



Rédigé le 11 février 2020



15 minutes de lecture

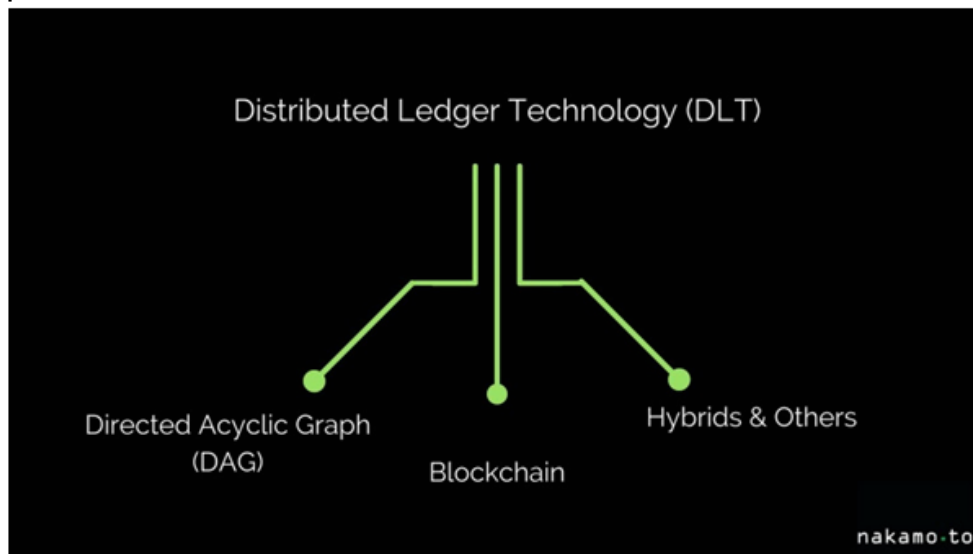


Regards économiques

Enjeux et prospective

Voilà déjà plusieurs années que l'actualité traite de Bitcoin, d'Ethereum, de blockchain et de cryptomonnaies. Les monnaies numériques et plus généralement les blockchains sont des outils innovants de l'ère du numérique. Blockchain est potentiellement un nouvel outil précieux pour de nombreux secteurs, dont celui de l'énergie. Mais qu'est-ce donc au juste que la technologie des blockchains ? Quelle distinction peut-on faire parmi ses différentes utilisations ? En quoi la technologie blockchain peut-elle accélérer la transition énergétique ? En définitive, est-il envisageable d'assurer un avenir durable et écologique à l'aide de cette technologie émergente ?

L'essor des **cryptomonnaies** telles que **Bitcoin** et **Ethereum** a attiré l'attention sur la technologie des **blockchains**, qui fait partie des **technologies de registres distribués (DLT)**. Il est important de bien faire la différence entre les cryptomonnaies et les blockchains pour éviter toute confusion. Bitcoin est une cryptomonnaie qui fait appel aux blockchains comme technologie de base. Il existe actuellement 4 894 cryptomonnaies¹ qui ont pour base les blockchains ou des technologies DLT. Les technologies qui stockent, distribuent et facilitent les échanges de valeur entre utilisateurs sont appelées DLT. Un registre distribué est une base de données décentralisée, distribuée sur de multiples nœuds². Les nœuds tiennent à jour le registre dans lequel les transactions sont mémorisées. Il ne s'agit pas d'une autorité centralisée car chacun des nœuds a un statut équivalent, ce qui rend la technologie transparente. Une transaction est vérifiée par le nœud d'après l'algorithme de consensus ou le mécanisme de vote. Les nœuds qui résolvent l'algorithme peuvent participer et approuver des transactions. Cette technologie est non falsifiable car elle ne met en oeuvre aucune autorité centrale.



Source: Nakamoto.to

Figure 1 : Technologie des registres distribués

Blockchain est la première DLT entièrement fonctionnelle. Aucun bloc d'une blockchain ne peut être modifié ou supprimé dès lors qu'il a été vérifié par un nœud. Il existe un grand nombre de blockchains différentes. Par exemple, une blockchain Bitcoin est différente d'une blockchain Ethereum mais ces deux blockchains sous-jacentes ou leurs versions sont utilisées pour d'autres projets et non pas seulement pour leurs propres cryptomonnaies natives. Et il en existe encore bien d'autres. Des blockchains différentes peuvent avoir des protocoles et des algorithmes de consensus distincts pour vérifier les transactions. **Proof of Stake** (PoS) et **Proof of Work**³ (PoW) sont les deux protocoles de consensus les plus courants à ce jour. Il en existe d'autres en préparation. Blockchain est un registre distribué qui s'est imposé en tant que technologie de base des cryptomonnaies (Bitcoin, Ethereum, **Ripple**, etc.). Bien que son architecture soit différente de celle des autres DLT, le principe sous-jacent reste le même. Les technologies émergentes telles que Blockchain ont un rôle essentiel à jouer dans la transition énergétique en vue de l'objectif climatique de 1,5 °C fixé à la Conférence de Paris. Elles sont en effet capables de constituer un pont technologique vers la transition énergétique du XXI^e siècle. Pour échapper au risque climatique, les émissions nettes de carbone de notre planète doivent être nulles d'ici à 2050, ce qui limitera le réchauffement de la planète à 1,5 °C. Ce besoin a accéléré la transition énergétique vers la décarbonisation, la numérisation et la décentralisation. En 2018, 171 GW de capacité d'énergie renouvelable sont venus s'ajouter au réseau mondial⁴. Les **sources d'énergie renouvelables (SER)** sont intermittentes (à l'exception de l'électricité d'origine hydraulique) et difficiles à prévoir car elles dépendent des conditions météorologiques qui rendent la gestion et l'exploitation des systèmes et des réseaux électriques compliquées. Cela a un effet sur le réseau électrique et les marchés sous-jacents. En outre, la structure actuelle des marchés de l'énergie et de l'électricité exclut pratiquement toute participation aux marchés de la part des petits acteurs et les incitations à la participation active des consommateurs sont insuffisantes ⁽¹⁾.

Par conséquent, la flexibilité, l'ouverture et les incitations structurées sont essentielles pour améliorer, protéger, sécuriser et stabiliser le fonctionnement du réseau électrique et des marchés de l'électricité. L'intégration des services de réponse à l'offre et à la demande et le stockage de l'énergie sont des exemples de mesures destinées à garantir la flexibilité. Les systèmes énergétiques actuels se transforment rapidement avec l'expansion des systèmes énergétiques distribués (SED) dans lesquels

la production d'énergie n'est plus centralisée mais provient de multiples nœuds sur le réseau, avec la contribution des consommateurs qui produisent de l'énergie (« **prosommateurs** »). Les SED, qui comprennent les sources renouvelables locales et le stockage de l'énergie, progressent rapidement grâce aux innovations techniques. L'avenir des SED exige un échange entre les dispositifs intelligents en pleine expansion⁵ communiquant en temps réel et les prosommateurs (qui sont à la fois producteurs et consommateurs). Cela est contraire à la structure traditionnelle du marché qui est centralisée et, par conséquent, l'expansion des SED ne peut être gérée au moyen des technologies et des infrastructures existantes. Il est clair que la croissance future reposera sur les technologies de l'information et de la communication (TIC) pour permettre une énergie plus durable et mieux répartie(2). L'intégration des TIC aux réseaux d'énergie a permis d'améliorer l'efficacité et la coordination des ressources pour les « flux physiques et financiers dans les réseaux électriques intelligents ». Le réseau électrique intelligent de la prochaine génération est appelé « **Internet de l'énergie** ». Cet Internet de l'énergie est un réseau de dispositifs intelligents connectés, de flux d'informations et de flux physiques, de big data, d'informatique sur le cloud et d'intelligence artificielle qui facilite l'interconnexion et le couplage énergétique à partir de sources multiples. La technologie des blockchains facilite cette transition en direction de l'Internet de l'énergie, car il s'agit d'une technologie irréversible⁶, incorruptible et décentralisée. Par conséquent, les blockchains permettent de créer des marchés de prosommateurs sûrs, transparents et répartis, ainsi que des marchés traditionnels d'énergies renouvelables. Cette technologie peut soutenir les microréseaux émergents dont les acteurs sont des prosommateurs et résoudre également les problèmes liés au consensus, à la sécurité et à la flexibilité de l'Internet de l'énergie(3). Compte tenu des perspectives prometteuses de cette technologie, un certain nombre de cas d'utilisation sont apparus qui visent à déstabiliser le secteur de l'énergie. D'après une étude interne d'IFPEN⁷, 285 projets ont été identifiés, dont 215 sont liés à l'énergie et 70 à l'environnement. Parmi les projets liés à l'énergie, 50 % concernent les énergies renouvelables et le commerce de l'énergie. De nombreuses compagnies d'électricité, en particulier parmi les services publics, se sont intéressées à explorer les avantages potentiels des technologies des registres distribués (DLT), en tant que technologie préparant la transition à faible empreinte carbone et le développement durable. Dans ce rapport, nous explorons les principaux cas d'utilisation dans le secteur de l'énergie qui sont susceptibles de changer et de redéfinir radicalement les marchés de l'énergie de demain.

BLOCKCHAIN, ÉNERGIE ET INVESTISSEMENTS

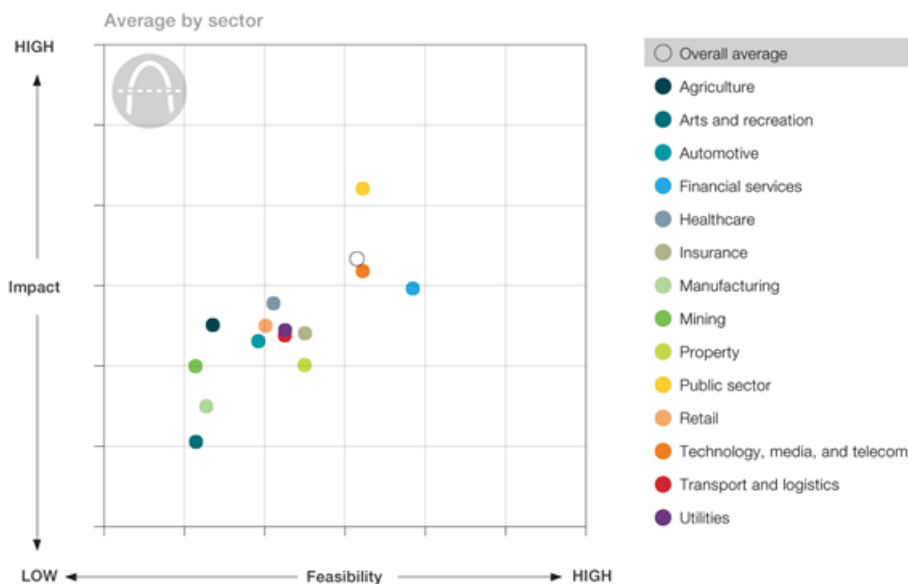
Des progrès significatifs ont été accomplis au cours des deux dernières années en ce qui concerne les cas d'utilisation des blockchains dans le secteur de l'énergie.



Source: World Energy Council

Figure 2 : Les différentes phases de développement de la technologie des blockchains

L'application de la blockchain à ce secteur est actuellement à l'étude et des avancées sont faites lentement en direction d'une phase de croissance (fig. 1). Le marché actuel est rempli d'un certain nombre de cas d'utilisation, de projets pilotes et de start-up qui ont commencé à étudier la possibilité d'intégrer la technologie des blockchains au marché de l'énergie existant dans le but d'en améliorer l'efficacité et de réduire les coûts. Pourtant, le succès commercial dans le domaine des blockchains appliquées à l'énergie reste encore à démontrer.



Source: Mckinsey

Figure 3 : Opportunités de blockchains par secteur industriel

Une analyse approfondie par Mckinsey (fig. 3) des cas d'utilisation de blockchains dans divers secteurs a montré que certains domaines comme le secteur public, les services financiers, les hautes technologies, les médias et les télécommunications présentent une plus grande faisabilité et sont plus prometteurs que les autres. Dans le secteur des services publics, le cas d'utilisation des certificats d'énergie renouvelable s'est avéré un secteur prometteur présentant un degré de faisabilité élevé⁸.

Le marché mondial des blockchains et des technologies associées est estimé entre 5,4 G\$ (étude de marché Allied) et 28,4 G\$ (IHS Markit). Il faut s'attendre à une croissance annuelle du marché de 50 à 75 %. Cela reflète la rapidité de la transformation numérique que certains secteurs, dont l'énergie, connaîtront au cours de la prochaine décennie grâce aux blockchains.

Le secteur totalise près de 23,7 G\$ depuis 2013 auprès de 3 738 entreprises dans le monde. 75 % de ces investissements se trouvant à un stade précoce, c'est-à-dire en phase de pré-amorçage, d'amorçage ou de levées de fonds auprès de *business angels*⁹. En plus de ce financement, les **Initial coin offerings (ICO)** et les **Initial exchange offerings (IEO)** plus récentes, qui sont des méthodes uniques de financements collectifs, s'adressent aux investisseurs (principalement de petits investisseurs) qui sont prêts à acheter des jetons numériques en échange d'un investissement. Ces modèles de levée de fonds permettent aux start-up du domaine des blockchains d'ignorer tout engagement de capitaux, car les investisseurs achètent des jetons numériques qui ont été émis ou des cryptomonnaies inhérentes à la principale technologie à la base du produit de l'entreprise.

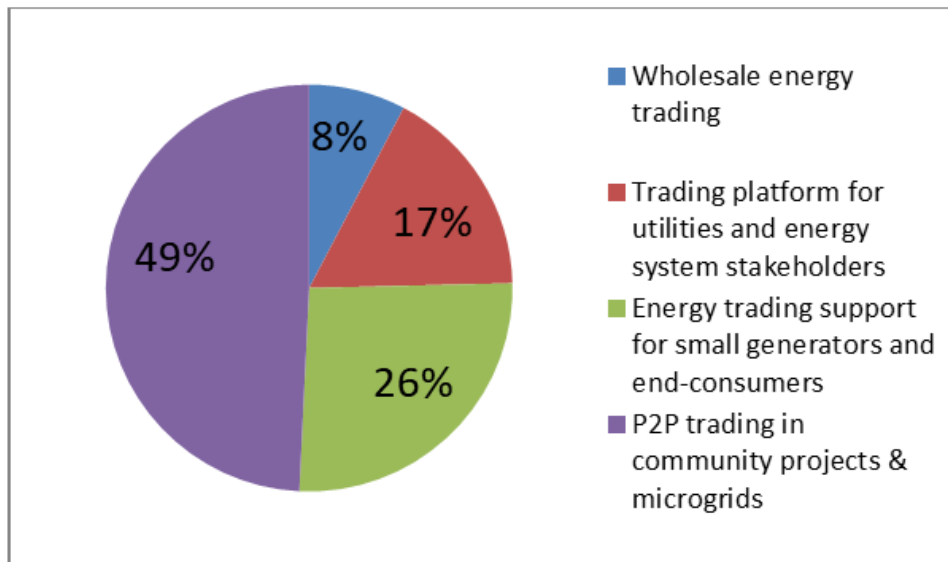
APPLICATIONS DE BLOCKCHAIN AU SECTEUR DE L'ÉNERGIE

Commerce/Énergie transactive

Selon le National Institute of Standards and Technology du ministère américain du Commerce, l'énergie transactive est un « système de mécanismes économiques et de contrôle qui permet l'équilibre dynamique de l'offre et de la demande sur l'ensemble de l'infrastructure électrique en utilisant la valeur comme principal paramètre opérationnel ».

Le lien des blockchains avec l'énergie transactive provient de leur concept d'**échange de valeur entre pairs (P2P)**. De la même manière que les transactions financières peuvent être validées par une méthode P2P, les transactions énergétiques peuvent être décentralisées par une méthode P2P qui évolue essentiellement vers un transfert d'énergie P2P. L'idée que la production et la consommation d'électricité puissent être entièrement décentralisées par le biais d'une blockchain est un véritable bouleversement par rapport à l'échange et à la commercialisation d'énergie centralisés classiques.

Compte tenu des avantages prometteurs qu'offrent les blockchains à l'énergie transactive, de nombreux partenariats se sont constitués pour y travailler et de nombreux projets ont déjà été planifiés, testés ou mis en œuvre. Au total, 65 projets ont été identifiés et classés en commerce de gros, plateformes commerciales pour les services publics et jetons d'énergie, Soutien au commerce de l'énergie pour les petits producteurs et les consommateurs finaux et commerce P2P dans les projets collectifs et les micro-réseaux (fig. 3). Près de la moitié du total des projets sont axés sur le commerce de gros de l'énergie. Géographiquement, 60 % des projets sont concentrés en Europe, suivis de 14 % en Amérique du Nord et autant en Asie¹⁰.



Source: IFPEN¹¹

Figure 4: Différentes applications dans le domaine du commerce de l'énergie

En Allemagne, Enerchain est un projet qui vise à développer le commerce de gros en déployant une infrastructure technique permettant aux acteurs des marchés de gros de l'énergie de négocier l'électricité et le gaz de façon décentralisée, évitant ainsi les intermédiaires et les plateformes de marché centralisées. La validation du concept a démarré en mai 2017, avec 44 entreprises européennes de premier plan dans le domaine du commerce de l'énergie. Les participants ont déjà pris part à des échanges réels, qui se sont concrétisés publiquement pendant la phase de projet en cours. La **plateforme Enerchain 1.0** a été lancée le 20 mai 2019. Il s'agit de la première plateforme de négociation distribuée basée sur des blockchains, qui permet de négocier en gré à gré des contrats au comptant et à terme sur les marchés de l'électricité et du gaz.

Le projet promet des coûts opérationnels plus faibles¹² car il s'agit d'un système décentralisé dans lequel les rôles tels que la gestion, le contrôle du marché, la supervision du marché, les aspects juridiques, la réglementation, la conformité, l'assistance, l'informatique, le marketing et les ventes ne s'appliquent pas du tout ou sont très limités. En outre, le cadre sous-jacent de la plateforme Enerchain offre un environnement de blockchains rapide qui complète les processus d'échange nécessitant une synchronisation rapide des données entre les participants. Compte tenu de sa capacité d'échange au sein des communautés énergétiques (P2P), de la flexibilité entre les réseaux de distribution et de la livraison en gros au niveau des zones d'équilibrage, elle pourrait devenir une infrastructure commerciale de premier plan pour les marchés émergents¹³.

En France, **Sunchain**, start-up de blockchains soutenue par Enedis, offre la possibilité aux propriétaires de centrales photovoltaïques (PV) d'une même région de faire des échanges commerciaux entre eux. Elle utilise des dispositifs de type blockchain et **Internet des objets (IdO)** pour gérer les échanges d'énergie au sein des communautés énergétiques locales, en mettant en relation les producteurs, les consommateurs et les prosommateurs (commerce P2P). Des compteurs intelligents reposant sur l'IdO recueillent et enregistrent les données de production et de consommation sur la blockchain Sunchain où elles sont cryptées, signées et enregistrées¹⁴.

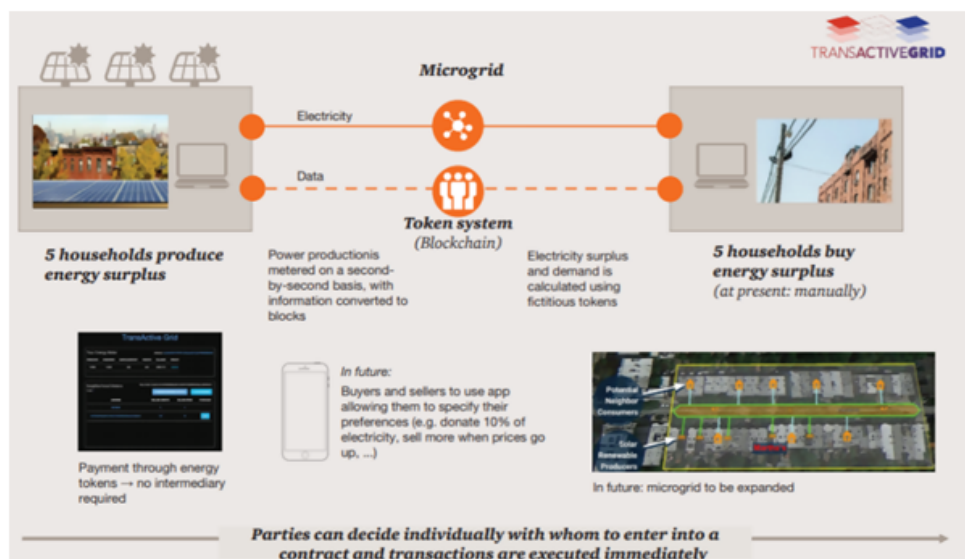
Aux Pays-Bas, **PowerToShare** et **Powerpeers** sont des sociétés similaires qui fournissent des

plateformes pour l'échange et le commerce de l'électricité en mode P2P.

WePower, start-up basée en Estonie, assure un « soutien au commerce de l'énergie à l'intention des producteurs et des consommateurs ». Il s'agit d'une plateforme d'achat et d'échange d'énergie verte à base de blockchains, qui rassemble les producteurs d'énergie renouvelable et les investisseurs intéressés à apporter leur soutien aux projets mondiaux d'énergie verte. L'énergie renouvelable produite est transformée en jetons, puis échangée par le biais de la plateforme. Elle peut s'échanger contre des monnaies fiduciaires ou des cryptomonnaies. Au 4^e trimestre 2018, WePower a transformé une année de données du réseau estonien (26 000 heures et 24 térawatts-heures de données agrégées de production et de consommation vers la blockchain) en 39 milliards de jetons d'énergie intelligente. Le projet pilote est, paraît-il, le plus important de ce type au monde. Chaque jeton est essentiellement un contrat numérique autonome d'achat d'électricité représentant un kWh. Les jetons sont négociables et peuvent être vendus sur le marché local de gros de l'énergie en reliant les contrats numériques aux données du réseau d'électricité sur la blockchain.

Power Ledger est une start-up de blockchains australienne qui s'est associée à des sociétés d'énergie renouvelable telles que Nest Energy et Origin Energy, ainsi qu'au projet Brainstorm pour mettre le P2P trading à la disposition des résidents australiens. Elle fournit aux entreprises de services publics et aux différentes parties prenantes une plateforme d'échange de crédits carbone et d'énergie renouvelable, servant également à la déclaration et à la vérification des crédits carbone et d'énergie renouvelable. Cette société a conclu des accords commerciaux ou d'essai en Australie, aux États-Unis, au Japon, en Malaisie, en Thaïlande, en Autriche et en Inde pour l'utilisation de ses logiciels¹⁵.

Aux États-Unis, LO3 Energy a déjà réalisé le célèbre **projet pilote Brooklyn Microgrid** en collaboration avec Siemens. Dans le cadre de ce projet, un ensemble de participants de Brooklyn peut utiliser directement la plateforme P2P de LO3 pour échanger de l'électricité. La plateforme permet aux prosummateurs de vendre directement le surplus d'électricité solaire à leurs voisins et de contribuer à l'économie locale.



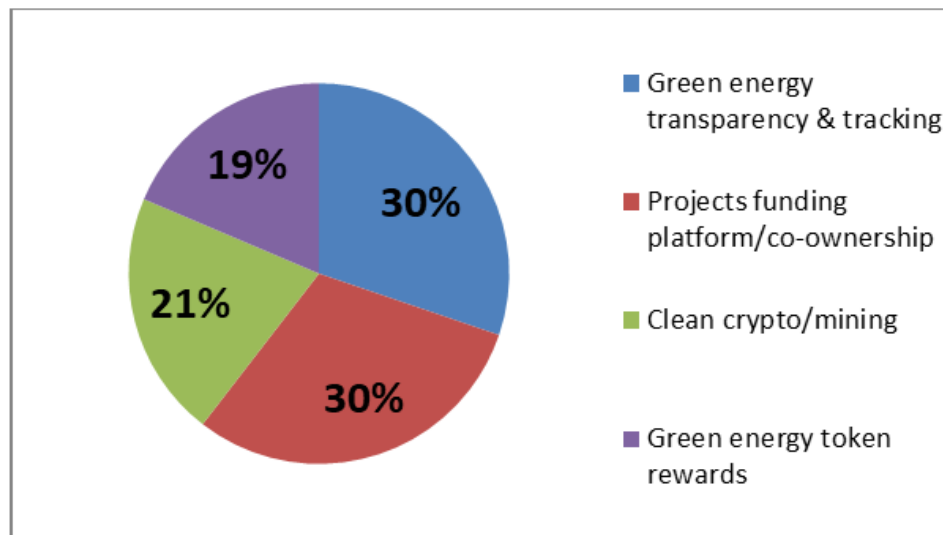
Source: PWC

Figure 5: Le projet Brooklyn Microgrid

Le projet (fig. 4) vise à créer un marché communautaire local pour l'énergie renouvelable afin de tester la préférence des consommateurs lorsqu'ils ont la possibilité d'échanger localement leur électricité excédentaire. Les prosommateurs ont la possibilité de commercialiser leur produit en plus de réinjecter l'électricité excédentaire dans le réseau.

Énergie renouvelable

Au total, 43 projets ont été identifiés dans notre base de données pour le domaine de l'énergie verte/renouvelable (fig. 5) avec des applications allant de la transparence et du suivi de l'énergie verte au financement de projets, en passant par le **cryptominage clean** et les récompenses sous forme de jetons d'énergie verte. Géographiquement, 47 % des projets sont concentrés en Europe, suivis de 30 % environ en Amérique du Nord¹⁶.



Source: IFPEN¹⁷

Figure 6: Différentes applications dans le domaine des énergies renouvelables

En plus des projets individuels, les entreprises s'associent pour créer de nouveaux groupements afin d'explorer le rôle des blockchains dans le domaine énergétique. Par exemple, l'Energy Web Foundation (EWF) est une organisation mondiale à but non lucratif qui se concentre sur le déploiement de la technologie des blockchains dans le secteur de l'énergie. Elle travaille avec trois technologies : EW Origin, EW Link et le Web de l'énergie.

EW Origin vise à développer les marchés des énergies renouvelables et à accroître l'efficacité du commerce du carbone grâce à des **SDK (kits de développement logiciel)** qui simplifient et améliorent la délivrance, le suivi de la propriété et l'achat/la vente de certificats d'énergie renouvelable (CER), de garanties d'origine (GO) et de produits à attributs verts associés. EW Origin enregistre la provenance et suit automatiquement la propriété de l'électricité produite à partir de sources renouvelables avec une transparence, une intégrité et des détails sans précédent, notamment en ce qui concerne le lieu, l'heure, le type de source et les émissions de CO₂. Des essais pilotes en situation réelle permettront de s'assurer que la pile technologique développée répond aux besoins du marché et de la réglementation dans le monde entier.

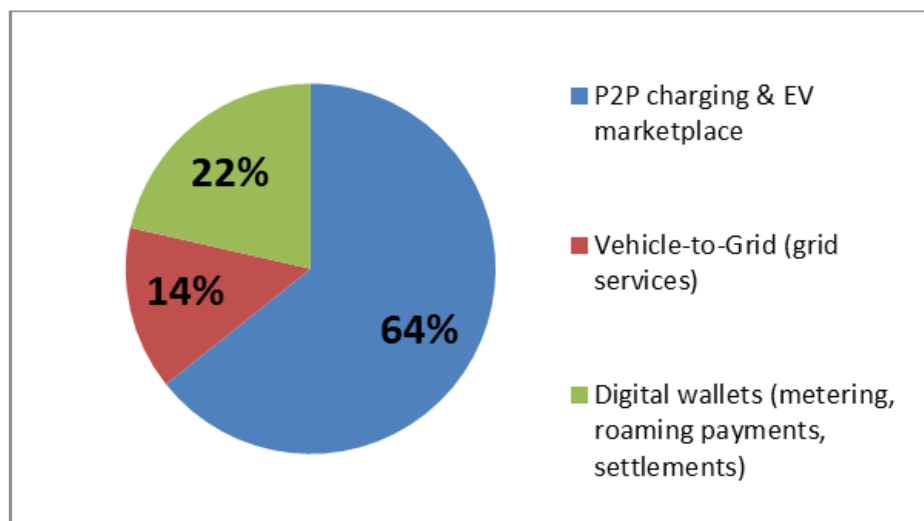
Le **Web de l'énergie** (développé par la communauté EWF) est une plateforme open source évolutive de blockchains, conçue spécifiquement pour les besoins réglementaires, opérationnels et commerciaux du secteur de l'énergie. La plateforme *open source* sert d'hôte pour des applications décentralisées compatibles avec des modèles commerciaux distribués et axés sur les énergies renouvelables. Elle répond au besoin d'une infrastructure numérique, fondamentale et partagée, pour la communauté de l'énergie et des blockchains, afin de construire et de gérer leurs solutions. Les applications iront de l'amélioration de l'accès au réseau et de sa gestion au traitement efficace des certificats d'origine pour l'énergie renouvelable. Cette plateforme sera basée sur le mécanisme de consensus des blockchains *Proof of Authority* (à preuve d'autorité) (PoA)¹⁸. Les « autorités » seront dans ce cas les entreprises qui ont conclu un partenariat avec l'EWF, en tant qu'affiliées à l'EWF. Le système de validation prévu par ce mécanisme permet de relever les défis techniques et réglementaires liés à la mise en œuvre des blockchains dans le secteur de l'énergie.

À terme, le nombre « d'autorités » devrait dépasser le millier et l'EWF mettra en place un système de gouvernance pour décourager les comportements malveillants dans une mesure qui pourrait conduire au retrait d'une autorisation.

Swytch, fondation à but non lucratif basée à Zoug, en Suisse, donne aux organisations « une vue complète et précise de leur production d'énergie, de leur utilisation de l'énergie et des informations associées sur la compensation carbone ». La plateforme Swytch permet des incitations à base de jetons ainsi que l'agrégation de données *open source*. Elle dispose de protocoles de blockchains uniques pour sécuriser et vérifier les données de production d'énergie. Cette plateforme décentralisée certifie et récompense les efforts de durabilité au moyen de jetons Swytch, efforts qui sont attestés par les données des compteurs intelligents, les dispositifs IdO, les VE (véhicules électriques) et les systèmes de stockage servant à réduire les émissions de CO₂. Les jetons Swytch seront créés dans un environnement de blockchains autorisé à haut rendement énergétique qui évite les mécanismes de *Proof of Work* (preuve de fonctionnement) (1) ¹⁹.

E-mobilité

Il existe 14 projets liés à l'e-mobilité qui ont été identifiés et classés en marché P2P de la recharge et des VE, **Vehicle to Grid** et portemonnaies numériques (comptage, paiements en itinérance, accords). Près de 65 % des projets sont liés au marché P2P de la recharge et des VE, 70 % des projets étant concentrés en Europe²⁰.

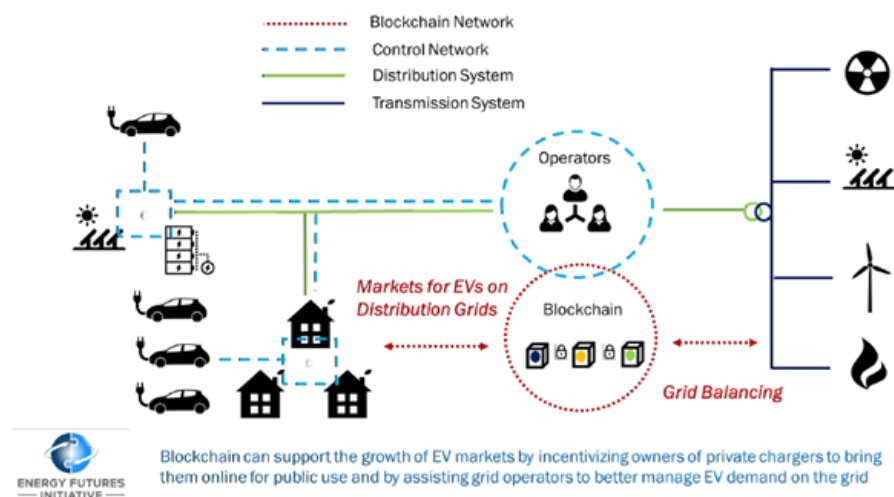


Source: IFPEN²¹

Figure 7: Différentes applications dans le domaine de l'e-mobilité

En Allemagne, la société de services publics RWE et la start-up à base d'Ethereum Slock collaborent dans le cadre d'un projet d'innovation en matière d'infrastructure de recharge. Ce projet, dénommé **Share&Charge**, permet aux particuliers de louer des stations de recharge dont ils sont propriétaires en mode P2P (fig. 7). Cela peut se traduire par une plus grande disponibilité de l'infrastructure de recharge des VE dans un voisinage immédiat et ouvrir l'accès à une solution de paiement économique et fiable. L'application Share&Charge, basée sur la blockchain Ethereum, peut se télécharger sur un smartphone. Toutes les transactions peuvent être suivies par n'importe quel membre du réseau. La plateforme permet d'avoir une facturation automatisée et peut encourager la construction privée d'une infrastructure de recharge des VE car les stations de recharge génèrent un flux de revenus pour les propriétaires en permettant aux autres conducteurs de recharger les VE à leurs points de rechargement. RWE a déjà lancé 1 200 stations qui sont connectées par l'intermédiaire de cette application. Le propriétaire d'une station de recharge peut fixer le prix en optant pour des tarifs forfaitaires, à des taux établis en fonction du temps ou indexés sur le prix de l'électricité. Share&Charge gère et enregistre tous les paiements et les données de chargement, et relie les clients au réseau de stations de recharge. La compagnie prévoit également de faciliter la fluidité des paiements en intégrant son **stable coin**²² en tant que part de la solution de paiement.

Multiple Opportunities Exist for Blockchain to Support EV Charging Networks



Source: *Energy Futures Initiative*

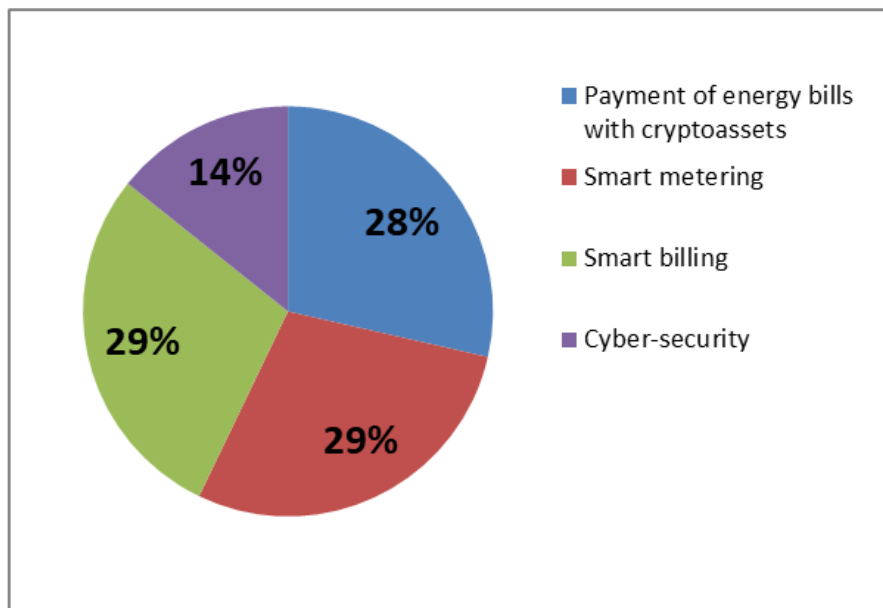
Figure 8: Opportunités de blockchains pour le réseau de recharge des VE

En résumé, les blockchains peuvent inciter les particuliers à intégrer des chargeurs privés au sein du réseau en vue d'un usage public et aider les opérateurs à mieux gérer la demande. Malgré les progrès récents, il reste des défis à relever pour un déploiement généralisé de l'application de la « blockchain » aux infrastructures des VE. Les défis à relever vont du consommateur au ménage en passant par le niveau local auquel le fait de proposer des stations de recharge privées pour un usage public risque d'entraîner des problèmes de confidentialité et de découpage de zones, créant ainsi un obstacle à l'entrée. En outre, des problèmes logistiques se posent si un chargeur privé provoque des encombrements près de son domicile, de son bureau, de la rue qui le dessert ou de l'emplacement de son parking.

Compteurs intelligents

Au total, ce sont 21 projets qui ont été identifiés dans le cadre des solutions de **comptage intelligent** (fig. 8) avec des applications allant du comptage intelligent à la facturation intelligente, en passant par la **cybersécurité** et le paiement des factures par cryptomonnaie. Géographiquement, 70 % des projets sont concentrés en Europe, suivis de 12 % environ en Amérique du Nord²³.

Le projet **E-Prosume** est un partenariat entre Evolvere (agrégateur italien) et Prosume. En août 2018, Mangrovia Blockchain Solutions (entreprise de logiciels spécialisée dans la technologie de la cryptographie appliquée) a rejoint le projet, qui a pour but de fournir aux prosommateurs de nouveaux services rendus possibles par la plateforme, tels que la facturation et les paiements intelligents.



Source: IFPEN²⁴

Figure 9: Différentes applications dans le domaine du comptage intelligent

En France, Engie développe une autre solution de comptage intelligent en partenariat avec Ledger, une start-up française spécialisée dans le matériel blockchain. Ensemble, ils prévoient de développer un « **oracle** » (dispositif matériel qui sera compatible avec la plupart des blockchains) autonome et indépendant des blockchains. Cet « oracle » matériel mesurera les données à la source de la production d'énergie verte (comme les éoliennes, les panneaux solaires ou l'hydroélectricité) et les enregistrera en toute sécurité sur la blockchain pour les utiliser dans des applications décentralisées. En avril 2019, Engie a testé des prototypes sur certaines de ses infrastructures renouvelables et prévoit d'installer 100 000 boîtiers sur des fermes éoliennes, solaires et hydroélectriques d'ici 2023.

Le matériel est compatible avec la blockchain d'Ethereum et avec la blockchain de l'Energy Web Foundation. À terme, la solution deviendra entièrement indépendante de la plateforme afin de pouvoir être utilisée avec n'importe quelle blockchain. Le dispositif permettra de relier différentes blockchains et plusieurs applications décentralisées en même temps. La sécurité étant essentielle pour disposer de données fiables, le dispositif comprendra un élément de sécurité et une solution anti-falsification²⁵.

DÉFIS, OPPORTUNITÉS ET AVENIR DES APPLICATIONS BLOCKCHAIN

Les limites de la technologie des blockchains dans le domaine de l'énergie concernent la technologie, l'économie, l'environnement et l'adaptation publique.

Technologie et économie

Les premiers adeptes de la technologie des blockchains sont confrontés au défi de choisir le bon mécanisme de consensus et la bonne architecture de système. L'évolution future de ces technologies n'est pas encore claire et souvent, pendant la phase de test d'une blockchain, les développeurs peuvent être confrontés à des problèmes critiques qui peuvent entraîner un changement de ses mécanismes sous-jacents réalisé au moyen d'un hardfork pour s'adapter à une nouvelle version du réseau²⁶.

Les systèmes actuels d'échange d'électricité peuvent enregistrer des transactions énergétiques dans des bases de données conventionnelles, mais ils ne peuvent offrir l'immutabilité des enregistrements ni la transparence (1). En outre, les réseaux de distribution existants ne facilitent que la vente, à un tarif de rachat préétabli, de l'énergie excédentaire à l'entreprise de services publics, mais pas directement au consommateur. Cela peut se réaliser au moyen de la technologie des blockchains, intégrée à des équipements TIC ou des dispositifs IdO (compteurs intelligents) et à des systèmes d'intelligence artificielle (IA) également en mesure d'améliorer l'analyse prédictive et d'aider à équilibrer la demande et l'offre d'énergie et de gérer la puissance de pointe pour éviter les contraintes techniques et les renforcements de réseau coûteux. Cependant, les coûts matériels et énergétiques liés à la validation et à la vérification des données sont élevés car de nombreux projets pilotes dans le domaine de l'énergie utilisent le consensus PoW, qui est très gourmand en énergie. Le calcul, la transmission et le stockage d'informations sur le registre de blockchains avec consensus PoW nécessitent de grosses quantités d'énergie consommées par des unités de calcul individuelles dispersées dans le monde entier. Cela peut s'illustrer par l'empreinte électrique annuelle du **minage Bitcoin** qui est estimée entre 45 TWh (MIT) et 73 TWh (Digiconomist). Ces valeurs sont comparables à l'ensemble de la consommation électrique annuelle de l'Autriche. De plus, l'empreinte carbone annuelle du minage Bitcoin (34,73 Mt CO₂) est comparable à celle du Danemark²⁷. Bitcoin n'est qu'une blockchain PoW parmi d'autres.

Par conséquent, l'empreinte énergétique est un élément dont il faut tenir compte pour mettre en œuvre cette technologie. Ce minage à forte intensité énergétique est dominé par deux types de mineur matériel : les processeurs graphiques et les mineurs ASIC. Les mineurs ASIC n'effectuent le minage que d'un algorithme spécifique, par exemple Bitcoin ou Ethereum. Les mineurs ASIC ont toutefois un rendement élevé et une meilleure puissance de traitement que les processeurs graphiques.

Outre l'intensité énergétique, la modularité et la rapidité restent des défis majeurs qui peuvent entraver la croissance des projets énergétiques visant à déployer la technologie des blockchains.

Toutefois, les avancées accomplies par les nouveaux mécanismes de consensus tels que PoS, PoA et **Practical Byzantine Fault Tolerance**²⁸ (PBFT) sont à même de résoudre ces difficultés. Par exemple, PoS, au contraire de PoW, ne nécessite pas de matériel spécifique et vérifie une nouvelle transaction en bloc basée sur les actifs ou les unités cryptomonétaires détenues (mise), évitant ainsi une forte consommation d'énergie. L'EFW, qui fait appel à un système de validation PoA, peut relever les défis techniques et réglementaires de la mise en œuvre des blockchains dans le secteur de l'énergie. La demande moyenne d'un nœud d'autorité sur le réseau EFW est d'environ 78 W, ce qui équivaut à une ampoule à incandescence domestique normale. Étant donné qu'il existe actuellement 46 nœuds d'autorité, la demande énergétique totale est d'environ 3,6 kW. En outre, il est prévu que le mécanisme améliore les performances et la sécurité car les régulateurs disposeront d'informations sur les « autorités » de contrôle. On ne sait pas très bien comment l'utilisation de l'énergie pour le minage

cryptomonnaie évoluera dans un avenir proche car la technologie est en constante évolution et les réglementations changent elles aussi. Le réseau EWF pourrait toutefois constituer une plateforme plus rapide, plus efficace au plan énergétique et plus sécurisée pour les participants.

Proof of Identity (PoI) permet d'identifier l'utilisateur par hachage, ce qui nécessite une unité centrale moins importante, ainsi qu'une consommation d'énergie et des coûts de transaction plus faibles qu'avec PoW. Ce mécanisme de consensus pourrait en définitive s'avérer plus adapté aux réseaux privés ou semi-privés ayant un accès sélectif aux marchés locaux de l'énergie. Une blockchain privée comprend un nombre limité de membres et est gérée uniquement par ces derniers, tandis que dans une blockchain semi-privée, une seule entité donne accès à n'importe quel utilisateur qualifié (2).

Lorsque toutes ces technologies en développement parviendront à maturité, il faut s'attendre à ce que la meilleure solution adaptée au secteur de l'énergie améliore l'efficacité énergétique, la modularité, la sécurité et la rapidité.

Aspect social

L'aspect social de la blockchain est lié aux incertitudes inhérentes au changement de comportement, à l'acceptation du public, à la gestion des parties prenantes et au développement des compétences. L'engagement actif des prosummateurs résidentiels est essentiel pour étendre la plateforme P2P. En outre, les consommateurs sont plus enclins à acheter de l'énergie renouvelable s'ils sont assurés de son origine, conformément à la théorie du marketing vert.

Par conséquent, la transparence, les certificats d'origine et l'immutabilité des données sur les plateformes de blockchains peuvent accroître la confiance des consommateurs. À long terme, les blockchains et une meilleure traçabilité pourront éclairer le choix des utilisateurs. Ceci dit, l'accroissement des choix possibles n'entraîne pas nécessairement un changement de comportement (3).

Politique et réglementation

La politique et la réglementation sont des facteurs essentiels pour la modularité et l'adoption des blockchains dans le secteur énergétique. Le P2P trading se heurte à des difficultés pour équilibrer l'intégration avec les contrôles centraux et assurer la coordination avec le réseau principal. En outre, avec l'expansion de la décentralisation, la gestion des systèmes énergétiques se complexifie, ce qui peut entraîner une accélération de la défection du réseau ou une sous-utilisation des actifs du réseau (1). Ces questions nécessitent des changements réglementaires importants car la manière dont les services sont offerts aux consommateurs est appelée à changer radicalement.

Les tarifs de l'électricité dans la structure actuelle du marché sont encore fortement réglementés et il est donc nécessaire d'établir un nouveau cadre capable de prendre en charge des tarifs flexibles sur la base de contrats intelligents. Cela peut aider considérablement à l'intégration au réseau principal des marchés énergétiques locaux ou de microréseaux et à incorporer ces derniers au système réglementé. Le travail sur les réglementations a déjà commencé dans de nombreux pays du monde. Par exemple, au Japon, le 5^e programme de base pour la science et la technologie (2016–2020)

favorise la progression des compteurs intelligents et des infrastructures TIC. Les technologies de connexion au réseau pour les énergies renouvelables, la qualité de l'électricité et les microréseaux ont été des domaines clés pour les gouvernements. Bien que des progrès aient été réalisés en collaboration avec l'industrie japonaise et les administrations locales, le gouvernement central reste le principal décideur (3). En Europe, la Commission européenne vise à positionner l'Europe à l'avant-garde du développement et de l'adoption des blockchains. C'est pourquoi, pour construire un cadre réglementaire transparent, la Commission a travaillé sur trois initiatives stratégiques²⁹.

- Le **Partenariat européen autour des blockchains**, créé en avril 2018, réunit au niveau politique tous les États membres de l'UE et les membres de l'Espace économique européen (Norvège et Liechtenstein). Les signataires de cette déclaration vont conjuguer leurs efforts en vue de réaliser le potentiel des services basés sur les blockchains au profit des citoyens, de la société et de l'économie.
- Pour faciliter la coopération public privé, l'**International Association for Trusted Blockchain Applications (INATBA)** a été constituée en avril 2019. Cette association regroupe les fournisseurs et les utilisateurs des technologies de registre distribué avec des représentants d'organisations gouvernementales et d'organismes de normalisation du monde entier.
- La Commission européenne, en collaboration avec le Parlement européen, a également lancé l'**Observatoire et le Forum européen sur la blockchain**, qui sert de plateforme d'engagement des parties prenantes. Cette initiative vise à accélérer le développement et l'adoption des blockchains, en mettant en avant le partage des connaissances, l'engagement communautaire, la cartographie des projets, les groupes de travail sur les cas d'utilisation et le cadre réglementaire, la production de rapports thématiques et la fourniture de formations.

Il existe d'autres défis majeurs, à la fois macro et micro, qui requièrent l'attention des décideurs politiques, comme les rôles incertains des parties prenantes, la constitution de jetons d'énergie ou la plateforme de blockchains, les licences de prosommateur, les obligations d'équilibrage, les codes de connexion au réseau, les frais de consignation du réseau, la loi sur la mesure des compteurs intelligents, la protection de la vie privée et la prise de décision centralisée. Ces problèmes peuvent se résoudre par la mise en œuvre d'une politique et de réglementations spécifiques pour l'adoption de technologies nouvelles. Par conséquent, le déploiement de cette technologie à l'échelle mondiale exigera des pays qu'ils établissent le cadre dans lequel les institutions pourront innover et accélérer la mise au point et l'adoption de la technologie des blockchains.

Integration

Un autre défi important est l'intégration de la blockchain au sein des technologies existantes. Jusqu'à présent, les acteurs du marché ont utilisé des systèmes tels que les plateformes d'échange pour négocier l'énergie, qui sont déjà bien avancés et répondent aux besoins des participants. La migration des systèmes avancés actuels de commerce de l'énergie vers les blockchains pourrait ne pas être viable au plan économique, même si la technologie et la modularité favorisent cette migration. Par conséquent, les systèmes existants ne peuvent pas être remplacés du jour au lendemain par des applications basées sur les blockchains, mais celles-ci peuvent devenir une composante du système existant et, à long terme, remplacer progressivement des systèmes entiers ou continuer à fonctionner parallèlement aux systèmes actuels. Il faut donc élaborer des normes pour les architectures de

blockchains afin de permettre l'interopérabilité entre les différentes solutions technologiques. Les entreprises doivent procéder à une évaluation minutieuse de la manière dont la technologie peut être intégrée à leurs systèmes existants avant d'investir massivement dans le développement de nouvelles applications à base de blockchains.

CONCLUSION

L'utilisation des blockchains dans le secteur de l'énergie promet de réduire les coûts, d'améliorer l'efficacité des processus et d'élargir la participation aux processus commerciaux. Ces modèles visent également à renforcer le rôle des prosommateurs et à optimiser la capacité de production, ce qui à terme pourra représenter un immense avantage pour l'ensemble de l'écosystème énergétique. La technologie peut ouvrir la voie à l'économie collaborative et l'alimenter. Il est indéniable que la solution de gestion des microréseaux et des ressources énergétiques distribuées (RED) par la technologie des blockchains est prometteuse. Cependant, pour un déploiement à grande échelle, la technologie devra prouver sa valeur ajoutée économique par rapport aux solutions existantes.

En outre, les cas d'utilisation de blockchains ont la possibilité de construire tout un écosystème nécessaire pour faciliter et accélérer la transition énergétique dans le but d'atteindre, à terme, un niveau zéro d'émissions de carbone.

D'après les résultats d'une enquête menée par Deloitte auprès des cadres en 2019, 53 % (+10 % par rapport à l'année précédente) des personnes interrogées ont déclaré que la technologie des blockchains est devenue une priorité essentielle pour leur organisation. En outre, 83 % d'entre eux (+9 % par rapport à l'année précédente) perçoivent des cas d'utilisation convaincants des blockchains³⁰. Cela indique clairement que la technologie est considérée comme un catalyseur pour les solutions de prochaine génération dans différents secteurs, y compris celui de l'énergie.

En ce qui concerne le secteur de l'énergie, du fait qu'il favorise le développement de la décentralisation et de la numérisation, la technologie des blockchains est en mesure d'accélérer la décarbonisation du réseau pour atteindre des objectifs de décarbonisation ambitieux. Par conséquent, la numérisation par la technologie des blockchains sera un outil permettant d'atteindre l'objectif ultime d'une transition énergétique rapide vers un monde à 100 % d'énergies renouvelables³¹.

Amit Rao - rao.amit@ifpen.fr

Texte soumis en janvier 2020

Références

- (1) Andoni, M., Robu, V., Flynn, D., Abram, S., Geach, D., Jenkins, D., McCallum, P. and Peacock, A. (2019). Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities
- (2) Ahl, A., Yarime, M., Tanaka, K. and Sagawa, D. (2019). Review of blockchain-based distributed energy: Implications for institutional development
- (3) Ahl, A., Yarime, M., Goto, M., Chopra, S., Kumar, N., Tanaka, K. and Sagawa, D. (2019). Exploring blockchain for the energy transition: Opportunities and challenges based on a case study in Japan
- (4) Abrishambaf, O., Lezama, F., Faria, P. and Vale, Z. (2019). Towards transactive energy systems: An analysis on current trends
-

¹ Selon la liste du CoinMarketCap au moment de la rédaction du présent article.

² Les ordinateurs ou dispositifs qui se connectent à l'interface Blockchain peuvent être considérés comme des nœuds, du fait qu'ils communiquent entre eux et transmettent des informations sur les transactions et les blocs au sein du réseau distribué d'ordinateurs, en faisant appel à un protocole p-2-p (dans le cas de Bitcoin).

³ Dans les blockchains publiques reposant sur le protocole Proof of Work (PoW) (par exemple Bitcoin et la mise en œuvre actuelle d'Ethereum), l'algorithme récompense les participants qui résolvent des puzzles cryptographiques dans le but de valider des transactions et de créer de nouveaux blocs (c'est-à-dire faire du minage). Dans les blockchains publiques à base de protocole PoS (par exemple avec l'apparition de l'évolution Casper d'Ethereum), un certain nombre de validateurs proposent et votent à tour de rôle sur le bloc suivant, le poids du vote de chaque validateur dépendant de l'importance de son dépôt (c'est-à-dire de sa mise) (par l'intermédiaire de Github).

⁴ <https://www.irena.org/newsroom/pressreleases/2019/Apr/Renewable-Energy-Now-Accounts-for-a-Third-of-Global-Power-Capacity>

⁵ <https://www.ofgem.gov.uk/gas/retail-market/metering/transition-smart-meters>

⁶ Une fois qu'une transaction a été enregistrée, elle ne peut plus être modifiée.

⁷ Étude interne d'IFPEN d'août 2019.

⁸ Sur la base de l'analyse détaillée de la fig. 3 par McKinsey.

⁹ Sur la base d'une présentation d'OutlierVentures.

¹⁰ Voir note 7 supra.

¹¹ Sur la base de 215 projets identifiés par IFPEN.

¹² Par rapport aux échanges d'électricité et de gaz.

¹³ <https://www.ponton.de/enerchain-1-0-is-live/>

¹⁴ <https://www.sunchain.fr/en#team>

¹⁵ <https://www.powerledger.io/our-technology/>

¹⁶ Voir note 7 *supra*.

¹⁷ Voir note 11 *supra*.

¹⁸ (PoA) est un algorithme utilisé avec des blockchains qui donne des transactions relativement rapides grâce à un mécanisme de consensus basé sur l'identité comme enjeu.

¹⁹ Un mécanisme PoW est très gourmand en énergie.

²⁰ Voir note 7 *supra*.

²¹ Voir note 11 *supra*.

²² Les stable coins sont des cryptomonnaies conçues pour réduire à un minimum la volatilité des prix du stable coin, par rapport à un actif « stable » tel que le dollar US ou l'Euro, ou par rapport à un panier d'actifs. Un stable coin peut être indexé sur une cryptomonnaie, une monnaie fiduciaire ou des marchandises négociées en bourse (telles que les métaux précieux ou les métaux industriels).

²³ Voir le point 5.

²⁴ Voir note 11 *supra*.

²⁵ <https://www.usine-digitale.fr/article/blockchain-engie-et-ledger-inventent-un-boitier-pour-authentifier-les-donnees-en-entree.N767439>

²⁶ Modification radicale d'un protocole de réseau qui rend valides des blocs ou des transactions auparavant non valides, ou vice versa.

²⁷ <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption>

²⁸ Byzantine Fault Tolerance (BFT) est la caractéristique d'un réseau distribué qui permet de parvenir à un consensus (accord sur une même valeur), même lorsque certains des nœuds du réseau ne répondent pas ou répondent avec des informations incorrectes. L'objectif d'un mécanisme BFT est de se prémunir contre les défaillances du système en recourant à une prise de décision collective (c'est-à-dire concernant à la fois les nœuds corrects et les nœuds défectueux) visant à réduire l'influence des nœuds défectueux. BFT découle du « problème des généraux byzantins » (Byzantine Generals' Problem) (via <https://www.geeksforgeeks.org/practical-byzantine-fault-tolerancepbft/>).

²⁹ <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/blockchain-technologies>

³⁰ https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/se/Documents/risk/DI_2019-global-blockchain-survey.pdf

³¹ https://fsr.eui.eu/wp-content/uploads/Blockchain_meets_Energy_-_ENG.pdf

Accélération de la transition énergétique grâce à la technologie des blockchains
11 février 2020

Lien vers la page web :