Economic Research*. <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/426747>.
- Geiregat, S. (2018). Cryptocurrencies are (smart) contracts. *Computer law & security review*, vol. 34, no 5, p. 1 144 à 1 149. <https://doi.org/10.1016/j.clsr.2018.05.030>.
- Hedenborg, T. (2018). Transforming industry to meet the needs of a changing society. *Shaping Europe's digital future*, 2 février. <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/blogposts/transforming-industry-meet-needs-changing-society-1>

- HSBC et Sustainable Digital Finance Alliance (2019). *Blockchain: Gateway for Sustainability Linked Bonds – Widening Access to Finance* by Block. Amsterdam : Centre HSBC pour la finance durable. <https://www.sustainablefinance.hsbc.com/-/media/gbm/reports/sustainable-financing/blockchain-gateway-for-sustainability-linked-bonds.pdf>.
- Jensen, D. et Campbell, J. (2019). The case for a digital ecosystem for the environment: Bringing together data, algorithms and insights for sustainable development. *Quatrième session de l'Assemblée des Nations Unies pour l'environnement du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE)*. Nairobi (Kenya). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10387.73764>
- Le Sève, M.D., Mason, N. et Nassiry, D. (2018). *Delivering Blockchain's Potential for Environmental Sustainability*. Londres : ODI. <https://cdn.odi.org/media/documents/12439.pdf>.
- Meunier, S. (2018). *Blockchain 101: What is blockchain and how does this revolutionary technology work?* *Transforming Climate Finance and Green Investment with Blockchains*. Marke, A. (dir. publ.). Elsevier, chapitre 3, p. 23 à 34. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814447-3.00003-3>.
- Miliard, M. (2018). As blockchain proves its worth for healthcare, regulatory questions remain. *Healthcare IT News*, 11 décembre. <https://www.healthcareitnews.com/news/blockchain-proves-its-worth-healthcare-regulatory-questions-remain>.
- Organisation de coopération et de développement économiques (2019). *Blockchain technologies as a digital enabler for sustainable infrastructure*. *OECD Environment Policy Papers*, no 16. <https://doi.org/10.1787/0ec26947-en>.
- Organisation des Nations Unies (2017). *United Nations E-Government Survey 2016: E-Government in Support of Sustainable Development*. New York. <https://doi.org/10.18356/d719b252-en>.
- Power Ledger (2018). *Project update: Fremantle Smart City Development*, 15 février. <https://medium.com/power-ledger/project-update-fremantle-smart-city-development-b16ccce2eb8f>.
- Schletz, M., Nassiry, D. et Lee, M.-K. (2020). *Blockchain and Tokenized Securities: The Potential for Green Finance*. Institut de la Banque asiatique de développement. <http://hdl.handle.net/11540/11466>.
- Schmidt, K. et Sandner, P. (2017). *Solving Challenges in Developing Countries with Blockchain Technology*. Frankfurt School Blockchain Center. http://explore-ip.com/2017_Solving-Challenges-in-Developing-Countries-with-Blockchain-Technology.pdf.
- Shang, Q. et Price, A. (2019). A Blockchain-based land titling project in the Republic of Georgia: Rebuilding public trust and lessons for future pilot projects. *Innovations: Technology, Governance, Globalization*, vol. 12, nos 3 et 4, p. 72 à 78. https://doi.org/10.1162/inov_a_00276.
- Szabo, N. (1997). Formalizing and securing relationships on public networks. *First Monday*, vol. 2, no 9. <https://doi.org/10.5210/fm.v2i9.548>.
- Tapscott, D. et Tapscott, A. (2016). *The impact of the blockchain goes beyond financial services*. *Harvard Business Review*, vol. 10, no 7.
- Union européenne (2019). *Scalability, Interoperability and Sustainability of Blockchains*. https://www.eublockchainforum.eu/sites/default/files/reports/report_scalability_06_03_2019.pdf.
- Yeoh, P. (2017). *Regulatory issues in blockchain technology*. *Journal of Financial Regulation and Compliance* vol. 25, no 2, p. 196 à 208. <https://doi.org/10.1108/JFRC-08-2016-0068>.

